

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

№ 3(55), 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 14.09.2026. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84¹/₈. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 17,44. Уч.-изд. л. 21,02. Тираж 7 экз. Заказ 404.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 658.512

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-2-11

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА СХЕМ УСТАНОВКИ ЗАГОТОВОК
ДЛЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА НЕКРУГЛЫХ ДЕТАЛЕЙ
НА ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ

д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

канд. техн. наук, доц. Н.В. БЕЛЯКОВ, Ю.Е. МАХАРИНСКИЙ, М.А. ЯКУШЕВ, А.П. СТАНКЕВИЧ
(Витебский государственный технологический университет)

Предложена принципиальная алгоритмическая модель проектного базирования для решения задачи автоматизированного синтеза систем координат WCS (Work Coordinate System), а также определения состава установочных и установочно-зажимных элементов станочных приспособлений для обеспечения точности расположения конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы в серийном машиностроительном производстве на фрезерных обрабатывающих центрах. Алгоритмическая модель включает ряд вспомогательных алгоритмов: построения модели структуры геометрических связей модулей функциональных поверхностей заготовок на операции обработки; определения базовых поверхностей; идентификации состава баз ориентации; определения приоритета в обеспечении допусков; привязки геометрических связей к элементам состава баз (формируется WCS); определения состава установочных и (или) установочно-зажимных элементов модели базирования. Описано программное обеспечение, реализующее указанные алгоритмы.

Ключевые слова: базирование, некруглые детали, обрабатывающий центр, система координат, MCS (Machine Coordinate System), WCS (Work Coordinate System), CAFD (Computer-Aided Fixture Design), алгоритмическое обеспечение, схема базирования, схема установки, станочное приспособление.

Введение. В номенклатуре деталей, применяемых в машиностроении, до 20% составляют оригинальные некруглые (не относящиеся к классу тел вращения) детали. Это такие детали, как корпуса, коробки, станины, основания, кронштейны, стойки, рычаги и т.п. Они состоят из разнообразных конструктивных элементов, различным образом сориентированных в пространстве. Характерным для них являются высокие требования к показателям точности расположения элементов конструкции. В том случае, если заданная точность допусков расположения не обеспечена, то деталь неизбежно перейдет в неустранимый брак. Большое влияние на обеспечение точности расположения при обработке на металлорежущих станках оказывает базирование заготовок.

Для механической обработки заготовок некруглых деталей все более широкое применение находят фрезерные обрабатывающие центры (ОЦ). Анализ каталогов станочного оборудования, а также опыта работы машиностроительных предприятий сводит многообразие ОЦ к двум принципиальным видам: с горизонтальным НМС (Horizontal Machining Center) и вертикальным ВМС (Vertical Machining Center) шпинделем. ОЦ отличаются широким разнообразием компоновочных решений, регламентированных ГОСТ Р ИСО 10791-1-2009. Важнейшее значение для вопросов базирования имеет то, что независимо от компоновки ОЦ применяется единая система обозначений координат MCS (Machine Coordinate System (ноль станка)) [1; 2].

Анализ методов базирования заготовок некруглых деталей показывает, что их установка в рабочей зоне фрезерных ОЦ для всех компоновочных решений осуществляется: непосредственно на поверхность стола станка с использованием универсальных опор и упоров; на поверхности установочных и (или) установочно-зажимных поверхностей станочных приспособлений [3–5].

Для обеспечения точности расположения конструктивных элементов одной из важнейших задач при проектировании моделей базирования заготовок на фрезерных ОЦ является определение положения системы рабочих координат WCS (Work Coordinate System (ноль детали)) относительно системы координат MCS [6–9].

Проведенный анализ информационных источников показывает, что определение ориентации WCS относительно MCS может осуществляться двумя методами: виртуальным базированием (базированием с использованием систем измерений); базированием относительно простых движений подач (направляющих).

Ориентация WCS относительно системы координат станка при виртуальном базировании осуществляется на основе OMV-технологии (от англ. on-machine verification). Процесс происходит с помощью выполнения замеров положения заготовки непосредственно на станке с помощью систем щупов и датчиков (в перспективе индуктивных, лазерных, интерферометрических и триангуляционных измерительных систем). Далее при специальном управлении станком, обеспечивающем перемещения за счет сложных движений подач, возможно производить обработку конструктивных элементов вне зависимости от их ориентации относительно направляющих станка [10–13].

Метод виртуального базирования находит применение в единичном и мелкосерийном производстве. В случае использования этого метода для обработки партий заготовок в серийном производстве значительно увеличивается вспомогательное время, связанное с процедурой измерения, и, как следствие, снижается производительность; повышаются требования к квалификации операторов; снижаются качество обработанных поверхностей, а также точность формы и расположения конструктивных элементов вследствие необходимости совмещения подач; повышается себестоимость изготовления заготовок за счет необходимости использования дополнительно оснастки и программного обеспечения.

Если оси WCS не являются параллельными (перпендикулярными) по отношению к осям MCS, то при обработке с использованием простых движений подач (вдоль направляющих) на точность линейных и угловых размеров, а также допусков расположения поверхностей существенное влияние будут оказывать углы поворота осей указанных систем координат друг относительно друга. Установлено, что ориентация осей WCS относительно простых движений подач и координат станка MCS при базировании партий заготовок может осуществляться двумя способами:

- выверкой положения установочных элементов относительно простых подач (при базировании заготовки непосредственно на стол станка или в приспособлении). При этом используются эталонные плоскопараллельные концевые меры и угольники, а также средства измерения (как правило, индикаторы);
- за счет использования системы базирующих (установочных) элементов станочных приспособлений, соответствующих посадочным местам станков или спутников и обеспечивающих их точное положение на столе или спутнике (при базировании заготовки в приспособлении и (или) спутнике).

При использовании системы базирующих (установочных) элементов станочных приспособлений или спутников при их проектировании формируется установочная система координат, положение которой в свою очередь задается относительно системы координат приспособления. Система координат приспособления привязывается к системе координат стола станка и MCS.

Для реализации положения системы координат приспособления относительно системы координат стола могут применяться такие варианты ориентации приспособления, как: с помощью цилиндрического пальца по отверстию и пальца (или шпонки) по продольному пазу (если на столе станка имеются центральное отверстие и продольные пазы); по угольнику в координатный угол (при наличии на столе станка продольных пазов); с помощью установочных шпонок или пальцев (при наличии на столе станка продольных пазов и центрального поперечного пазы); с помощью системы Zero Point (для различных столов).

Суть системы Zero Point заключается в том, что к системе координат станочного приспособления привязывается система координат, заданная относительно стола станка. Начало этой системы координат и называется «нулевая точка». Особую эффективность такие системы показывают для многономенклатурного мелко- и средне-серийного производства (High-Mix Low-Volume), когда становится возможным вне станка произвести установку заготовки и привязать ее систему координат к системе координат станка [14; 15].

Установлено, что важнейшее значение при базировании партий заготовок имеет положение WCS относительно опорной (установочной) системы координат (привязанной к установочным элементам). При этом желательно совместить опорную систему координат с WCS, чтобы не создавать условия для возникновения погрешности схемы установки – меры несовпадения опорной системы координат и WCS. Причиной возникновения погрешности схемы установки являются погрешности размеров объекта производства, которые получены на этапах обработки, предшествующих рассматриваемому. Формирование WCS, а также ее ориентация относительно установочной системы координат должно осуществляться на этапе проектного базирования. При проектном базировании необходимо минимизировать погрешность схемы установки как меры несовпадения установочной системы координат и системы координат заготовки детали [16; 17].

Сократить трудоемкость проектирования в десятки раз и повысить качество проектных работ позволяет их автоматизация [18–20]. Однако анализ информационных источников и опыта работы технологических бюро машиностроительных предприятий, специализирующихся на серийном выпуске некруглых деталей, не выявил формализованных методик формирования WCS. В информационных источниках лишь приводятся общие рекомендации, заключающиеся в необходимости использовать в качестве ноля детали верхних, доступных для инструмента, поверхностей, поверхностей заготовки, сопрягаемых с неподвижными поверхностями приспособлений или опорными элементами [6–9]. Процедуры синтеза вариантов схем базирования, составов установочных и установочно-зажимных элементов станочных приспособлений для обеспечения точности расположения элементов конструкции для механической обработки партий заготовок оригинальных некруглых деталей сложной формы на фрезерных обрабатывающих центрах являются недостаточно алгоритмизированными, и, как следствие, отсутствуют автоматические средства их проведения, а также автоматические системы проектирования станочных приспособлений (CAFD-системы (Computer-aided fixture Design)).

Поэтому целью работы является разработка системы автоматизированного синтеза схем установки партий заготовок для обеспечения точности расположения конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы в субтрактивном машиностроительном производстве на фрезерных обрабатывающих центрах.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены задачи по разработке алгоритмического и программного обеспечения указанной системы автоматизированного синтеза.

Основная часть. Для решения задачи автоматизированного формирования WCS, а также определения состава установочных и установочно-зажимных элементов приспособлений для обеспечения точности расположения конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы в субтрактивном машиностроительном производстве на фрезерных обрабатывающих центрах предлагается использовать положения автоматизированного проектного базирования [21].

В основе разработанного алгоритмического обеспечения системы автоматизированного синтеза лежит следующая последовательность вспомогательных подалгоритмов (рисунок 1):

- 1) построения модели структуры геометрических связей модулей функциональных поверхностей заготовок на операции обработки;
- 2) определения базовых поверхностей;
- 3) идентификации состава баз ориентации;
- 4) определения приоритета в обеспечении допусков;
- 5) привязки геометрических связей к элементам состава баз (формируется WCS или базовая система координат);
- 6) определения состава установочных и (или) установочно-зажимных элементов модели базирования (определяется установочная система координат).

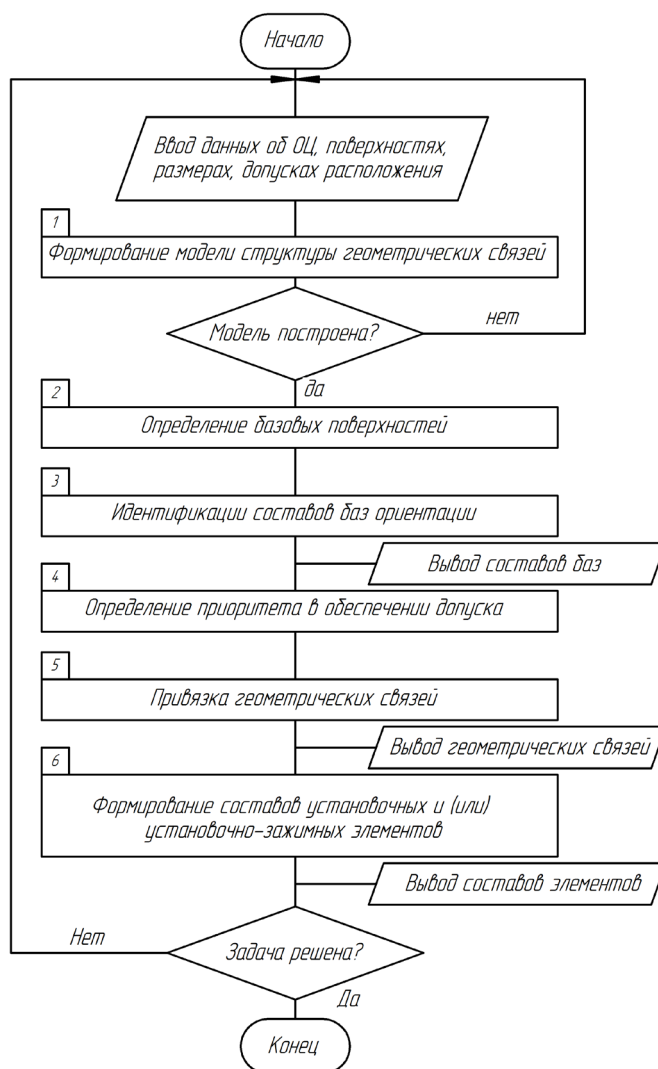


Рисунок 1. – Блок-схема принципиального алгоритма работы системы

Реализация подалгоритма 1 предусматривает корректное задание линейных размеров и допусков расположения на геометрической модели детали. Работа подалгоритма 1 основана на выборе компоновочной схемы фрезерного обрабатывающего центра, а также формировании массивов данных о выдерживаемых на операции размерах и допусках расположения на основе принципа единства конструкторских и технологических баз (рисунок 2).

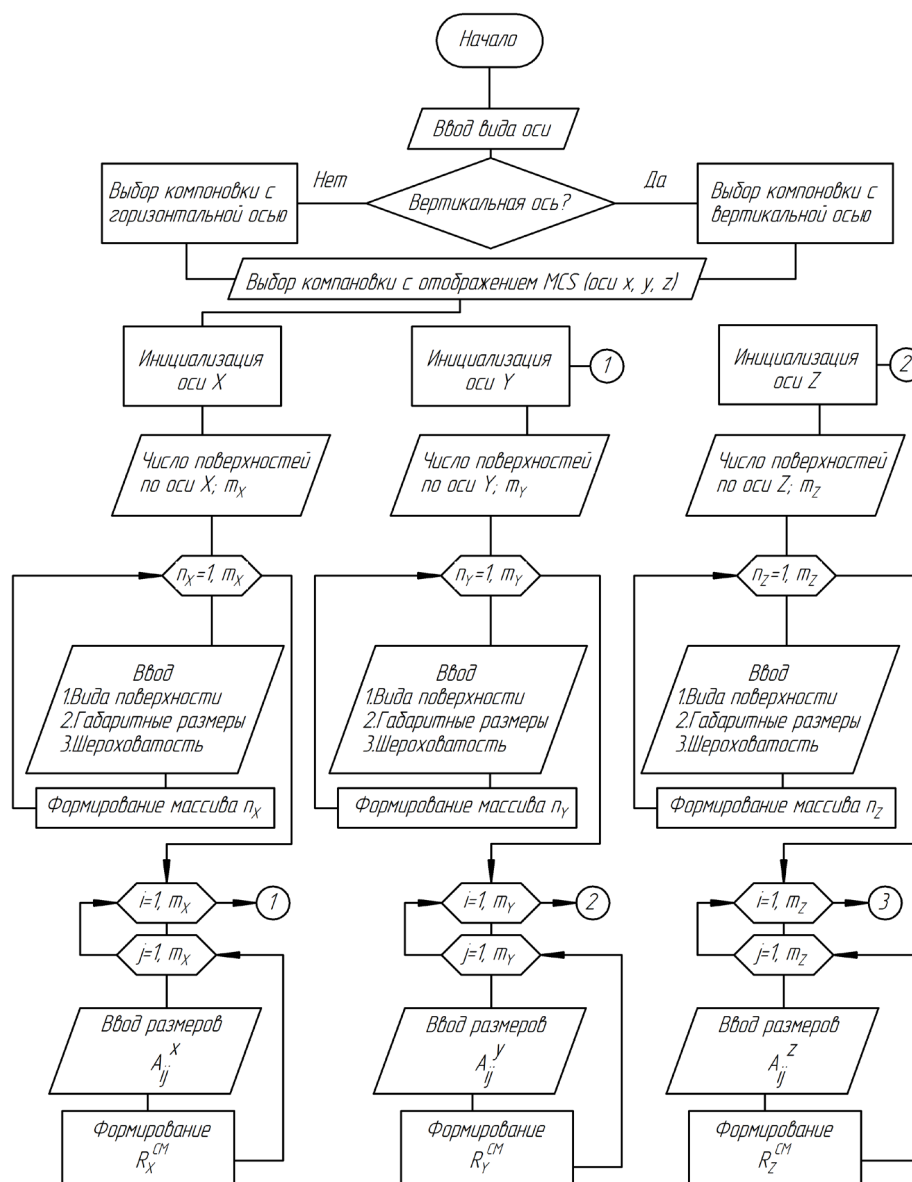


Рисунок 2. – Блок-схема подалгоритма построения модели структуры геометрических связей модулей функциональных поверхностей заготовок на операции обработки

Оперирование размерными параметрами осуществляется с помощью неориентированных графов типа дерева линейных размерных связей (обозначений размерных связей поверхностей в трех координатных направлениях $R_{(x,y,z)}$).

Задачи машинного представления информации предполагают использование матричного представления графов. Графы $R_{(x,y,z)}$ предлагается представлять с помощью матрицы смежности $R_{(x,y,z)}^{cm} = \|r_{i,j}\|_{m \times m}$, элементы которой образуются по правилу:

$$r_{i,j} = \begin{cases} v_k, & \text{если вершина } \bar{n}_i \text{ соединена с вершиной } \bar{n}_j \text{ ребром;} \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $v_k = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)$ – ребро, соединяющее вершины $\bar{n}_i$ и $\bar{n}_j$ (в матрицу записывается $A(T)$ – соответствующий линейный размер и допуск; m – число вершин).

Под видом поверхности понимается: плоскость (явная или симметрии); ось и плоскость, связанная с осью (в частности к плоскости симметрии); плоскость, проходящая через оси двух отверстий (в частности плоскости симметрии).

Оперирование угловыми параметрами осуществляется с помощью графов допусков расположения U . Графы формируются согласно принципам однозначности и корректности задания ориентации элементов кон-

струкции относительно того или иного состава баз ориентации. Предлагается его представлять в виде матрицы инцидентности. Под матрицей инцидентности понимается прямоугольная таблица вида $U = \|u_{i,j}\|_{m \times l}$, элементы которой образуются по правилу:

$$u_{i,j} = \begin{cases} y_l, & \text{если ребро } y_l \text{ выходит из вершины } \bar{n}_m; \\ -y_l, & \text{если ребро } y_l \text{ входит в вершину } \bar{n}_m; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $y_l = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_j \rangle$ – дуга графа, соединяющая вершину i с вершиной j (в матрицу записывается T – соответствующий допуск углового расположения); m – число вершин; l – число ребер.

Подалгоритм 2 предполагает выполнение последовательности процедур совместного анализа указанных выше массивов данных для формирования возможных составов баз ориентации (рисунок 3).

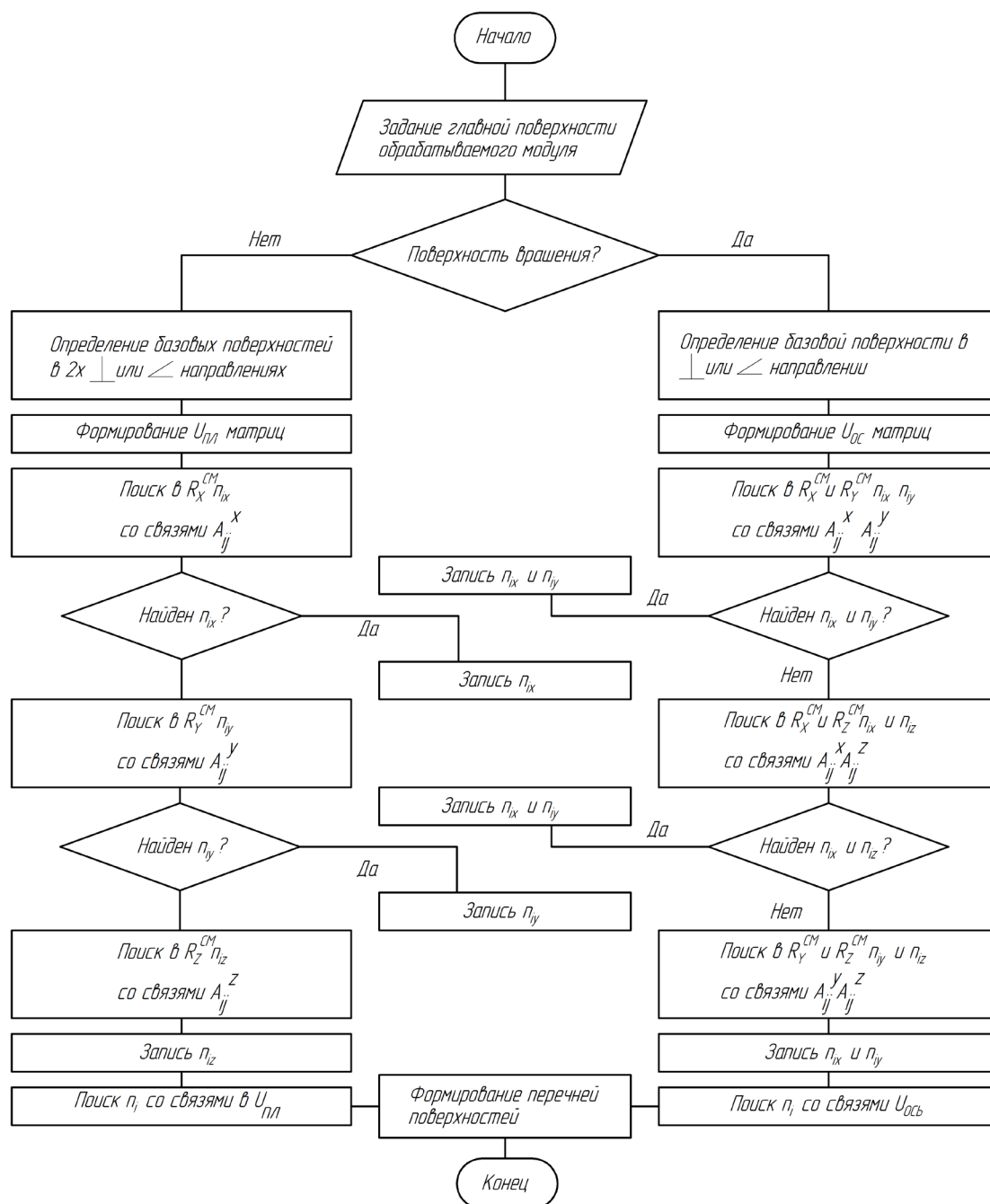


Рисунок 3. – Блок-схема подалгоритма определения базовых поверхностей

Подалгоритм 3 включает в себя анализ поверхностей сформированных перечней для определения принадлежности состава к одному из четырех их видов (рисунок 4).

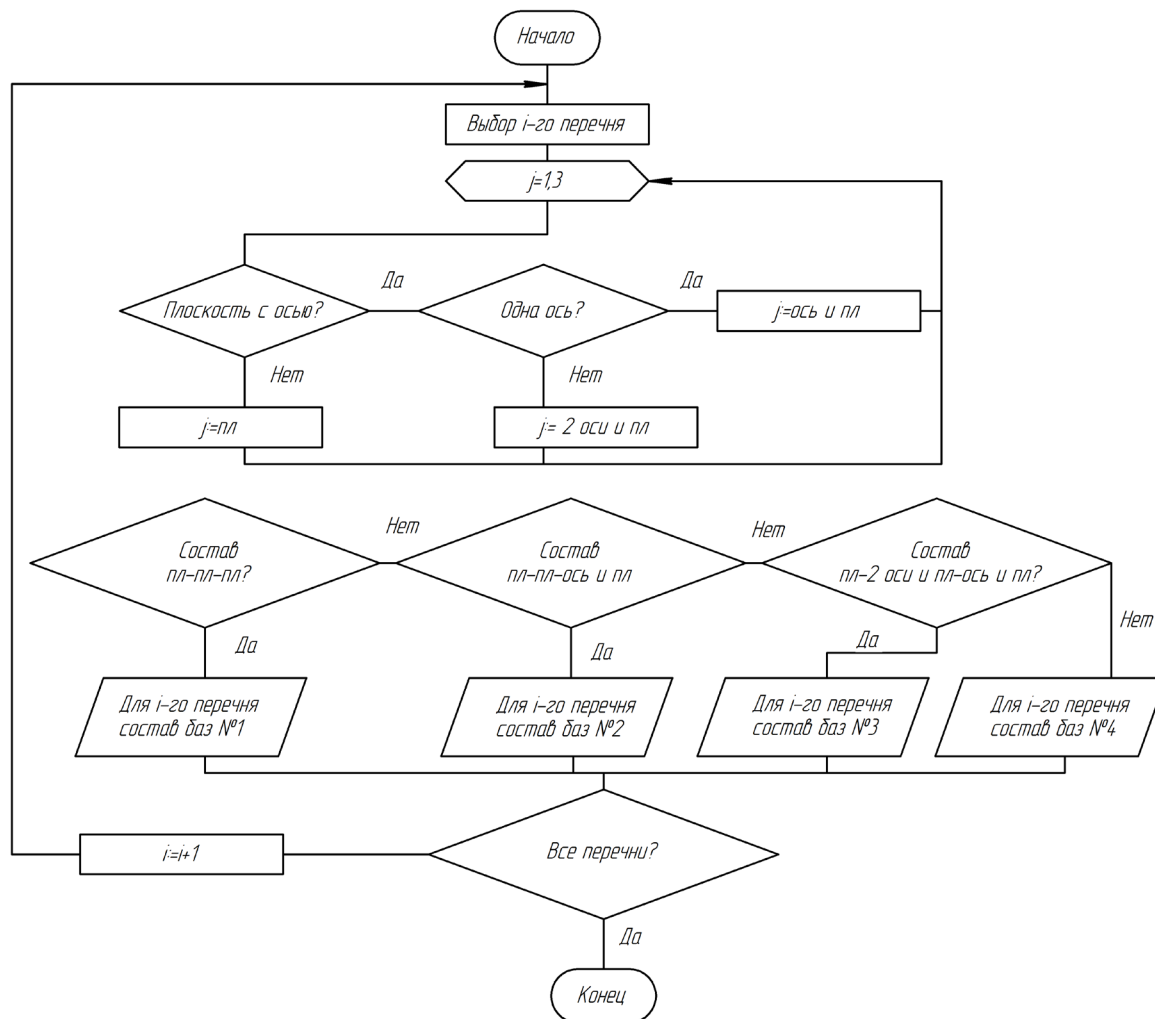


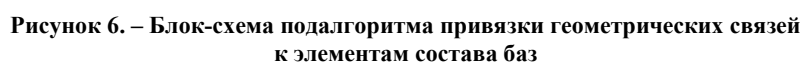
Рисунок 4. – Блок-схема подалгоритма идентификации состава баз ориентации

Для реализации подалгоритма 4 разработана формализованная методика ранжирования численных значений допусков размеров и расположения по компонентам состава баз. При реализации методики осуществляются приведение допусков к одной базовой длине, определение значений удельных допусков и определение главной (главных) базы в зависимости от их значений. Численные значения неуказанных допусков определяются по ГОСТ 25069 (рисунок 5).

Суть привязки геометрических связей к элементам состава баз (подалгоритм 5) заключается в использовании массива производственных моделей, соответствующих вариантам однозначного задания расположения обрабатываемых функциональных поверхностей относительно главной базы (рисунок 6).

Структура массива полностью соответствует структуре схемы вариантов корректного задания допусков расположения относительно составов баз. Каждому antecedенту в виде варианта задания приоритетного допуска ставится в соответствие консеквент в виде рекомендаций по определению геометрических связей, накладываемых базой. Так, например, antecedенту O10 (приоритетным является допуск перпендикулярности оси относительно плоскости и при этом допуск линейного размера относительно другой меньше допуска линейного размера относительно третьей) соответствует консеквент: первая плоскость назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, вторая плоскость – двойной однонаправленной (направляющей), третья плоскость – одиночной (опорной).

Подалгоритм 6 содержит метод типовых технических решений, при реализации которого элементы геометрических связей составов баз заменяются соответствующими установочными и (или) установочно-зажимными элементами модели базирования. Замену указанных элементов предлагается осуществлять с помощью разработанных массивов соответствия и сокращения вариантов технических решений.



Программное обеспечение системы разработано с использованием стандартных элементов и математических функций языков Python и C++. Интерфейс программного обеспечения представляет собой систему взаимосвязанных диалоговых окон и вкладок для ввода исходных данных, а также вывода результатов.

В начале работы системы для реализации подалгоритма 1 пользователю предлагается последовательность диалоговых окон для определения вида ОЦ (с горизонтальным расположением шпинделя НМС или ОЦ с вертикальным расположением шпинделя VMC), его компоновки и определения системы координат MCS. Для реализации принципа единства конструкторских и технологических баз далее предусматривается введение информации о геометрической модели заготовки на операции в виде задания поверхностей и их размерных связей по осям MCS, а также допусков расположения согласно их простановке на чертеже. Для этого реализуется концепция отображения поверхностей трехмерной модели в виде стандартных примитивов и дальнейшего обозначения поверхностей по соответствующим осям с помощью их нумерации. Исходное диалоговое окно для введения сведений о геометрической модели заготовки детали предусматривает создание примитива (прямой многогранник, призма, цилиндр, фигура по векторам) с выводом запрашиваемых сведений. В результате примитивы отображаются в соответствующих плоскостях MCS для дальнейшего ввода номеров поверхностей и задание размерных связей и допусков расположения. Некоторые окна для ввода исходной информации приведены на рисунке 7.

На рисунке 8 показан пример реализации подалгоритмов 5 и 6 в виде указания на поверхностях геометрической модели заготовки условных значков, интерпретирующих геометрические связи на поверхностях составов баз ориентации и рекомендуемых условных обозначений установочных элементов на поверхностях составов баз.

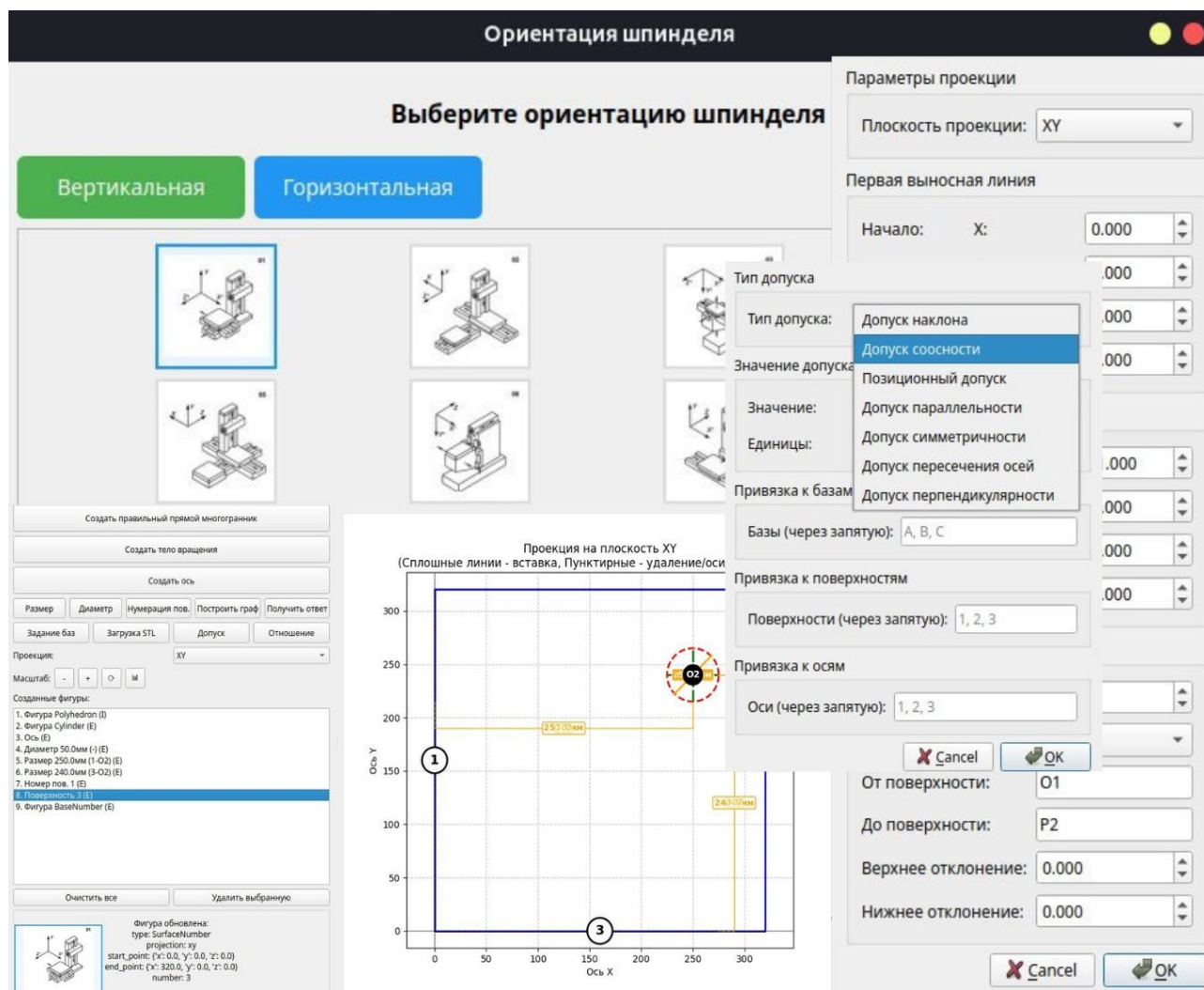


Рисунок 7. – Интерфейсы выбора компоновки ОЦ, системы координат MCS, создания геометрической модели с размерами и допусками расположения

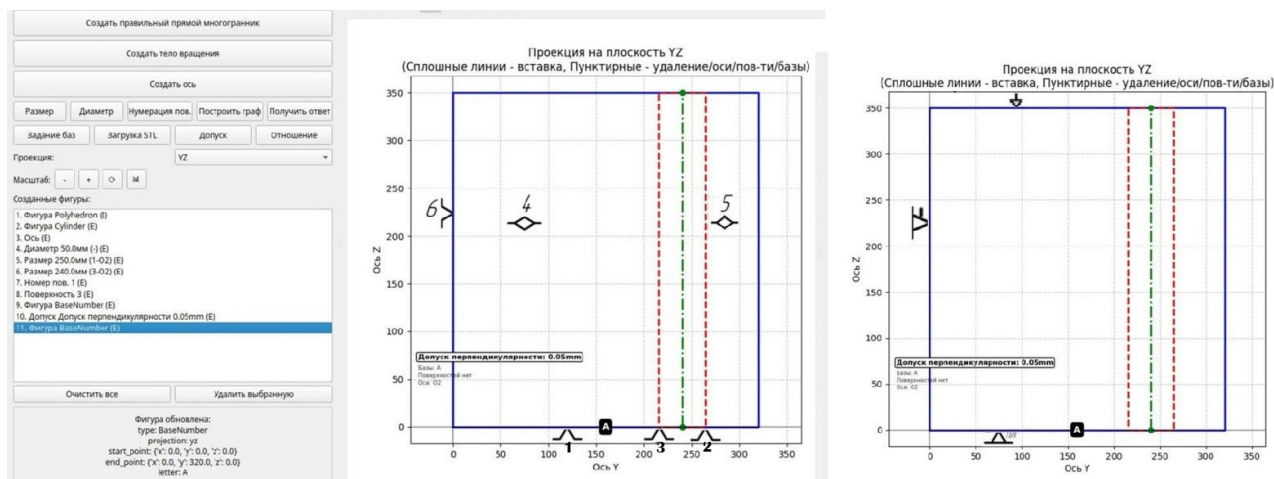


Рисунок 8. – Интерфейсы вывода информации

Закключение. Предложена принципиальная алгоритмическая модель проектного базирования для решения задачи автоматизированного синтеза схем установки по обеспечению точности расположения конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы в серийном машиностроительном производстве на фрезерных обрабатывающих центрах. Алгоритмическая модель включает ряд вспомогательных алгоритмов: построения модели структуры геометрических связей модулей функциональных поверхностей заготовок на операции обработки; определения базовых поверхностей; идентификации состава баз ориентации; определения приоритета в обеспечении допусков; привязки геометрических связей к элементам состава баз (формируется WCS); определения состава установочных и (или) установочно-зажимных элементов модели базирования. Алгоритмы реализованы в виде программного обеспечения для системы автоматизированного синтеза схем установки.

Система прошла апробацию в учебном процессе кафедр технологии и оборудования машиностроительного производства учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой» и технологии машиностроения учреждения образования «Витебский государственный технологический университет». Использование системы позволяет сократить сроки подготовки технологических процессов изготовления деталей, а также оформления соответствующей технологической документации, повысить качество проектных решений по выбору (разработке) станочных приспособлений, что дает возможность повышения производительности труда технологов-машиностроителей и снижения количества ошибок на этапе внедрения технологии.

Разработки могут использоваться в технологических бюро машиностроительных предприятий для проектирования операций изготовления деталей на фрезерных обрабатывающих центрах; в IT-компаниях, специализирующихся на разработке систем автоматизированного проектирования технологических процессов, управляющих программ для станков с ЧПУ и приспособлений для совершенствования CAPP/CAM/CAFD-систем; в учебном процессе для подготовки специалистов в области технологии машиностроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров А.В. Определение технологических возможностей вертикального фрезерного обрабатывающего центра // Станкоинструмент. – 2020. – № 4(021). – С. 48–52. DOI: 10.22184/2499-9407.2020.21.04.48.52
2. Разманов Е.С., Якубов А.В. Обрабатывающие центры - основа современного машиностроительного производства // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2010. – № 3. – С. 31–32. – URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=397>.
3. Kumar S. A., Subramaniam V., Teck T. B. Conceptual design of fixtures using machine learning techniques // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2000. – № 16(3). – P. 176–181. DOI: 10.1007/s001700050024
4. Patil A., Rambhad K. S., Bele D. R. Concept of Jigs and Fixture Design – A Review // International Journal of Analytical, Experimental and Finite Element Analysis (IJAEEFA). – 2017. – Vol. 4. – Iss. 4. – P. 73–77. DOI: 10.26706/IJAEEFA.4.4.20171004
5. Gothwal S., Raj T. Different aspects in design and development of flexible fixtures: Review and future directions // International Journal of Services and Operations Management. – 2017. – Vol. 26. – № 3. – P. 386–410. DOI: 10.1504/IJSOM.2017.081944
6. Ловыгин А.А., Теверовский Л.В. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM-система: практическое пособие. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 280 с.
7. Royer M., Anselmetti B. 3d manufacturing tolerancing with probing of a local work coordinate system // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – T. 84. – № 9. – P. 2151–2165. DOI: 10.1007/s00170-015-7797-4
8. Intelligent design and optimization of machining fixtures / D. Vukelic, G. Simunovic, D. Tadic et al. // Tehnički vjesnik. – 2016. – № 23(5). – P. 1325–1334. DOI: 10.17559/TV-20150908142130

9. Meraz M. M., Duarte L. J., Hernández C. L. Localization of the work coordinate system using computer vision and geometric transformations on three-axis cnc milling machines // EAI Endorsed Transactions on AI and Robotics. – 2025. – Vol. 4. – P. 1–14. DOI: 10.4108/airo.9898
10. Gu J., Agapiou J. S., Kurgin S. CNC machine tool work offset error compensation method // Journal of Manufacturing Systems. – 2015. – Vol. 37. – P. 576–585. DOI: 10.1016/j.jmsy.2015.04.001
11. Srinivasan H., Harrysson O., Wys, R. Automatic part localization in a CNC machine coordinate system by means of 3d scans // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 81. – P. 1127–1138. DOI:10.1007/s00170-015-7178-z
12. Petrakov Y., Shuplietsov D. Contour milling programming technology for virtual basing on a CNC machine // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – № 2(1 (98)). – P. 54–60. DOI:10.15587/1729-4061.2019.162673
13. Хрустицкий К.В., Черепашков А.А. Комплексная автоматизация технологической подготовки производства и управления процессами механической обработки корпусных деталей машин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 5(36). – С. 62–66. – URL: <https://journals.ssau.ru/vestnik/issue/viewIssue/44/58>.
14. Храмов А.В., Жирухин К.С., Киселев Е.С. Эффективность использования новых видов технологической оснастки при изготовлении нежестких плоскостных алюминиевых деталей // iPolytechJournal. – 2023. – № 27(2). – С. 284–296. DOI: 10.21285/1814-3520-2023-2-284-296
15. Кротов С.Н. Системы быстрого базирования и предъявляемые к ним требования на примере SCHUNK VERO-S // Станкоинструмент. – 2016. – № 4. – С. 70–74. – URL: <https://www.stankoinst.ru/journal/article/5749>.
16. Беляков Н.В., Попок Н.Н., Якушев М.А. Порядок назначения систем рабочих координат WCS для программирования обработки партий заготовок деталей на станках с ЧПУ // Образование и наука в развитии технологий, экономики, общества = Education and Science in the development of Technology, Economy and Society (ESTES-2025): материалы докладов 58-й междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, посвящ. 60-летию УО «ВГТУ». В 2 т. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2025. – Т. 2. – С. 416–418.
17. Проектное базирование заготовок при обработке на многоцелевых фрезерных обрабатывающих центрах / Б.М. Базров, Н.Н. Попок, Н.В. Беляков и др. // Инновационные технологии в машиностроении: электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Новополоцк (22–23 апр. 2025 г.) / ПГУ им. Евфросинии Полоцкой. – Новополоцк, 2025. – С. 23–25.
18. Богуцкий В.Б. Автоматизированная система проектирования приспособлений для металлорежущих станков // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 1–7. – URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2019/07/2019-N2-Bogutsky.pdf> (дата обращения: 21.03.2026).
19. Boyle I., Rong R., Brown D.C. A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2011. – № 27. – Iss. 1. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.rcim.2010.05.008
20. Active fixturing: literature review and future research directions / O. J. Bakker, T. N. Papastathis, A.A. Popov et al. // International Journal of Production Research. – 2013. – Vol. 51. – Iss. 11. – P. 3171–3190. DOI: 10.1080/00207543.2012.695893
21. Беляков Н.В., Попок Н.Н. Основы автоматизированного проектного базирования в субтрактивном и аддитивном машиностроительных производствах. – Витебск: ВГТУ, 2023. – 183 с.

Поступила 05.06.2026

THE SYSTEM OF AUTOMATED SYNTHESIS OF INSTALLATION SCHEMES OR MACHINING BATCHES OF BLANKS OF NON-ROUND PARTS AT MACHINING CENTERS

N. POPOK

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

N. BELYAKOV, Y. MAKHARINSKY, M. YAKUSHEV, A. STANKEVICH

(Vitebsk State University of Technology)

A basic algorithmic design-based model is proposed to solve the problem of automated synthesis of WCS (Work Coordinate System) coordinate systems, as well as to determine the composition of the mounting and clamping elements of machine tools to ensure the accuracy of the structural elements of original non-circular parts of complex shape in serial machine-building production on multi-purpose milling machining centers. The algorithmic model includes a number of auxiliary algorithms: constructing a model of the structure of geometric connections of modules of functional surfaces of workpieces for processing operations; determining the base surfaces; identifying the composition of orientation bases; determining priority in ensuring tolerances; linking geometric connections to the elements of the base composition (WCS is formed); determining the composition of the mounting and (or) mounting and clamping elements of the basing model. The software implementing these algorithms is described.

Keywords: basing, non-circular parts, machining center, coordinate System, MCS (Machine Coordinate System), WCS (Work Coordinate System), CAFD (Computer-Aided Fixture Design), algorithmic support, basing scheme, installation scheme, machine tool.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ КАЧЕСТВА МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СРЕДСТВ

канд. техн. наук, доц. Г.И. ГЕДРОИТЬ, Т.А. ВАРФОЛОМЕЕВА, С.В. ЗАНЕМОНСКИЙ
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)
д-р техн. наук, доц. С.А. РЫНКЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;
Белорусско-Российский университет, Могилев)

Рассмотрены вопросы классификации эксплуатационных качеств сельскохозяйственных тракторов, выполняющих работы в растениеводстве. Дана оценка энергонасыщенности тракторов, показаны направления развития, уровень энергонасыщенности тракторов «БЕЛАРУС». Энергонасыщенность современных тракторов постоянно возрастает. Ведутся разработки вариантов энергетических средств, реализующих мощность двигателя через рабочие органы и ходовую часть агрегатируемых машин. Важную роль при реализации мощности энергонасыщенных тракторов играет тип используемых приводов. Приведены критерии и дана оценка механических приводов активных рабочих органов и ходовых частей машин. Показано, что выбор типа привода зависит от количества потребителей, значений достигаемых показателей эксплуатационных качеств.

Ключевые слова: трактор, эксплуатационные качества, агрегатирование, трансмиссия, передача.

Введение. Трактор является основным энергетическим средством в сельском хозяйстве. С помощью трактора выполняют объем энергоемких земледельческих операций в растениеводстве, других отраслях. Это основная и предпосевная обработка почвы, внесение удобрений, посев, уход за растениями, заготовка кормов, уборка культур, транспортные и погрузочно-разгрузочные работы, обеспечение животноводства, выполнение отдельных операций в строительстве. В условиях индустриальных и интенсивных технологий, точного земледелия работы необходимо выполнять качественно, с соблюдением агротехнических сроков, учитывать снижение численности населения в сельской местности.

Уровень выполнения работ, их эффективность анализируют с помощью эксплуатационных качеств, свойств и показателей этих свойств для тракторов и др. машин [1]. Под качеством машин понимают совокупность эксплуатационных, потребительских свойств, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением. В свою очередь каждое эксплуатационное свойство машины характеризуется рядом показателей, оценивающих это свойство количественно. Следовательно, качество является наиболее общей категорией, а свойство характеризует какую-либо одну сторону машины, выполненную во взаимоотношении с такой же стороной другой машины. Согласно [1], выделены три основных качества: производительность, топливная экономичность, проходимость. В работе [2] для оценки мобильных энергетических средств выбраны производительность, группа агротехнических свойств, стоимость. Принятые авторами основные показатели близки.

Цель работы: выделить эксплуатационные качества, свойства, показатели для мобильных машин с учетом развития техники, роста энергонасыщенности, оценить связанное с этим применение приводов потребителей.

Основная часть. В отличие от информации, приведенной в [1; 2], перечень эксплуатационных качеств, свойств, показателей мобильных средств уточнен (таблица 1). Это связано с тем, что указанные источники являются учебниками для ВУЗов по дисциплине «Тракторы и автомобили» и не в полной мере учитывают изучаемое в других дисциплинах.

Производительность тракторных агрегатов является важнейшим эксплуатационным качеством. Зависит от мощности двигателя, тягово-сцепных свойств, конструкции агрегатируемой машины, условий работы, надежности, эргономических условий и др. Прходимость энергетических средств зависит от конструкции движителей, компоновки трактора и агрегатируемой машины, мощности двигателя. Важно при этом обеспечить не только возможность передвижения в разных условиях, а и агроэкологические свойства. Необходимо свести к минимуму повреждаемость почвы и растений. Экономичность зависит от затрат на приобретение и эксплуатацию, от топливной экономичности, степени автоматизации, материалоемкости.

Одним из важнейших факторов при работе агрегатов является согласованность параметров энергетического средства и машины для совместной работы, обеспечение агрегатируемости. Для этого создаются системы машин. Особенностью последних десятилетий являются рост энергонасыщенности энергетических средств [2–4].

Таблица 1. – Эксплуатационные качества, свойства и показатели

Эксплуатационные качества	Эксплуатационные свойства	Показатели эксплуатационных свойств	Единицы измерения
1	2	3	4
Производительность	1. Производительность за 1 ч основного времени	1. Себестоимость единицы производимых работ (интегральный показатель). 2. Рабочие скорости движения на основных операциях. 3. Транспортные скорости. 4. Ширина захвата. 5. Коэффициент использования рабочего времени	руб. м/с м/с м
	2. Энергонасыщенность	1. Единичная эксплуатационная мощность. 2. Удельная энергонасыщенность (энергонасыщенность)	кВт кВт/кН
	3. Агрегатируемость	1. Число и тип рабочих органов. 2. Число и тип основных рабочих орудий. 3. Время перевода в рабочее и транспортное положение. 4. Время переоборудования рабочих органов. 5. Габаритные размеры (длина, ширина, высота)	 с с м
	4. Тягово-сцепные	1. Коэффициент сцепления движителей с опорным основанием. 2. Коэффициент сопротивления качения машины. 3. Коэффициент буксования. 4. Тяговый КПД машины	 %
	5. Устойчивость	1. Предельные статические углы подъема и уклона. 2. Предельный статический уклон поперечного уклона. 3. Предельные углы, преодолеваемые машиной, при движении	 град град град
	6. Управляемость	1. Угол поворота управляемых колес. 2. Минимальный радиус поворота. 3. Угол бокового увода (жесткость шин)	град м град
	7. Надежность	1. Ресурс до капитального ремонта. 2. Нарботка на отказ. 3. Нарботка до отказа определенной группы сложности. 4. Долговечность	ч ч ч ч
	8. Сервисность	1. Приспособляемость конструкции машины к техническому обслуживанию. 2. Число применяемых масел в машине. 3. Ремонтопригодность	
	9. Эргономичность	1. Параметры среды на рабочем месте (максимальная температура воздуха, уровень шума, концентрация пыли, концентрация окиси углерода и токсических газов). 2. Параметры вибрации (средние квадратические значения ускорений на сиденье оператора, скорости на рабочей площадке, скорости на органах управления). 3. Максимальные усилия сопротивления перемещению органов управления движением и технологическим процессом. 4. Освещенность в рабочей зоне	 Н лк
	10. Тормозные и разгонные	1. Путь торможения. 2. Среднее замедление при торможении. 3. Минимальное время торможения. 4. Путь разгона. 5. Среднее ускорение при разгоне. 6. Время разгона	 м м/с ² с м м/с ² с
	11. Унифицированность	1. Коэффициент применимости. 2. Коэффициент повторяемости. 3. Коэффициент межпроектной (взаимной) унификации	

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
	12. Эстетичность	1. Информативность формы. 2. Композиционное совершенство. 3. Гармоничность формы. 4. Совершенство производственного исполнения внешнего вида	
Проходимость	1. Опорно-временные	1. Среднее давление движителей на грунт (почву). 2. Максимальное давление движителей на грунт (почву). 3. Коэффициент смещения центра (у гусеничных машин). 4. Период взаимодействия движителей с грунтом (почвой). 5. Глубина оставленного следа	МПа МПа с м
	2. Тягово-сцепные	1. Коэффициент сцепления движителей с опорным основанием. 2. Коэффициент сопротивления качения машины. 3. Коэффициент буксования. 4. Тяговый КПД машины	%
	3. Конструктивно-дорожные	1. Дорожный просвет, конструкционный и фактический. 2. Профиль и материал днища межгусеничного или межколесного пространства	м
	4. Поворачиваемость	1. Наименьший радиус поворота, при котором не происходит потеря проходимости	м
	5. Агроэкологические	1. Изменение свойств почвы (уплотнение, разрушение структуры, повышение твердости, нарушение водного обмена и др.). 2. Повреждаемость культурных растений	
Экономичность	1. Материалоемкость	1. Масса машины с полным комплектом рабочих органов или приспособлений для выполнения основных технологических операций. 2. Удельная металлоемкость	кг кг/кВт
	2. Топливная экономичность	Удельный расход: – топлива; – электроэнергии	г/(кВт·ч) кВт/ч
	3. Стоимость затрат	1. Суммарные затраты на приобретение машины. 2. Затраты на эксплуатацию машины	руб. руб.
	4. Трудосберегаемость (степень автоматизации и механизации, обеспечиваемая машиной)	1. Число персонала по профессиям, необходимого для обслуживания операций, непосредственно связанных с работой машины. 2. Трудоемкость технического обслуживания. 3. Оперативная трудоемкость монтажа (досборки) и переоборудования машин на месте ее применения	чел. чел.-ч чел.-ч
	5. Энергоиспользование	1. Общий КПД машины. 2. КПД привода рабочих органов. 3. КПД трансмиссии привода ходовой системы	

Энергонасыщенность – один из основных параметров самодвижущейся машины, характеризующих ее функциональное назначение, тип и техническую концепцию. Является комплексным показателем, учитывающим мощность двигателя и массу энергонасыщенных средств. Энергонасыщенность – это отношение эффективной мощности двигателя к весу энергетического средства (кВт (л.с.) / кН). Выделяют эталонную энергонасыщенность трактора (может быть реализована через тяговое усилие трактора) [3]. По данным Г.М. Кутькова, ее значение составляет 1,5 кВт/кН для колесных и 1,4 кВт/кН для гусеничных тракторов [3]. Для тракторов ОАО «МТЗ» классических компоновок значение энергонасыщенности составляет для основных моделей 1,45...2,30 кВт/кН. По мнению П.А. Амельченко, тракторы следует классифицировать по малой ($1,24 \pm 0,18$), средней ($1,6 \pm 0,18$) и высокой ($1,96 \pm 0,18$) энергонасыщенности (кВт/кН) [4]. У отдельных зарубежных моделей энергонасыщенность достигает 2,5...2,6 кВт/кН. Реализация энергонасыщенности, превышающей эталонную для тракторов классической компоновки, как правило, осуществляется через отбор мощности (ВОМ, ГСОМ), использование комбинированных агрегатов.

Для увеличения энергонасыщенности тракторов необходимо уходить от их классических компоновок и создавать мобильные энергосредства, т.е. передавать часть мощности энергосредства на ходовую часть агрегируемых машин, а также их привод. Наиболее известные варианты: увеличение базы и количества колес

тракторов, создание места для размещения на базе трактора технологического оборудования; создание одноосного жесткостыкуемого энергетического модуля, способного работать только с агрегируемыми машинами (это позволяет отказаться от самоходных сельскохозяйственных машин); тягово-энергетические средства с дополнительным ведущим мостом, агрегируемым через навесное устройство; создание энергосредств и системы машин, позволяющих выполнять комплекс операций (скашивание и почвообработка, уборка и посев и др.) [2; 5; 6]. Использование приведенных решений позволяет поднять энергонасыщенность энергосредств до 5 кВт/кН. Более отработанным с участием НАТИ, ЦНИИМЭСХ, ВИМ, БГАТУ является использование привода для дополнительного агрегируемого моста или опорных колес агрегируемых машин.

В связи с появлением дополнительных потребителей при работе энергонасыщенных средств важную роль играет выбор их привода. Наиболее вероятно применение механического (МП), гидрообъемного (ГОП), электрического приводов (ЭП) [7]. Гидромеханический привод отличается наличием гидротрансформатора. Последний значительно снижает КПД. Сравнительная оценка приводов приведена в таблице 2.

Таблица 2. – Сравнительная оценка приводов потребителей МТА

Требования к приводу	Возможность удовлетворения требований различными типами привода		
	МП	ГОП	ЭП
Использование полной мощности первичного двигателя	2	4	4
Приспособленность к режимам рабочих органов	2	5	4
Беступенчатость передачи мощности	2	5	5
Автоматизация регулирования мощности	2	4	5
Дистанционное управление распределением потока мощности по потребителям	2	4	4
Обеспечение максимального диапазона регулирования скорости и тягового усилия	3	5	5
Независимость размещения силовой установки	2	3	5
Свобода компоновки привода рабочих органов	2	4	4
Отбор регулируемой мощности на рабочие органы	2	3	3
Объем (размеры)	4	2	2
Стоимость	5	3	2
То же, %	100	120	125...150
Максимальный КПД трансмиссии	4	3	2
То же, %	90...95	78...90	75...80
Расход дефицитных материалов	5	3	2
Надежность	2	2	3
Расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание	3	2	4
Автоматизация управления машиной	2	4	5
Улучшение условий труда оператора	2	4	5

Примечание: при оценке использованы критерии: 2 – неудовлетворенность; 3 – удовлетворенность; 4 – хорошо; 5 – отлично.

Как видно из таблицы 2, из 17 основных показателей, влияющих на энергоиспользование машин с различными типами привода, механический удовлетворяет 6, гидрообъемный – 16, электрический – 15 требованиям.

Механический привод имеет преимущества по стоимости, КПД, расходу дефицитных материалов. Прогрессирует по возможности автоматизации, свободе компоновки, беступенчатости регулирования, улучшению условий труда. Соответственно по названным показателям лучшие гидрообъемный и электрический привод. Последний более эффективен при большом количестве потребителей, независимости размещения силовой установки, надежности, расходам на эксплуатацию.

Заключение. Основными эксплуатационными качествами тракторов и др. энергетических средств являются производительность, проходимость, экономичность. Оценивая технический уровень машин, следует прежде всего сравнивать показатели их однотипных эксплуатационных свойств и отдавать предпочтение тем машинам, показатели основных свойств которых (при неизменности показателей прочих свойств) выше, чем у аналога-прототипа. Рост энергонасыщенности энергетических средств приводит к необходимости более широкого применения гидрообъемного и электрического привода потребителей мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скотников В.А., Машенский А.А., Солонский А.С. Основы теории и расчета трактора и автомобиля. – М.: Агропромиздат, 1986. – 383 с.
2. Кутыков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 506 с.
3. Кутыков Г.М. Энергонасыщенность и классификация тракторов // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – Т. 76. – № 5. – С. 11–14.

4. Амелеченко П.А., Дубовик Д.А., Жуковский И.Н. Энергонасыщенные тракторы: структура, производство и потребности АПК Беларуси // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2020. – № 3(68). – С. 5–13.
5. Горин Г.С. Тяговая динамика, поворачиваемость и силовые потоки мобильных тягово-энергетических средств. – Минск: БНТУ, 2013. – 374 с.
6. Линкевич Э.И. Многопроцессорные агрегаты на базе МЭС пятого поколения // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – Т. 79. – № 12. – С. 3–13.
7. Скотников В.А., Машенский А.А., Разумовский М.А. Проблемы современного сельскохозяйственного тракторостроения. – Мн.: Высш. шк., 1983. – 208 с.

Поступила 05.07.2026

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MOBILE ENERGY-INDUCED

G. GEDROIT, T. VARFOLOMEEVA, S. ZANEMONSKY
(Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk)
S. RYNKEVICH
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;
Belarusian-Russian University, Mogilev)

This article examines the classification of the performance characteristics of agricultural tractors used in crop production. It also assesses the energy efficiency of tractors, highlighting development trends and the level of energy efficiency for BELARUS tractors. The energy efficiency of modern tractors is constantly increasing. Development is underway on energy sources that utilize engine power through the working parts and chassis of the machines being coupled. The type of drive used plays a key role in realizing the power of high-power tractors. Criteria are presented and mechanical drives for active working parts and chassis components are evaluated. It is shown that the choice of drive type depends on the number of consumers and the performance indicators to be achieved.

Keywords: tractor, performance characteristics, aggregation, transmission, gear.

УДК 629.33:621.3

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-17-25

**ТЕСТЫ ПО ОСОБЕННОСТЯМ КОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ
«ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
И АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ»**

д-р. техн. наук, доц. С.А. РЫНКЕВИЧ
**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;
Белорусско-Российский университет, Могилев)**

Отмечается, что при изучении конструкций механизмов и компонентов электрического транспорта целесообразно применять тестирование, т.е. метод контроля знаний, умений и навыков обучаемых, при котором используются стандартизированные задания для объективной оценки уровня усвоения ими учебного материала. Автором предложены тематические тесты, которые помогают выявить степень усвоения определенных разделов и тем учебной дисциплины «Электрооборудование и силовая электроника электрических и автономных транспортных средств». Предложены иллюстрированные тесты для сложных процессов, что позволяет прогнозировать поведение подсистем и компонентов электрического транспорта в разных условиях, оптимизировать параметры для достижения желаемых характеристик, а также разрабатывать более надежные и эффективные технические решения. Иллюстрированные тесты особенно актуальны при изучении сложных, многогранных процессов, характерных для современной электротехники и электроники. Визуализация помогает студентам лучше понять взаимосвязи между различными компонентами, принципы их работы и особенности функционирования в разнообразных условиях эксплуатации. Это способствует более глубокому и целостному восприятию материала, облегчая трудности, связанные с абстрактностью теоретических положений. Тестирование способствует адаптации будущих специалистов к стремительно меняющимся требованиям отрасли. Обучающиеся, обладающие глубокими теоретическими знаниями и практическими навыками, основанными на объективной оценке, готовы к решению актуальных инженерных задач, содействуя развитию инновационных технологий в области электрического транспорта.

Ключевые слова: электрический транспорт, электромобиль, электробус, тяговый двигатель, аккумуляторная батарея, электрическая энергия, рекуперация, зарядная станция.

Введение. В учебном процессе при анализе технических решений и конструкций механизмов и компонентов электрического транспорта широко используется тестирование, т.е. метод контроля знаний, умений и навыков обучаемых, который предполагает использование стандартизированных заданий и процедур для объективной оценки уровня усвоения ими учебного материала. Тестирование позволяет получить количественные и качественные данные о результатах обучения, а также служит инструментом для корректировки учебного процесса.

Основная часть. Главное преимущество тестирования состоит в возможности проверить знания по широкому кругу вопросов, включая весь курс учебной дисциплины.

Предложенные тесты являются тематическими и помогают выявить степень усвоения определенных разделов и тем учебной дисциплины, а также знаниями и направлены на определение уровня знаний по данной теме.

Часть тестов иллюстрирована и содержит вопросы, характерные для сложных процессов, что позволяет прогнозировать поведение подсистем и компонентов электрического транспорта в разных условиях, оптимизировать параметры для достижения желаемых характеристик, а также разрабатывать более надежные и эффективные технические решения.

Иллюстрированные тесты, предлагаемые в рамках данного подхода, имеют важное значение. Они особенно актуальны при изучении сложных, многогранных процессов, характерных для современной электротехники и электроники. Визуализация помогает студентам лучше понять взаимосвязи между различными компонентами, принципы их работы и особенности функционирования в разнообразных условиях эксплуатации. Это способствует более глубокому и целостному восприятию материала, облегчая трудности, связанные с абстрактностью теоретических положений.

В тестах 1–20 в пяти вариантах ответа лишь один правильный.

Тест 1. Что обозначает цифра 6 в маркировке АКБ 6СТ-192?

1. 6 элементов по 1 вольту.
2. 6 элементов по 2 вольт.
3. 1 элемент по 6 вольт.
4. 2 элемента по 6 вольт.
5. 6 сепараторов.

Тест 2. Экстренное торможение применяют для:

1. Резкого уменьшения скорости движения автомобиля с максимальной для заданных условий интенсивностью.
2. Удержания автомобиля на остановках и стоянках.
3. Уменьшения скорости движения автомобиля с случае отказа рабочей тормозной системы.
4. Плавного уменьшения скорости автомобиля или его остановки в заданном (известном) месте.
5. Равномерного уменьшения скорости движения автомобиля в условиях участков дороги тяжелого профиля.

Тест 3. Служебное торможение применяют для:

1. Удержания автомобиля на спуске.
2. Плавного уменьшения скорости автомобиля или его остановки в заданном (известном) месте.
3. Резкого уменьшения скорости движения автомобиля с максимальной для заданных условий интенсивностью.
4. Удержания автомобиля на остановках и стоянках.
5. Удержания автомобиля на подъеме.

Тест 4. Динамическое торможение двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением можно осуществить следующими способами:

1. Реверсированием, подключением обмотки возбуждения к независимому источнику питания.
2. Самовозбуждением, противовключением, рекуперацией.
3. Реостатным торможением, транзисторным торможением, перекрестным подключением обмотки возбуждения к якору двигателя.
4. Самовозбуждением, подключением обмотки возбуждения к независимому источнику питания.
5. Подключением обмотки возбуждения к зависимому источнику питания.

Тест 5. Достоинствами частотного регулирования скорости движения электробуса с асинхронным приводом являются:

1. Широкий диапазон регулирования скорости, мягкие механические характеристики, малые потери энергии, плавность регулирования.
2. Широкий диапазон регулирования скорости, жесткие механические характеристики, малые потери энергии, плавность регулирования.
3. Заданный диапазон регулирования скорости, жесткие механические характеристики, ступенчатость регулирования.
4. Широкий диапазон регулирования скорости, жесткие механические характеристики, малые потери энергии в шунтирующем резисторе, плавность регулирования.
5. Широкий диапазон регулирования скорости и жесткие механические характеристики.

Тест 6. В тяговую передачу электробуса входят:

1. Тяговый двигатель, карданная передача, центральный редуктор с дифференциалом, полуоси, колесные редукторы.
2. Карданная передача, центральный редуктор с дифференциалом, полуоси, колесные редукторы, колеса.
3. Карданная передача, бортовой редуктор с дифференциалом, полуоси, центральный редуктор.
4. Карданная передача, центральный редуктор, полуоси, колесные или бортовые редукторы.
5. Карданная передача, центральный редуктор, дифференциал, полуоси, колесные или бортовые редукторы.

Тест 7. Режимы работы электромобиля являются:

1. Движение с помощью электродвигателя, торможение с рекуперацией, зарядка от внешнего источника.
2. Движение с помощью электродвигателя, движение на ДВС, электрический ускоритель (E-Boost), торможение с рекуперацией.
3. Движение с помощью электродвигателя, последовательный режим, форсированное ускорение, привод от ДВС, сопряженный привод и зарядка, торможение с рекуперацией, зарядка от внешнего источника.
4. Движение только на ДВС.
5. Движение с рекуперацией энергии.

Тест 8. Тяговая батарея в электромобиле электрически соединяется с блоком силовой электроники посредством:

1. Беспроводной связи.
2. Низковольтных проводов.
3. Высоковольтных проводов.
4. Витой пары.
5. Коаксиального кабеля.

Тест 9. Инвертор в электромобиле предназначен для:

1. Преобразования высокого напряжения тяговой батареи в более низкое напряжение для зарядки 12-вольтовой аккумуляторной батареи бортовой сети.
2. Преобразования переменного тока из электрической сети общего пользования в постоянный ток, потому что для зарядки аккумуляторной батареи может использоваться только постоянный ток.
3. Преобразования напряжения тяговой батареи в трехфазное переменное заданной частоты и амплитуды для управления тяговым двигателем.
4. Сглаживания пульсаций переменного тока.
5. Поддержания постоянной скорости движения.

Тест 10. Укажите наиболее вероятную причину следующей неисправности «Электродвигатель работает, но щетки стеклоочистителя не вращаются»:

1. Окисление или неплотное прилегание контактов концевого выключателя.
2. Поломка зубьев зубчатого колеса редуктора, ослабление соединений в механизме привода.
3. Повреждение реле стеклоочистителя.
4. Залипание контактов датчика температуры охлаждающей жидкости.
5. Короткое замыкание в цепи.

Тест 11. Заряженные и исправные залитые электролитом аккумуляторные батареи:

1. Теряют емкость при длительном хранении вследствие саморазряда.
2. Могут храниться в течение 3 лет без изменения емкости.
3. Могут храниться в течение 5 лет без изменения емкости.
4. Теряют емкость при длительном хранении вследствие механических воздействий.
5. Теряют емкость при подзарядке токами высокой частоты.

Тест 12. Саморазрядом аккумуляторной батареи называют:

1. Короткое замыкание.
2. Кратковременную потерю емкости при коротком замыкании.
3. Равномерную потерю емкости вследствие электролиза воды при заряде батареи.
4. Постепенную потерю емкости при длительном бездействии батареи.
5. Резкую потерю емкости.

Тест 13. Что обозначает цифра 192 в маркировке АКБ 6СТ-192?

1. Количество положительно заряженных пластин.
2. Номинальную емкость батареи в ампер-часах.
3. Рабочую температуру.
4. Температуру кристаллизации.
5. Количество отрицательно заряженных пластин.

Тест 14. Во время рекуперации:

1. Нарушается коммутация тяговых двигателей из-за бросков тока, вызванных толчками напряжения.
2. Нарушается работа тяговых двигателей из-за колебаний напряжения на шинах тяговых подстанций.
3. Тяговые электродвигатели, работающие в генераторном режиме, вырабатывают электроэнергию, возвращаемую обратно в контактную или бортовую тяговую сеть.
4. Тяговые электродвигатели вырабатывают электроэнергию, предназначенную для подзарядки аккумуляторных батарей.
5. Тяговые электродвигатели, работающие в генераторном режиме, вырабатывают электроэнергию, поглощаемую тормозными резисторами.

Тест 15. Тяговый двигатель, как элемент колесного движителя, является электромеханическим преобразователем:

1. Электрической энергии в механическую работу на валу.
2. Электрической энергии в механическую работу на валу или механической работы на валу в электрическую энергию на основе принципа электромагнитной индукции.
3. Энергии топлива в механическую работу на валу.
4. Механической работы на валу в электрическую энергию на основе принципа электромагнитной индукции.
5. И тяговым устройством, преобразующим энергию в механическую работу, совершаемую на тяговых (движущих) колесах.

Тест 16. Батарея емкостных накопителей – это:

1. Комплекс емкостных элементов (суперконденсаторов), служащий для обеспечения троллейбуса электроэнергией.
2. Комплекс емкостных элементов (суперконденсаторов), служащий для обеспечения электромобиля электроэнергией.
3. Комплекс аккумуляторных батарей, служащий для обеспечения электромобиля электроэнергией.
4. Комплекс проводов и кабелей, служащий для подвода электроэнергии в специальные контейнеры.
5. Одна или несколько аккумуляторных батарей.

Тест 17. Емкость и напряжение являются главными параметрами:

1. Генератора.
2. Стартера.
3. Аккумуляторной батареи.
4. Регулятора напряжения.
5. Реле-регулятора.

Тест 18. Генератор обеспечивает:

1. Преобразование электрической энергии в механическую.
2. Преобразование механической энергии в электрическую.
3. Двойное преобразование механической энергии в электрическую и обратно.
4. Преобразование химических реакций в электрическую энергию.
5. Вращение стартера двигателя.

Тест 19. Высоковольтная (тяговая) часть электромотоцикла включает в себя следующие компоненты:

1. Тяговую аккумуляторную батарею; систему управления колесами; инвертор, преобразующий АС батареи в DC для двигателя; тяговый электродвигатель; преобразователи и элементы тяговой сети.
2. Тяговую аккумуляторную батарею; систему управления батареями; высоковольтную коммутационную аппаратуру, инвертор, преобразующий DC батареи в АС для двигателя; тяговый электродвигатель; датчики и компоненты электрической цепи.
3. Тяговую аккумуляторную батарею; систему управления батареями; высоковольтную коммутационную аппаратуру; инвертор, преобразующий DC батареи в АС для двигателя; тяговый электродвигатель; преобразователи и элементы тяговой сети.
4. Тяговую аккумуляторную батарею; систему управления тормозами; инвертор, преобразующий DC батареи в АС для двигателя; бортовой редуктор; преобразователи и элементы тяговой сети.
5. Тяговую аккумуляторную батарею; систему управления; элементы защиты; высоковольтную коммутационную аппаратуру, инвертор, преобразующий АС батареи в DC для двигателя; тяговый электродвигатель, коммутаторы и преобразователи.

Тест 20. Электробусы бывают (выберите наиболее полный ответ):

1. С ночной зарядкой, когда электробус используется для перевозки людей днем, а ночью устанавливается для подзарядки; с быстрой зарядкой, когда электробус пополняет емкость на конечных остановках; с динамической подзарядкой при движении, когда электробус часть пути проезжает на аккумуляторах, а затем используется контакт с проводами; с дополнительными тяговыми аккумуляторами, когда разряженную батарею заменяют полностью заряженным аккумулятором.
2. С ночной зарядкой, когда электробус используется для перевозки людей днем, а ночью устанавливается для подзарядки; с быстрой зарядкой, когда электробус пополняет емкость аккумуляторов в течение дня, совершая поездки по маршруту; с динамической подзарядкой при движении, когда электробус часть пути проезжает на аккумуляторах, а затем используется контакт с проводами; с дополнительными тяговыми аккумуляторами, когда разряженную батарею заменяют полностью заряженным аккумулятором.
3. С ночной зарядкой, когда электробус используется для перевозки людей днем, а ночью устанавливается для подзарядки; с быстрой зарядкой, когда электробус пополняет емкость аккумуляторов в течение дня, совершая поездки по маршруту; с динамической подзарядкой при движении, когда электробус часть пути проезжает на аккумуляторах, а часть пути использует для движения дизельный двигатель; с дополнительными тяговыми аккумуляторами, когда разряженную батарею заменяют полностью заряженным аккумулятором.
4. С ночной зарядкой, когда электробус используется только для ночной перевозки людей, периодически производя подзарядку в специальных транспортных депо; с быстрой зарядкой, когда электробус пополняет емкость аккумуляторов в течение дня, совершая поездки по маршруту; с динамической подзарядкой при движении, когда электробус часть пути проезжает на аккумуляторах, а затем используется контакт с проводами; с дополнительными тяговыми аккумуляторами, когда разряженную батарею заменяют полностью заряженным аккумулятором.
5. С ночной зарядкой, когда электробус используется для перевозки людей днем, а ночью устанавливается для подзарядки; с быстрой зарядкой, когда электробус пополняет емкость аккумуляторов в течение дня, совершая поездки по маршруту; с динамической подзарядкой при движении, когда электробус часть пути проезжает на аккумуляторах, а затем используется контакт с проводами; с дополнительными тяговыми аккумуляторами, когда разряженную батарею подзаряжают на мощных зарядных станциях, используя ее как запасную.

На рисунках представлены схемы, иллюстрирующие конструктивные особенности компонентов электрических транспортных средств.

По рисунку 1

Тест 1.1. Определите способы зарядки электромотоциклов:

1. Зарядка от сети переменного тока повышенной мощности.
2. Зарядка от сети переменного тока без предохранительных приспособлений.
3. Зарядка с применением зарядного кабеля с блоком защиты.

Ответы по каждому тесту следует давать в цифрово-буквенной форме, например 1, а.
Каждый вариант ответа в тестах 1–4, 7 и 9 соответствует только одному изображению.



Рисунок 1. – Способы зарядки электромобиля

По рисунку 2

Тест 2.1. Определите типы разъемов электромобилей и зарядных станций:

1. Тип 1, стандарт SAE J1772, J-PLUG, J-штекер.
2. Разъем Tesla Supercharger.
3. GB/T (GBT) для постоянного и переменного тока.
4. Тип 2, Mennekes (европейский стандарт).
5. CCS Combo.
6. SAE Combo.

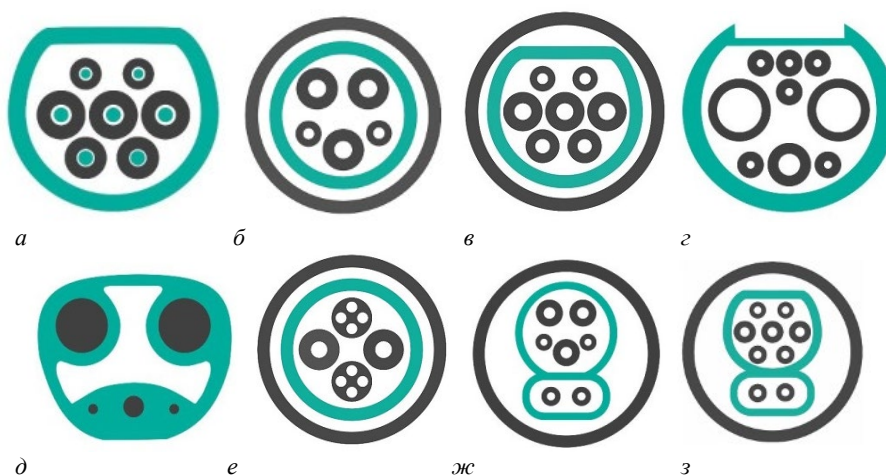


Рисунок 2. – Типы разъемов электромобилей и зарядных станций

По рисунку 3

Тест 3.1. Виды тяговых аккумуляторных батарей:

1. Никель-металлгидридный.
2. Свинцово-кислотный.
3. Литий-железо-фосфатный.
4. Литий-кобальтовый.
5. Литий-ионный.

Тест 3.2. Аккумуляторы, доминирующие на рынке электромобилей:

1. Никель-металлгидридный.
2. Свинцово-кислотный.
3. Литий-железо-фосфатный.
4. Литий-кобальтовый.
5. Литий-ионный.

Тест 3.3. Устаревшим видом аккумулятора является:

1. Никель-металлгидридный.
2. Свинцово-кислотный.
3. Литий-железо-фосфатный.
4. Литий-кобальтовый.
5. Литий-ионный.

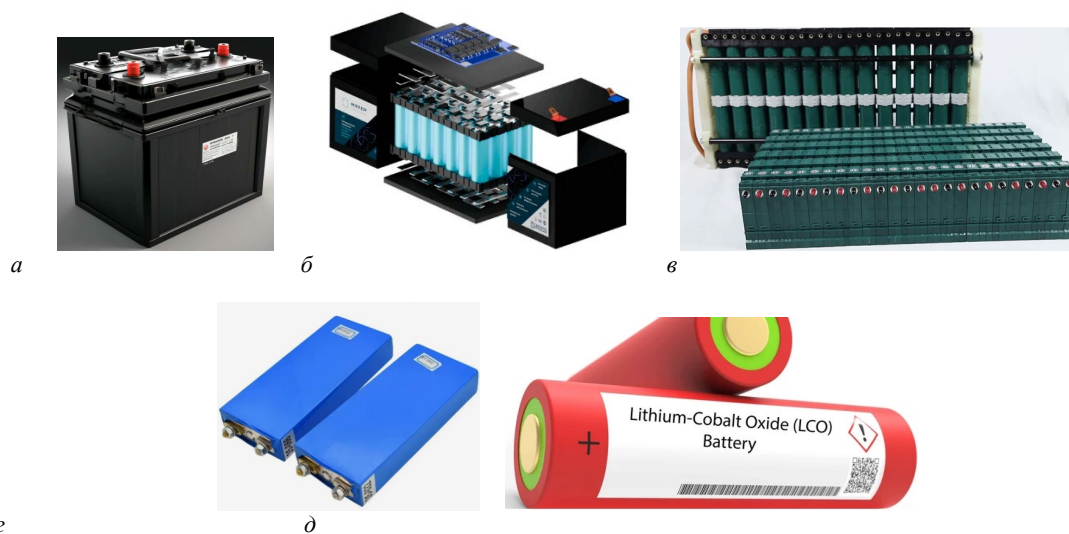


Рисунок 3. – Виды тяговых аккумуляторных батарей

По рисунку 4

Тест 4.1. На рисунке 4 изображены:

1. Синхронный двигатель с постоянными магнитами.
2. Инвертор.
3. Бортовое зарядное устройство.
4. Тяговый аккумуляторный модуль.
5. Асинхронный двигатель.

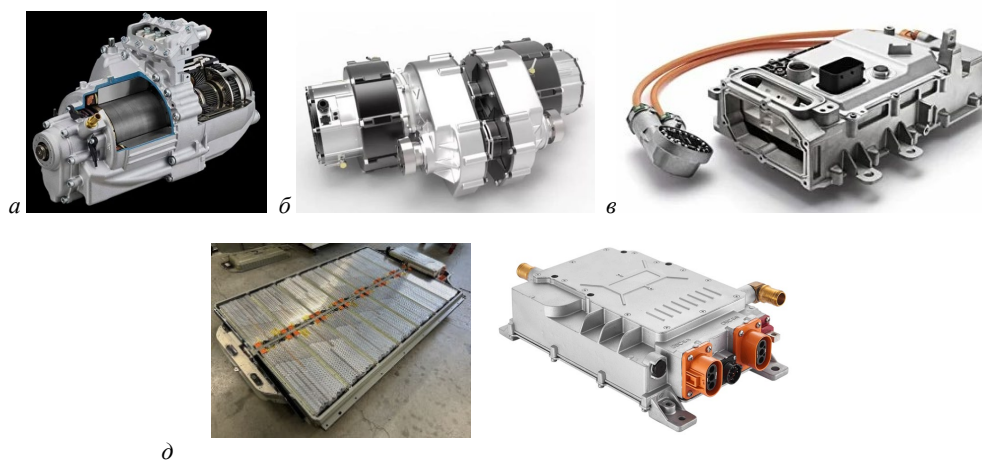


Рисунок 4. – Компоненты электромобиля

По рисунку 5

Тест 5.1. Выберите правильное утверждение:

1. При подключении зарядки для электромобиля контроллер машины определяет допустимый ток; зарядное устройство подает энергию в соответствии с этими параметрами; по мере наполнения батареи мощность постепенно снижается, чтобы избежать перегрева.
2. При подключении зарядки для электромобиля контроллер машины определяет допустимый ток; зарядное устройство подает энергию в соответствии с этими параметрами; по мере наполнения батареи мощность постепенно увеличивается.
3. При подключении зарядки для электромобиля контроллер машины определяет максимальный ток; зарядное устройство подает энергию в соответствии с этими параметрами; по мере наполнения батареи сила тока регулируется, чтобы обеспечить максимальную мощность.

Тест 5.2. Любая зарядка электромобиля предназначена для:

1. Передачи электрической энергии от источника (розетки, станции или сети) к тяговой аккумуляторной батарее машины, т.е. пополнения ее заряда.
2. Обратного преобразования кинетической энергии движения в электрическую.
3. Преобразования переменного тока в постоянный через инвертор и его поступления в батарею.

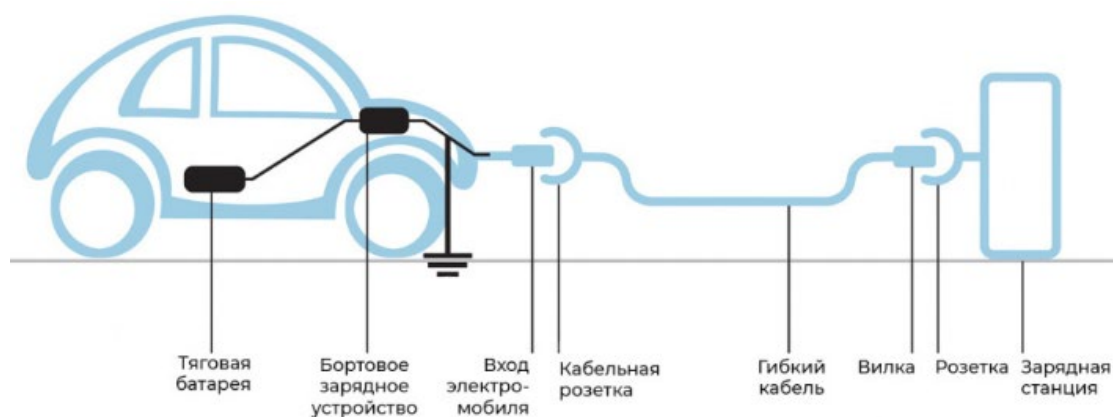


Рисунок 5. – Схема процесса зарядки электромобиля

По рисунку 6

Тест 6.1. В состав аккумуляторного электромобиля входят:

1. Зарядный кабель, система управления, тяговый электродвигатель.
2. Зарядное гнездо, инвертор, тяговый электродвигатель.
3. Аккумуляторная батарея, тяговый электродвигатель, зарядный разъем.
4. Зарядное устройство, аккумуляторная батарея, бортовой редуктор.
5. Аккумуляторная батарея, преобразователь постоянного тока, стартер.

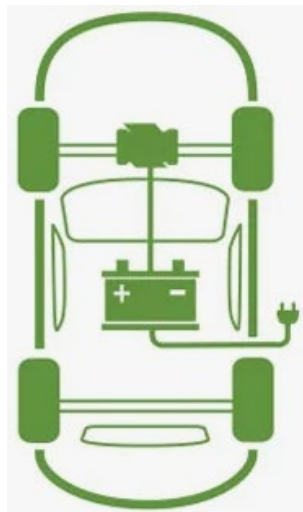


Рисунок 6. – Схема аккумуляторного электромобиля

По рисунку 7

Тест 7.1. В состав электромобиля входят:

1. Зарядка второго уровня обычно устанавливается в частных домах, рабочих местах и общественной инфраструктуре. Предлагая от 6 до 19,2 кВт мощности, он подходит для ночной зарядки дома или во время длительных остановок на общественных зарядных станциях.
2. Быстрая зарядка третьего уровня, также известная как DC Fast Charging, является самым быстрым типом зарядки, доступным на сегодня. С мощностью от 50 кВт до более чем 350 кВт он быстро подает постоянный ток прямо на аккумулятор.
3. Зарядка первого уровня для электромобилей обеспечивает от 1,4 до 2 кВт мощности и не требует дополнительной установки, при этом подключается напрямую к стандартной настенной розетке.
4. Зарядка для электромобилей, которая обеспечивает от 1,4 до 2 кВт мощности и при этом подключается к настенной коробке.

Тест 7.2. Время зарядки электромобиля:

1. 8–14 ч.
2. 4–10 ч.
3. 4–5 ч.
4. 40–80 мин.

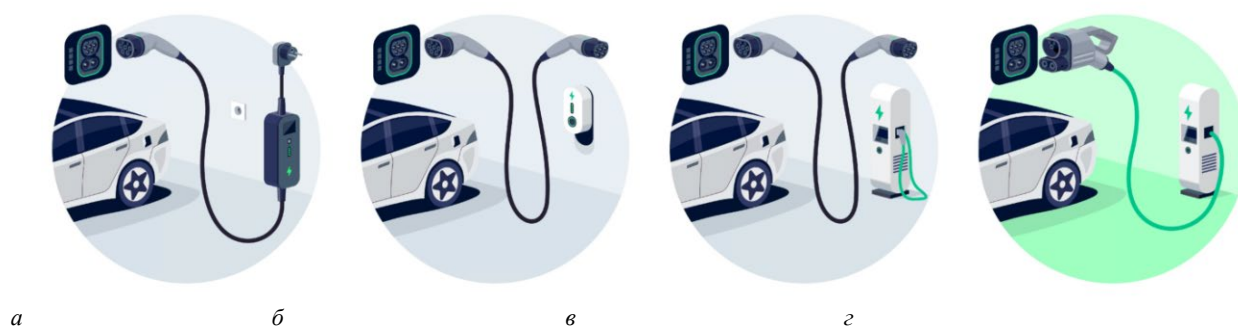


Рисунок 7. – Уровни зарядки электромобиля

По рисунку 8

Тест 8.1. Выберите правильное утверждение:

1. Электросеть подает постоянный ток, величина которого корректируется инвертором и затем подается в аккумулятор электромобиля.

2. Электросеть подает переменный ток, но аккумулятор электромобиля нуждается в постоянном токе. Преобразование переменного тока в постоянный может осуществляться в автомобиле или в пункте зарядки.

3. Электросеть подает переменный ток, но аккумулятор электромобиля нуждается в постоянном токе. Для преобразования переменного тока в постоянный используются диодные выпрямители.

Тест 8.2. Выберите правильное утверждение:

1. Зарядная станция переменного тока подает переменный ток из сети на электромобиль, который затем без преобразования подается с помощью бортового зарядного устройства для зарядки тяговой батареи.

2. Зарядная станция переменного тока подает переменный ток из сети на электромобиль, который затем преобразуется в постоянный ток с помощью бортового зарядного устройства для зарядки тяговой батареи.

3. Зарядная станция переменного тока преобразует переменный ток в постоянный встроенным в нее выпрямителем и подает постоянный ток на электромобиль, который затем используется для зарядки автомобиля.

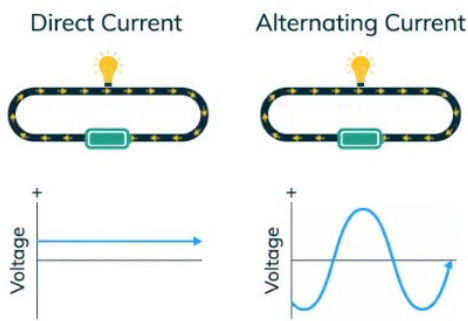


Рисунок 8. – Постоянный (DC) и переменный ток (AC)

По рисунку 9

Тест 9.1. Способы зарядки электромобилей:

1. Концепция зарядки электромобиля от солнечной панели.

2. Зарядка от зарядной станции.

3. Беспроводная зарядка электромобилей.

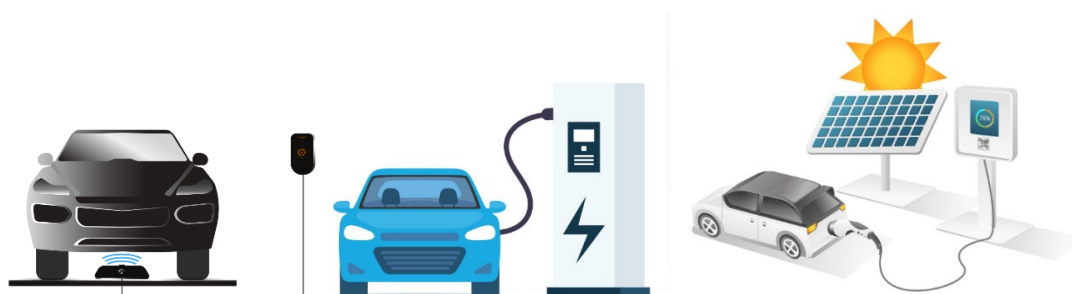


Рисунок 9. – Способы зарядки электромобиля

По рисунку 10

Тест 10.1. Бортовое зарядное устройство устанавливается:

1. Снаружи электромобиля, обычно на зарядных станциях.
2. Внутри электромобиля.
3. Как снаружи, так и внутри электромобиля.

Тест 10.2. Зарядное устройство устанавливается:

1. Снаружи электромобиля, обычно на зарядных станциях.
2. Внутри электромобиля.
3. Как снаружи, так и внутри электромобиля.

Тест 10.3. Выберите правильное утверждение:

1. Источником питания бортового зарядного устройства является переменный ток, преобразованный на борту в постоянный, а у зарядного устройства происходит внешнее преобразование AC в DC.
2. Источником питания бортового зарядного устройства является только постоянный ток, а у зарядного устройства возможно внешнее преобразование AC в DC.
3. Источником питания бортового зарядного устройства является переменный ток, преобразованный на борту в постоянный, а у зарядного устройства преобразования AC в DC не происходит.

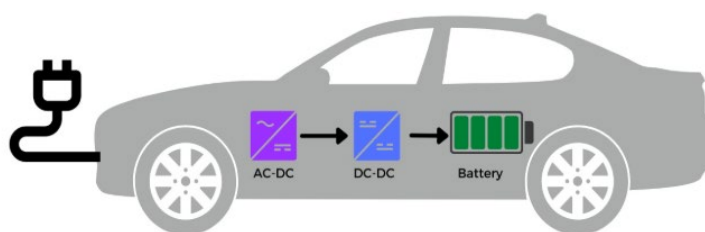


Рисунок 10. – Источники питания бортового зарядного устройства

Заключение. Предложенные тесты тематической направленности дают возможность проверить знания студентов по широкому кругу вопросов, включая как весь курс учебной дисциплины «Электрооборудование и силовая электроника электрических и автономных транспортных средств», так и отдельные ее разделы. Внедрение таких подходов в учебный процесс не только повышает качество подготовки специалистов, но и способствует их адаптации к стремительно меняющимся требованиям отрасли. Обучающиеся, обладающие глубокими теоретическими знаниями и практическими навыками, основанными на объективной оценке, готовы к решению актуальных инженерных задач и внесению значимого вклада в развитие инновационных технологий в области электрического транспорта.

Поступила 05.07.2026

TESTS ON THE FEATURES OF DESIGN AND OPERATION OF ELECTRIC TRANSPORT WHEN STUDYING THE DISCIPLINE «ELECTRICAL EQUIPMENT AND POWER ELECTRONICS OF ELECTRIC AND AUTONOMOUS VEHICLES»

S. RYNKEVICH

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

It is noted that when studying the design of electric vehicle mechanisms and components, it is advisable to use testing – that is, a method for assessing students' knowledge, skills, and abilities, using standardized tasks to objectively assess their mastery of the educational material. The author proposes thematic tests that help determine the degree of mastery of specific sections and topics in the course "Electrical Equipment and Power Electronics of Electric and Autonomous Vehicles." Illustrated tests are provided that are characteristic of complex processes, allowing for the prediction of the behavior of electric vehicle subsystems and components under various conditions, optimization of parameters to achieve desired characteristics, and the development of more reliable and efficient technical solutions. Illustrated tests are especially relevant when studying the complex, multifaceted processes characteristic of modern electrical engineering and electronics. Visualization helps students better understand the relationships between various components, their operating principles, and the specific features of their functioning under a variety of operating conditions. This promotes a deeper and more holistic understanding of the material, overcoming the difficulties associated with abstract theoretical concepts. Testing helps future specialists adapt to rapidly changing industry requirements. Students with deep theoretical knowledge and practical skills based on objective assessment are prepared to solve current engineering problems and make a significant contribution to the development of innovative technologies in electric transport.

Keywords: *Electric transport, electric car, electric bus, traction motor, battery, electric energy, recuperation, charging station.*

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПО АКУСТИЧЕСКОМУ СИГНАЛУ

*канд. техн. наук, доц. А.Н. ПАРФИЕВИЧ, В.А. СОКОЛ, Б.С. ДАРЧИЧ
(Брестский государственный технический университет)*

Представлены результаты экспериментальных исследований акустического сигнала цилиндрического трехступенчатого редуктора с зубчатыми колесами, имеющими различные виды термической обработки (объемная закалка, закалка ТВЧ, закалка с высоким отпускком) и моделированные локальные дефекты зубьев (отсутствие 25, 50, 75% длины зуба, полное отсутствие зуба). Обоснована необходимость перехода от качественного спектрального анализа к количественным интегральным диагностическим показателям. Предложены и апробированы два относительных показателя: K_z – отношение суммы амплитуд кратных зубцовых гармоник анализируемого колеса к эталонным значениям, отражающий энергию ударных процессов; и K_{bn} – отношение суммы амплитуд боковых полос (комбинационных составляющих) к эталонным значениям, характеризующий глубину модуляции зубцовой частоты. Показано, что совместное использование K_z и K_{bn} позволяет надежно выявлять локальные дефекты на ранних стадиях, дифференцировать их степень тяжести и исключать ложные срабатывания. Установлено влияние термической обработки на спектральные характеристики сигнала, которое нивелируется за счет относительности предложенных показателей. Разработанная методика автоматизирует процесс диагностики, снижает трудоемкость и может быть интегрирована в системы прогнозного обслуживания промышленного оборудования.

Ключевые слова: акустическая диагностика, зубчатые передачи, локальные дефекты зубьев, интегральные показатели, спектральный анализ, боковые полосы, зубцовая частота, термическая обработка, автоматизация мониторинга, многовальный привод.

Введение. Диагностирование зубчатых передач является одной из ключевых задач технического обслуживания современного промышленного оборудования, поскольку именно эти узлы в значительной степени определяют надежность и ресурс машин. Среди методов контроля наибольшее распространение получил акустический (вибрационный) анализ, позволяющий выявлять дефекты на ранних стадиях их развития. Однако традиционные подходы, основанные на оценке абсолютных амплитуд спектральных составляющих или энергетических характеристик сигнала, обладают ограниченной чувствительностью к начальным стадиям повреждений, не позволяют однозначно локализовать источник дефекта в многовальных приводах и требуют высокой квалификации эксперта. Кроме того, на акустический сигнал существенное влияние оказывают технологические факторы, в частности, вид термической обработки зубчатых колес, что затрудняет создание универсальных диагностических критериев.

В связи с этим актуальной является разработка интегральных диагностических показателей, которые, с одной стороны, обобщали бы ключевую информацию, содержащуюся в спектре, а с другой – нивелировали влияние переменных условий эксплуатации и конструктивно-технологических особенностей. Переход от качественного анализа спектральных «ландшафтов» к количественной оценке состояния по ограниченному набору относительных коэффициентов позволяет формализовать процедуру диагностики, автоматизировать ее и снизить требования к квалификации обслуживающего персонала.

Целью настоящей работы является экспериментальное обоснование интегральных диагностических показателей K_z и K_{bn} для оценки локальных дефектов зубчатых колес на основе анализа акустического сигнала, а также исследование влияния термической обработки на информативность данных показателей. В задачи исследования входили: проведение стендовых испытаний редуктора с зубчатыми колесами, имеющими различные виды термической обработки и моделированные дефекты; выделение информативных частотных составляющих; разработка алгоритма автоматизированного расчета показателей; оценка их чувствительности и устойчивости к различным степеням повреждения. Практическая значимость работы заключается в создании методики, пригодной для интеграции в системы прогнозного обслуживания промышленного оборудования.

Объект и условия испытаний. Предметом испытаний являлся акустический шум, возникающий при работе зубчатых передач. Для проведения измерений использовался цилиндрический трехступенчатый редуктор с технически исправными подшипниковыми опорами (рисунок 1). Кинематическая схема исследуемого участка приведена на рисунке 2.

Для оценки эффективности компьютерной системы диагностирования многовального зубчатого привода были изготовлены экспериментальные зубчатые колеса ($z = 44$, $m = 3$ мм) с различной твердостью:

- 1) закалка с высоким отпускком (HB 250...320);
- 2) закалка зубьев ТВЧ (глубина 0,8...1,2 мм, HRC 48...52);
- 3) объемная закалка (HRC 48...52).



Рисунок 1. – Общий вид диагностируемого редуктора и используемого ленточного тормоза

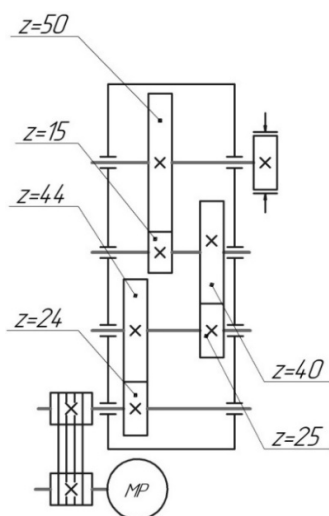


Рисунок 2. – Кинематическая схема диагностируемого цилиндрического трехступенчатого редуктора

На колесах моделировались отклонения от нормального технического состояния: локальный дефект зуба различной степени развитости (отсутствие 25, 50, 75% длины зуба) и полное отсутствие зуба (рисунок 3). Испытания проводились как без нагрузки, так и под нагрузкой, создаваемой ленточным тормозом через систему рычагов и грузов. Для повышения коэффициента трения на рабочую поверхность ленты была закреплена накладка из фрикционного материала.



Рисунок 3. – Локальный дефект в 25% от длины зубчатого венца экспериментального зубчатого колеса $z = 44$

Основная часть. Анализ полученных спектров акустического сигнала показал наличие составляющих, соответствующих работе всех элементов привода [1–3]:

- в области низких частот наблюдаются оборотные f_0 и кратные им составляющие всех валов кинематической цепи;
- в области пересопряжения зубьев наблюдаются зубцовые f_z , кратные им составляющие целого ряда зубчатых колес, а также другие частотные составляющие, которые могут иметь значение для диагностических целей, например, на комбинированных частотах $m \cdot f_z \pm k \cdot f_0$.

Традиционные методы, основанные на анализе абсолютных величин спектральных составляющих, недостаточно чувствительны к начальным стадиям дефектов, субъективны и трудоемки. В связи с этим обоснована необходимость разработки интегральных диагностических признаков, которые суммарно отражали бы изменения сигнала, связанные с появлением и развитием дефектов в зоне зацепления, и позволили формализовать процедуру диагностирования.

Одним из самых распространенных типов интегральных показателей являются энергетические и статистические величины, рассчитываемые во временной области. К ним относятся:

- среднеквадратическое значение (RMS) – классический показатель общего уровня вибрации/акустического шума, отражающий среднюю энергию сигнала;
- коэффициент асимметрии (Skewness) и коэффициент островеершинности (Kurtosis) – показатели формы распределения сигнала. Kurtosis особенно чувствителен к импульсным компонентам, что делает его эффективным для раннего обнаружения локальных повреждений типа сколов и трещин [4];
- интеграл модуля скорости – стандартизированный показатель, используемый для оценки общего состояния подшипников и редукторов по стандартам ISO (ISO 10816)¹.

Эти показатели просты в расчете и широко используются в системах мониторинга состояния (Condition Monitoring). Однако их главный недостаток заключается в том, что они не позволяют точно локализовать источник дефекта в сложной многоступенчатой передаче, поскольку интегрируют энергию всего сигнала.

Для преодоления ограничений энергетических показателей может быть предложен метод анализа огибающей (демодуляции). Он позволяет выделить высокочастотные колебания, модулированные низкочастотными сигналами, вызванными периодическими ударами при прохождении дефекта через зону зацепления. На основе этого метода формируются интегральные показатели, такие как уровень огибающей (Envelope Level) или интеграл огибающей, представляющий собой площадь под кривой огибающего спектра в определенной полосе частот. Эти показатели обладают высокой чувствительностью к начальным стадиям повреждений и позволяют более точно определить частоту повторения ударов, соответствующую конкретному зубчатому колесу [5].

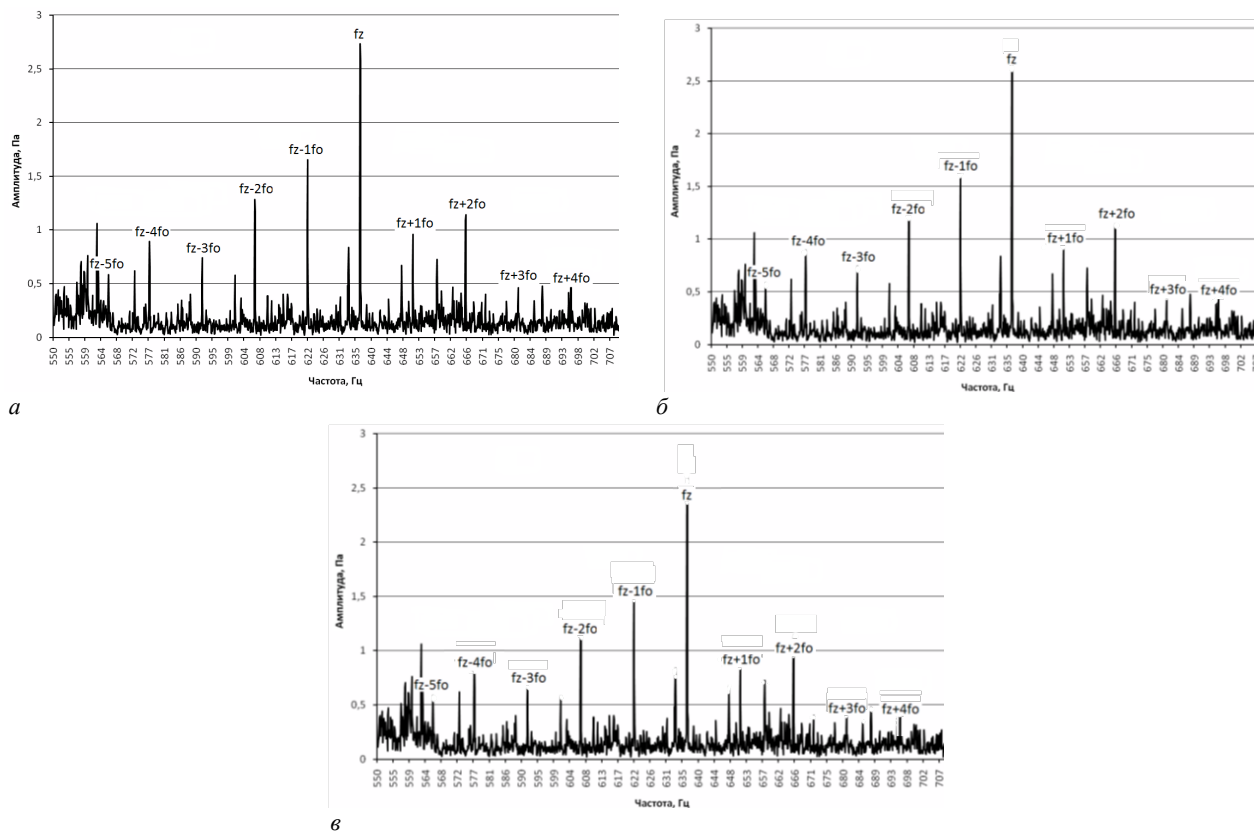
Показатели на основе спектрального анализа формируются на основе представления акустического сигнала в виде спектра посредством преобразования Фурье. Их ключевая особенность – привязка к физически значимым частотам, характерным для процесса зацепления зубьев, что обеспечивает более высокую информативность и локализуемость дефектов по сравнению с временными характеристиками:

- полосовой энергией: суммарной энергией (или среднеквадратическое значение амплитуд) в заданной полосе частот, например, вокруг частоты зацепления f_z или ее гармоник;
- амплитудой боковых полос: появление локального дефекта вызывает модуляцию амплитуды и/или частоты сигнала зацепления, что приводит к появлению боковых полос вокруг f_z , $2f_z$ и т.д. Интегральные показатели могут представлять собой сумму амплитуд этих боковых полос или отношение энергии боковых полос к энергии центральной частоты зацепления [6]. Такие показатели являются прямым признаком наличия локального дефекта;
- коэффициентами гармонического состава: отношением амплитуды первой гармоники к сумме амплитуд всех гармоник или соотношениями между амплитудами различных гармоник. Изменение этих соотношений указывает на изменение характера зацепления.

Современные исследования направлены на создание показателей, которые были бы не только чувствительными, но и сравнимыми между разными условиями эксплуатации и разными машинами. Для этого все чаще применяются нормированные относительные показатели. Идея заключается в сравнении текущих характеристик с эталонными (базовыми), полученными для исправного состояния того же самого оборудования. Это позволяет исключить влияние переменных факторов, таких как нагрузка и скорость вращения.

В ходе собственных экспериментальных исследований установлено, что на спектре акустического сигнала можно выявить зубцовую частоту f_z и четыре кратные ей гармоники, оборотную частоту f_0 и четыре кратные ей гармоники, а также пять комбинационных частот $m \cdot f_z \pm k \cdot f_0$ по обе стороны от f_z и $m \cdot f_z$, которые несут важную диагностическую информацию (рисунок 4).

¹ ISO 10816-3:2009. Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min. – Geneva: ISO, 2009. – 24 p.



a – фрагмент спектра акустического сигнала в области частот $(f_z - k \cdot f_0) - (f_z + k \cdot f_0)$ исследуемой шестерни (объемная закалка до твердости HRC 48...52); ***б*** – фрагмент спектра акустического сигнала в области частот $(f_z - k \cdot f_0) - (f_z + k \cdot f_0)$ исследуемой шестерни (закалка зубьев ТВЧ на глубину $h = 0,8...1,2$ мм до твердости HRC 48...52); ***в*** – фрагмент спектра акустического сигнала в области частот $(f_z - k \cdot f_0) - (f_z + k \cdot f_0)$ исследуемой шестерни (закалка с высоким отпуском до твердости HB = 250...320)

Рисунок 4. – Спектр акустического сигнала многозубчатого привода и результат его обработки программными средствами комплекса «ВИКМА»

Влияние термической обработки на акустическую активность в зоне зубозацепления определяется следующими изменяющимися физико-механическими свойствами материала:

1. Твердость и модуль упругости: объемная закалка значительно увеличивает поверхностную и внутреннюю твердость, что приводит к росту модуля упругости (модуля Юнга) материала [7]. Контакт зубьев при входе в зацепление становится более кратковременным и упругим, минимизируя пластические деформации. Энергия удара, которая в менее твердом материале частично поглощается за счет микропластичности, в закаленной шестерне почти полностью переизлучается в виде высокоэнергетической акустической волны.

2. Структура материала и демпфирование: объемная закалка создает структуру мартенсита, обладающую низкими демпфирующими свойствами [8]. Напротив, цементация и азотирование формируют на поверхности слой с высокими остаточными напряжениями сжатия и особой мелкозернистой структурой. Такие слои способны эффективнее поглощать микровибрации и демпфировать ударное воздействие за счет диссипации энергии движением дислокаций и микротрением в границах мелких зерен.

3. Геометрия зоны контакта: термообработка, особенно цементация и азотирование, может приводить к незначительным, но критичным изменениям геометрии зуба (например, вследствие коробления) [9]. Это изменяет кинематику зацепления, точку приложения и характер распределения контактных напряжений, что, в свою очередь, модулирует акустический сигнал.

Эти изменения физико-механических свойств материала напрямую влияют на структуру спектра акустического сигнала. Для шестерен с объемной закалкой характерны ярко выраженная высокоамплитудная гармоника f_z и резкое убывание боковых полос, что является следствием почти идеально упругого контакта [7; 8]. Для цементированных и азотированных колес, напротив, наблюдается снижение амплитуды f_z (часть энергии рассеивается в материале) и более равномерное распределение боковых полос, что связано с нелинейным взаимодействием, включающим микропроскальзывание и упругопластический контакт [6; 9].

Вручную определять значения характерных частотных составляющих для каждого зубчатого колеса – задача трудоемкая. С целью автоматизации этого процесса в программной части комплекса была разработана

и реализована функция «Анализ гармоник», позволяющая автоматически получать значения частот и амплитуд оборотных и зубцовых компонент спектров, а также их кратных гармоник и комбинационных составляющих. На основе полученных данных предложены два интегральных показателя для оценки состояния рабочей поверхности зубьев и нивелирования влияния термической обработки:

- показатель K_z :

$$K_z = \frac{\sum_{i=1}^5 A(f_{zi})}{\sum_{i=1}^5 A(f_{zi})_{эм}},$$

где $A(f)$ – амплитуда колебаний на частоте f ; f_{zi} и $f_{zi эм}$ – i -я зубцовая частота анализируемого зубчатого колеса и колеса без дефектов соответственно.

Показатель отражает энергию высокочастотных ударов при входе зубьев в зацепление. Рост K_z свидетельствует о появлении локального дефекта, усиливающего ударные импульсы;

- показатель $K_{\delta n}$:

$$K_{\delta n} = \frac{\sum_{n=-5}^5 A(f_{zi} \pm n f_o)}{\sum_{n=-5}^5 A(f_{zi} \pm n f_o)_{эм}},$$

где $A(f_{zi} \pm n f_o)$ – амплитуды комбинационных частот анализируемого колеса; $A(f_{zi} \pm n f_o)_{эм}$ – амплитуды комбинационных частот колеса без дефектов.

Показатель характеризует глубину амплитудной и фазовой модуляции зубцовой частоты, вызванной периодическим возмущением от дефектного зуба. Рост $K_{\delta n}$ указывает на усиление модуляционного эффекта.

При отсутствии повреждений в спектре наблюдаются преимущественно зубцовые гармоники $m f_{zi}$, амплитуды комбинационных составляющих незначительны. По мере возникновения и развития локального повреждения зуба энергия, рассеиваемая в зоне контакта, возрастает, что приводит к увеличению амплитуд как зубцовых, так и комбинационных гармоник.

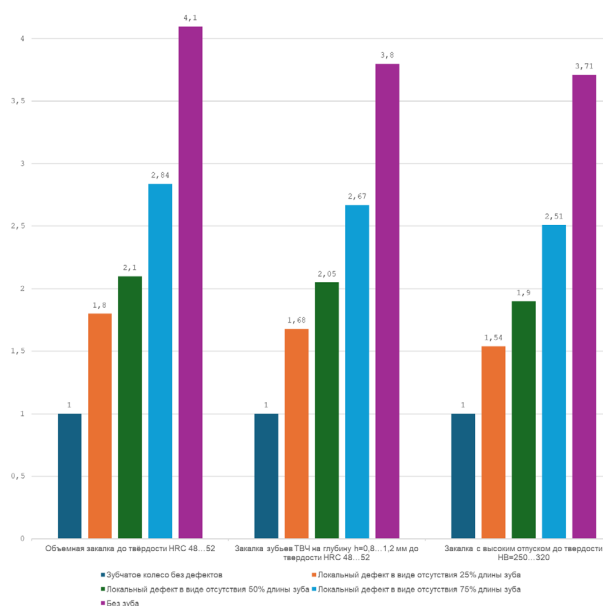
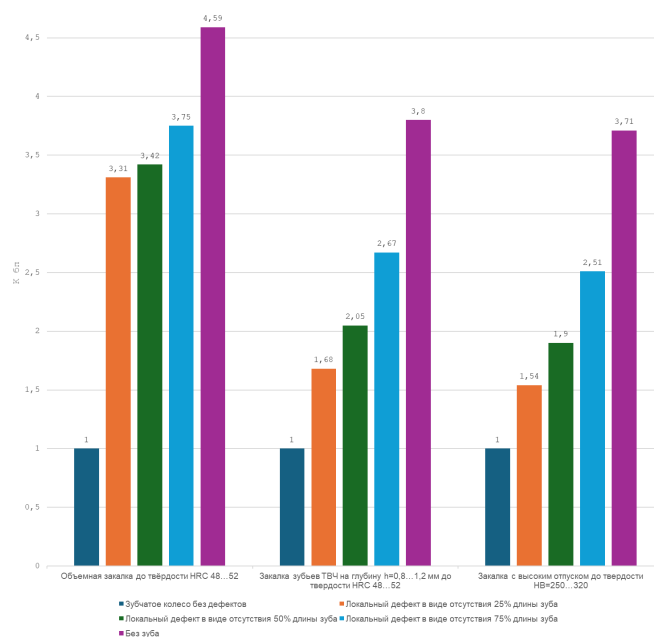
В таблицах 1 и 2 представлены значения K_z и $K_{\delta n}$ для различных видов термообработки и степеней повреждения. Диаграммы изменений показателей (рисунки 5 и 6) демонстрируют устойчивые тренды.

Таблица 1. – Величины K_z спектра акустического сигнала для колеса $z = 44$

Диагностируемое зубчатое колесо	Объемная закалка до твердости HRC 48...52	Закалка зубьев ТВЧ на глубину $h = 0,8...1,2$ мм до твердости HRC 48...52	Закалка с высоким отпуском до твердости HB = 250...320
Зубчатое колесо без дефектов	1,0	1,0	1,0
Локальный дефект в виде отсутствия 25% длины зуба	1,8	1,68	1,54
Локальный дефект в виде отсутствия 50% длины зуба	2,1	2,05	1,9
Локальный дефект в виде отсутствия 75% длины зуба	2,84	2,67	2,51
Без зуба	4,1	3,8	3,71

Таблица 2. – Величины $K_{\delta n}$ спектра акустического сигнала для колеса $z = 44$

Диагностируемое зубчатое колесо	Объемная закалка до твердости HRC 48...52	Закалка зубьев ТВЧ на глубину $h = 0,8...1,2$ мм до твердости HRC 48...52	Закалка с высоким отпуском до твердости HB = 250...320
Зубчатое колесо без дефектов	1,0	1,0	1,0
Локальный дефект в виде отсутствия 25% длины зуба	3,31	1,68	1,54
Локальный дефект в виде отсутствия 50% длины зуба	3,42	2,05	1,9
Локальный дефект в виде отсутствия 75% длины зуба	3,75	2,67	2,51
Без зуба	4,59	3,8	3,71

Рисунок 5. – Диаграмма изменения показателя K_z для колеса $z = 44$ Рисунок 6. – Диаграмма изменения показателя K_{bn} для колеса $z = 44$

Закключение. В результате выполнения экспериментальных исследований акустического сигнала цилиндрического трехступенчатого редуктора с зубчатыми колесами, имеющими различные виды термической обработки и моделированные локальные дефекты, были получены данные, позволившие обосновать и разработать новый подход к диагностированию зубчатых передач на основе интегральных показателей. Традиционные методы анализа, ориентированные на абсолютные амплитуды спектральных составляющих или энергетические характеристики сигнала, обладают недостаточной чувствительностью к начальным стадиям повреждений, не позволяют однозначно локализовать дефект в многовальных приводах и требуют высокой квалификации эксперта. Предложенный в работе подход направлен на преодоление указанных ограничений путем перехода от качественной интерпретации спектральных «ландшафтов» к количественной оценке состояния по ограниченному набору относительных коэффициентов.

На основе анализа физических процессов, сопровождающих работу зубчатого зацепления, были выделены две ключевые группы спектральных составляющих, чувствительных к появлению локальных дефектов: кратные зубцовые гармоники $m f_{zi}$, отражающие энергию высокочастотных ударных импульсов, и комбинационные составляющие $f_{zi} \pm n f_o$, характеризующие глубину амплитудной и фазовой модуляций сигнала вращением

дефектного колеса. Для количественного выражения этих явлений разработаны два интегральных показателя: K_z – отношение суммы амплитуд кратных зубцовых гармоник анализируемого колеса к эталонным значениям; $K_{\delta n}$ – отношение суммы амплитуд боковых полос к эталонным значениям. Оба показателя являются относительными, что позволяет нивелировать влияние переменных эксплуатационных факторов (нагрузки, скорости) и технологических особенностей (вида термической обработки). Экспериментально подтверждено, что показатель K_z монотонно возрастает с увеличением степени локального повреждения зуба (от отсутствия 25% длины зуба до полного удаления зуба) для всех исследованных видов термической обработки, демонстрируя четкую корреляцию с энергией ударного процесса. Показатель $K_{\delta n}$ обладает более высокой чувствительностью к начальным стадиям дефектов, что делает его особенно ценным для раннего обнаружения зарождающихся повреждений (например, при дефекте 25% для объемной закалки $K_z = 1,8$, а $K_{\delta n} = 3,31$). Совместное применение обоих показателей обеспечивает перекрестную валидацию диагноза: синхронный рост K_z и $K_{\delta n}$ однозначно указывает на локальный дефект конкретного зуба, тогда как изолированный рост одного из показателей позволяет отличить дефект от помех (например, общего увеличения нагрузки или биения вала).

В работе также исследовано влияние термической обработки на акустическую активность зубчатых колес. Установлено, что различия в твердости, структуре материала и геометрии зуба, обусловленные технологическими процессами (объемная закалка, закалка ТВЧ, цементация, азотирование), приводят к изменению абсолютных амплитуд и характера распределения спектральных составляющих. Однако предложенные относительные показатели K_z и $K_{\delta n}$ в значительной степени компенсируют эти различия за счет нормирования на эталонное состояние того же колеса, что подтверждается наличием четких и сопоставимых трендов во всех исследованных группах.

Разработанная методика автоматизирована путем внедрения в программный комплекс функции «Анализ гармоник», позволяющей автоматически выделять характерные частоты и рассчитывать значения показателей. Это резко сокращает время анализа, исключает субъективность и снижает квалификационные требования к персоналу, осуществляющему рутинный контроль. Применение двух компактных числовых параметров вместо полного спектрального анализа открывает возможности для интеграции методики в промышленные системы прогнозного обслуживания (Condition Monitoring), где требуется формализованный и алгоритмизируемый подход к оценке состояния оборудования.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанные интегральные показатели K_z и $K_{\delta n}$ являются информативными, чувствительными и устойчивыми диагностическими признаками локальных дефектов зубчатых колес, отражающими энергетические и модуляционные аспекты процесса зацепления.

2. Предложенные показатели, благодаря своей относительной природе, обеспечивают сопоставимость результатов при различных режимах нагружения, скоростях вращения и видах термической обработки, что расширяет область их применения.

3. Комплексное использование K_z и $K_{\delta n}$ позволяет не только выявлять дефекты на ранних стадиях, но и дифференцировать степень их тяжести, а также исключать ложные срабатывания, что повышает надежность диагностики.

4. Автоматизация расчета показателей и переход от качественного анализа спектров к количественной оценке по двум параметрам создают предпосылки для создания эффективных систем автоматического мониторинга технического состояния зубчатых передач.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение базы экспериментальных данных для различных типов редукторов, уточнение пороговых значений показателей для практического применения, а также на разработку методов прогнозирования остаточного ресурса на основе динамики изменения K_z и $K_{\delta n}$. Полученные результаты имеют практическую ценность для машиностроительных предприятий, эксплуатирующих сложное оборудование с зубчатыми передачами, и могут быть использованы при создании систем технического диагностирования и прогнозного обслуживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Randall R. B. Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. – Chichester: Wiley, 2011. – 308 p.
2. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 156 с.
3. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
4. Dyer D., Stewart R. M. Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis // Journal of Mechanical Design. – 1978. – Vol. 100, No. 2. – P. 229–235. DOI: 10.1115/1.3453905
5. McFadden P. D., Smith J. D. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing // Journal of Sound and Vibration. – 1984. – Vol. 96, Iss. 1. – P. 69–82. DOI: 10.1016/0022-460X(84)90595-9
6. Dalpiaz G., Rivola A., Rubini R. Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2000. – Vol. 14, Iss. 3. – P. 387–412. DOI: 10.1006/mssp.1999.1294

7. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
8. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.
9. Кудрявцев В.Н., Державец Ю.А., Глухов Е.Г. Конструкция и расчет зубчатых передач. – Л.: Машиностроение, 1971. – 328 с.

Поступила 04.04.2026

INTEGRAL DIAGNOSTIC INDICATORS FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF GEAR TRANSMISSIONS BY ACOUSTIC SIGNAL

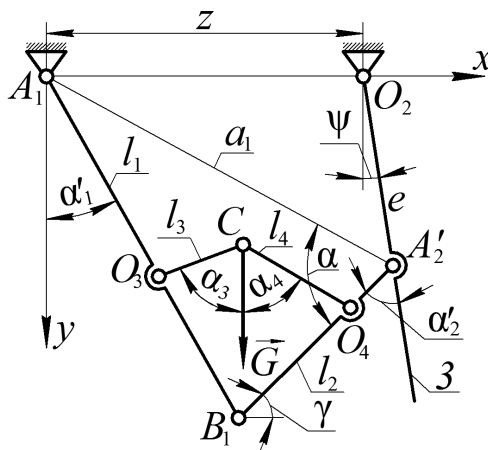
A. PARFIEVICH, V. SOKOL, B. DARCHICH
(Brest State Technical University)

The paper presents the results of experimental studies of the acoustic signal of a cylindrical three-stage gearbox with gears having various types of heat treatment (bulk hardening, induction hardening of teeth, hardening with high tempering) and simulated local tooth defects (absence of 25, 50, 75% of the tooth length, complete tooth absence). The necessity of transition from qualitative spectral analysis to quantitative integral diagnostic indicators is substantiated. Two relative indicators are proposed and tested: K_z – the ratio of the sum of the amplitudes of multiple gear mesh harmonics of the analyzed gear to the reference values, reflecting the energy of impact processes; and K_{bp} – the ratio of the sum of the amplitudes of sidebands (combination components) to the reference values, characterizing the depth of modulation of the gear mesh frequency. It is shown that the combined use of K_z and K_{bp} makes it possible to reliably detect local defects at early stages, differentiate their severity, and eliminate false alarms. The influence of heat treatment on the spectral characteristics of the signal is established, which is compensated due to the relative nature of the proposed indicators. The developed methodology automates the diagnostic process, reduces labor intensity, and can be integrated into predictive maintenance systems for industrial equipment.

Keywords: acoustic diagnostics, gear transmissions, local tooth defects, integral indicators, spectral analysis, sidebands, gear mesh frequency, heat treatment, monitoring automation, multi-shaft drive.

здавальняючим при нязначным нападуненні аб'ёму рабочей камеры матэрыялам [3], але яго нельга выкарыстоўваць для аналізу сіл узаемадзеяння, што ўзнікаюць паміж часцінкамі (ці структурнымі элементамі) матэрыялу.

Тут, ва ўдасканаленай мадэлі, на прыкладзе левай паловы рабочей камеры, пункт прыкладання сілы G сумяшчаецца з цэнтрам мас C матэрыялу (рысунак 2).



Рысунак 2. – Удасканаленая мадэль левай паловы рабочей камеры

Становішча пункта C вызначаецца двума бязважкімі стрыжнямі l_3, l_4 . Іх даўжыні і становішчы пунктаў O_3, O_4 прымаюцца набліжана ў залежнасці ад нападунення камеры матэрыялам і прынятым размахам ваганняў каромысла.

Вызначэнне каардынат цэнтра мас C . Пачатак восей каардынат сумясцім з апорай A_1 (рысунак 2). Пункт C знаходзіцца на перасячэнні акружнасцей радыусаў l_3, l_4 з цэнтрамі O_3, O_4 . Каардынаты цэнтраў абазначым літарамі x_3, y_3, x_4, y_4 ; іх велічыні ўстанавім пазней. Запісваем ураўненні акружнасцей у параметрычнай форме:

$$x_C = x_3 + l_3 \sin \alpha_3, \quad y_C = y_3 - l_3 \cos \alpha_3; \quad (1)$$

$$x_C = x_4 - l_4 \sin \alpha_4, \quad y_C = y_4 - l_4 \cos \alpha_4, \quad (2)$$

дзе α_3, α_4 – параметрычныя вуглы, якія належыць вызначыць.

Выключаем з ураўненняў (1), (2) каардынаты x_C, y_C ; атрымаем:

$$\left. \begin{aligned} x_3 + l_3 \sin \alpha_3 &= x_4 - l_4 \sin \alpha_4; \\ y_3 - l_3 \cos \alpha_3 &= y_4 - l_4 \cos \alpha_4 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Перапісваем (3) у выглядзе:

$$\left. \begin{aligned} (l_3 \sin \alpha_3)^2 &= [(x_4 - x_3) - l_4 \sin \alpha_4]^2; \\ (l_3 \cos \alpha_3)^2 &= [(y_3 - y_4) + l_4 \cos \alpha_4]^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Каб выключыць α_3 , складваем роўнасці (4) паміж сабою; знаходзім:

$$l_3^2 = l_{34}^2 + 2l_4 [(y_3 - y_4) \cos \alpha_4 - (x_4 - x_3) \sin \alpha_4] + l_4^2$$

$$\text{ці } (\Delta_y \cos \alpha_4 + \Delta_x \sin \alpha_4) = l, \quad (5)$$

дзе $l = (l_3^2 - l_4^2 - l_{34}^2) / 2l_4$, $l_{34}^2 = \Delta_x^2 + \Delta_y^2$, $\Delta_x = x_3 - x_4$, $\Delta_y = y_3 - y_4$.

Пераўтварым роўнасць (5) пры $\cos \alpha_4 = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_4}$. Канчаткова атрымліваем:

$$a \sin^2 \alpha_4 - b \sin \alpha_4 + c = 0, \quad (6)$$

дзе $a = 1 + (\Delta_x / \Delta_y)^2$; $b = 2l(\Delta_x) / (\Delta_y)^2$; $c = (l / \Delta_y)^2 - 1$.

Знаходзім карані квадратнага ўраўнення (6):

$$\sin \alpha_4 (\sin \alpha_4)' = \left[b \pm \sqrt{b^2 - 4ac} \right] / 2a.$$

Аналагічна знаходзім вугал α_3 ; атрымліваем:

$$a \sin^2 \alpha_3 - p \sin \alpha_3 + q = 0, \quad (7)$$

дзе $p = 2m(\Delta_x)/(\Delta_y)^2$; $q = (m/\Delta_y)^2 - 1$; $m = (l_4^2 - l_3^2 - l_{34}^2)/2l_3$.

Карані ўраўнення (7):

$$\sin \alpha_3 (\sin \alpha_3)' = \left[p \pm \sqrt{p^2 - 4aq} \right] / 2a.$$

Каардынаты цэнтра C вылічваем па формулах (1), (2).

Вызначэнне каардынат x_3, y_3, x_4, y_4 пунктаў O_3, O_4 . Каардынаты пунктаў O_3, O_4 (рысунак 2) вызначаюцца па формулах:

$$x_3 = A_1 O_3 \sin \alpha_1', \quad x_4 = l_1 \sin \alpha_1' + B_1 O_4 \sin (\alpha_2' - \psi);$$

$$y_3 = A_1 O_3 \cos \alpha_1', \quad y_4 = l_1 \cos \alpha_1' - B_1 O_4 \cos (\alpha_2' - \psi),$$

дзе $A_1 O_3, B_1 O_4$ – даўжыні адрэзкаў, якія вызначаюць становішча пунктаў O_3, O_4 на стрыжнях l_1, l_2 ; α_1', α_2' – вуглы іх павароту; ψ – вугал павароту каромысла.

Алгарытм знаходжання вуглоў α_1', α_2' апісаны ў артыкуле [4]. Запавячым адтуль адпаведныя формулы

$$\sin \alpha_1' = (x_{A_2} - l_2 \cos \gamma) / l_1, \quad (8)$$

дзе $x_{A_2} = z + e \sin \psi$; $e = O_2 A_2'$ – даўжыня каромысла ад восі яго вярчэння O_2 да месца замацоўкі стрыжня l_2 ; z – шырыня левай паловы рабочай камеры.

У формуле (8) вызначаем патрэбны вугал γ :

$$\gamma = \arccos t_1 - \arcsin t_2,$$

дзе $t_1 = \cos \alpha = (a_1^2 + l_2^2 - l_1^2) / 2a_1 l_2$; $t_2 = e \cos \psi / a_1$; $a_1^2 = z^2 + e^2 - 2ze \cos (\pi/2 + \psi)$.

$$\alpha_2' = \pi/2 + \psi - \gamma.$$

Вызначэнне скорасці і паскарэння цэнтра мас C . Для вызначэння скорасцей і паскарэнняў пункта C уздоўж восей каардынат выкарыстаем формулы (1). Прадставім іх у наступным выглядзе:

$$x_C = A_1 O_3 \sin \alpha_1' + l_3 \sin \alpha_3; \quad (9)$$

$$y_C = A_1 O_3 \cos \alpha_1' - l_3 \cos \alpha_3. \quad (10)$$

Для вызначэння скорасцей v_C^x, v_C^y уздоўж восей каардынат прадыверэнцыруем формулы (9), (10) па вуглу паварота каромысла. Паўторным дыферэнцыяваннем знойдзем паскарэнне a_C^x, a_C^y цэнтра мас C .

Раўнадзейныя велічыні шукаемых характарыстык вызначаем па формулах: $v_C = \sqrt{(v_C^x)^2 + (v_C^y)^2}$,

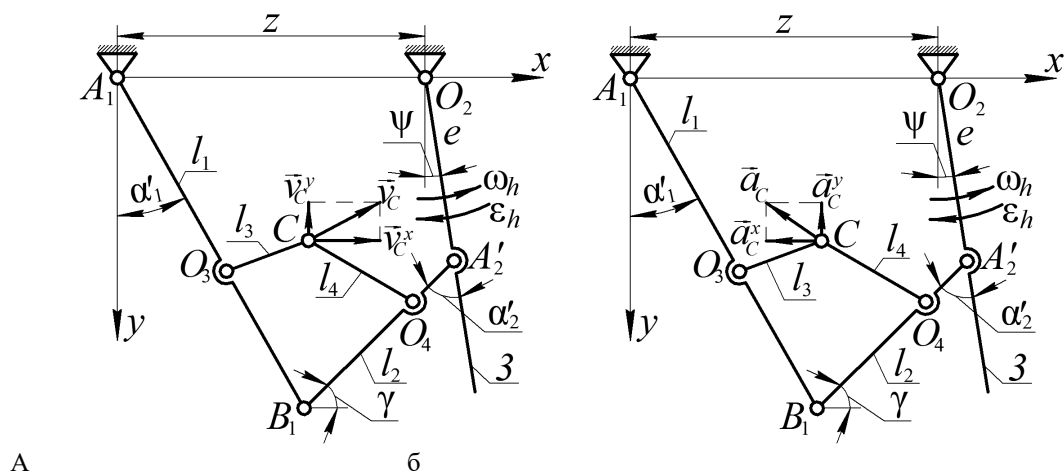
$a_C = \sqrt{(a_C^x)^2 + (a_C^y)^2}$ (рысунак 3).

Скорасці пункта C уздоўж восей каардынат знаходзім шляхам дыферэнцыявання функцый (9), (10):

$$v_C^x = \left(A_1 O_3 \cos \alpha_1' \frac{d\alpha_1'}{d\psi} + l_3 \cos \alpha_3 \frac{d\alpha_3}{d\psi} \right) \omega_h; \quad (11)$$

$$v_C^y = \left(-A_1 O_3 \sin \alpha_1' \frac{d\alpha_1'}{d\psi} + l_3 \sin \alpha_3 \frac{d\alpha_3}{d\psi} \right) \omega_h, \quad (12)$$

дзе ω_h – вядомая вуглавая скорасць каромысла [5; 6].



а – скорасць пункта *C*; *б* – яго паскарэнне

Рысунак 3. – Кінаматычныя характарыстыкі цэнтра мас *C*

У формулах (11), (12):

$$d\alpha'_1/d\psi = \frac{e \cos \psi + l_2 \sin \gamma (d\gamma/d\psi)}{l_1 \cos \alpha'_1},$$

$$\frac{d\gamma}{d\psi} = \frac{d(\arccos t_1)}{d\psi} - \frac{d(\arcsin t_2)}{d\psi} = -\frac{t'_1}{\sqrt{1-t_1^2}} - \frac{t'_2}{\sqrt{1-t_2^2}},$$

$$\text{дзе } t'_1 = dt_1/d\psi = \frac{ze \cos \psi (a_1^2 - l_2^2 + l_1^2)}{2a_1^3 l_2}, \quad t'_2 = dt_2/d\psi = -\frac{e \sin \psi}{a_1} - \frac{ze^2 \cos^2 \psi}{a_1^3}, \quad a_1 = \sqrt{z^2 + e^2 + 2ze \sin \psi}.$$

Перапісваем ураўненне (7) у наступным выглядзе:

$$as^2 - ps + q = 0,$$

дзе $s = \sin \alpha_3$.

Дыферэнцыруем s па ψ :

$$\frac{ds}{d\psi} = -\frac{(da/d\psi)s^2 - (dp/d\psi)s + (dq/d\psi)}{2as - p}.$$

Атрыманую велічыню $ds/d\psi$ пры разліках падстаўляем у формулу

$$\frac{d\alpha_3}{d\psi} = \frac{1}{\cos \alpha_3} \frac{ds}{d\psi}.$$

Знаходзім вытворныя каэфіцыентаў a, p, q квадратнага ўраўнення (7)

$$\frac{da}{d\psi} = 2k \frac{dk}{d\psi},$$

дзе $k = \Delta_x / \Delta_y$.

$$\frac{dk}{d\psi} = \frac{(d\Delta_x/d\psi)\Delta_y - \Delta_x(d\Delta_y/d\psi)}{\Delta_y^2}; \quad \frac{dm}{d\psi} = -\frac{\Delta_x(d\Delta_x/d\psi) + \Delta_y(d\Delta_y/d\psi)}{l_3};$$

$$\frac{dp}{d\psi} = 2 \left[\frac{dm}{d\psi} \cdot \frac{\Delta_x}{\Delta_y^2} + m \left(\frac{(d\Delta_x/d\psi)}{\Delta_y^2} - 2 \frac{\Delta_x(d\Delta_y/d\psi)}{\Delta_y^3} \right) \right]; \quad \frac{dq}{d\psi} = 2 \frac{m}{\Delta_y} \left(\frac{(dm/d\psi)}{\Delta_y} - \frac{m(d\Delta_y/d\psi)}{\Delta_y^2} \right).$$

Далей знойдзем: $\frac{d\Delta_x}{d\psi} = \frac{dx_3}{d\psi} - \frac{dx_4}{d\psi}$; $\frac{d\Delta_y}{d\psi} = \frac{dy_3}{d\psi} - \frac{dy_4}{d\psi}$.

Вытворныя каардынаты O_3 :

$$\frac{dx_3}{d\psi} = A_1 O_3 \cos \alpha'_1 \frac{d\alpha'_1}{d\psi}; \quad \frac{dy_3}{d\psi} = -A_1 O_3 \sin \alpha'_1 \frac{d\alpha'_1}{d\psi}.$$

Вытворныя каардынаты O_4 :

$$\frac{dx_4}{d\psi} = l_1 \cos \alpha'_1 \frac{d\alpha'_1}{d\psi} + B_1 O_4 \cos \theta \frac{d\theta}{d\psi}; \quad \frac{dy_4}{d\psi} = -l_1 \sin \alpha'_1 \frac{d\alpha'_1}{d\psi} + B_1 O_4 \sin \theta \frac{d\theta}{d\psi},$$

дзе $\theta = \alpha'_2 - \psi$, $d\theta/d\psi = -d\gamma/d\psi$.

Для вызначэння паскарэнняў пункта C уздоўж восей каардынаты дыферэнцыруем функцыі (11), (12):

$$a_C^x = \left[A_1 O_3 \left(\cos \alpha'_1 \frac{d^2 \alpha'_1}{d\psi^2} - \sin \alpha'_1 \cdot \left(\frac{d\alpha'_1}{d\psi} \right)^2 \right) + l_3 \left(\cos \alpha_3 \frac{d^2 \alpha_3}{d\psi^2} - \sin \alpha_3 \cdot \left(\frac{d\alpha_3}{d\psi} \right)^2 \right) \right] \omega_h^2 +$$

$$+ \left(A_1 O_3 \cos \alpha'_1 \frac{d\alpha'_1}{d\psi} + l_3 \cos \alpha_3 \frac{d\alpha_3}{d\psi} \right) \varepsilon_h; \quad (13)$$

$$a_C^y = \left[-A_1 O_3 \left(\sin \alpha'_1 \frac{d^2 \alpha'_1}{d\psi^2} + \cos \alpha'_1 \cdot \left(\frac{d\alpha'_1}{d\psi} \right)^2 \right) + l_3 \left(\sin \alpha_3 \frac{d^2 \alpha_3}{d\psi^2} + \cos \alpha_3 \cdot \left(\frac{d\alpha_3}{d\psi} \right)^2 \right) \right] \omega_h^2 +$$

$$+ \left(-A_1 O_3 \sin \alpha'_1 \frac{d\alpha'_1}{d\psi} + l_3 \sin \alpha_3 \frac{d\alpha_3}{d\psi} \right) \varepsilon_h, \quad (14)$$

дзе ε_h – вядомая велічыня вуглавога паскарэння каромысла [5; 6].

Знаходзім вытворныя, што ўваходзяць у формулы (13), (14):

$$\frac{d^2 \alpha'_1}{d\psi^2} = \frac{(dM/d\psi)K - M(dK/d\psi)}{K^2},$$

дзе $M = e \cos \psi + l_2 \sin \gamma \cdot (d\gamma/d\psi)$; $K = l_1 \cos \alpha'_1$; $dK/d\psi = -l_1 \sin \alpha'_1 (d\alpha'_1/d\psi)$;

$$dM/d\psi = -e \sin \psi + l_2 \left(\cos \gamma \cdot (d\gamma/d\psi)^2 + \sin \gamma \cdot (d^2 \gamma/d\psi^2) \right).$$

$$\frac{d^2 \gamma}{d\psi^2} = - \frac{(d^2 t_1/d\psi^2)(1-t_1^2) + t_1 (dt_1/d\psi)^2}{(1-t_1^2)^{3/2}} - \frac{(d^2 t_2/d\psi^2)(1-t_2^2) + t_2 (dt_2/d\psi)^2}{(1-t_2^2)^{3/2}}.$$

$$\frac{d^2 t_1}{d\psi^2} = \frac{z^2 e^2 \cos^2 \psi}{l_2 (z^2 + 2ez \sin \psi + e^2)^{3/2}} - \frac{3z^2 e^2 \cos^2 \psi (l_1^2 - l_2^2 + z^2 + 2ez \sin \psi + e^2)}{2l_2 (z^2 + 2ez \sin \psi + e^2)^{5/2}} -$$

$$- \frac{ze \sin \psi (l_1^2 - l_2^2 + z^2 + 2ez \sin \psi + e^2)}{2l_2 (z^2 + 2ez \sin \psi + e^2)^{3/2}}.$$

$$\frac{d^2 t_2}{d\psi^2} = \frac{e(-e^4 - e^3 z \sin \psi + e^2 z^2 \cos^2 \psi - ez^3 \sin \psi - z^4) \cos \psi}{(e^2 + 2ez \sin \psi + z^2)^{5/2}}.$$

$$\frac{d^2 \alpha_3}{d\psi^2} = \frac{(d^2 s/d\psi^2) \cos \alpha_3 + (ds/d\psi) \sin \alpha_3 \cdot (d\alpha_3/d\psi)}{\cos^2 \alpha_3}.$$

$$\frac{d^2 s}{d\psi^2} = \frac{(dP/d\psi)Q - P(dQ/d\psi)}{Q^2},$$

$$\text{дзе } Q = 2as - p; \quad P = -\left(\frac{da}{d\psi}s^2 - \frac{dp}{d\psi}s + \frac{dq}{d\psi}\right); \quad dQ/d\psi = 2\left(\frac{da}{d\psi}s + a(ds/d\psi)\right) - \frac{dp}{d\psi};$$

$$dP/d\psi = -\left(\frac{d^2 a}{d\psi^2}s^2 + 2\frac{da}{d\psi}s \cdot (ds/d\psi) - \frac{d^2 p}{d\psi^2}s - \frac{dp}{d\psi}(ds/d\psi) + \frac{d^2 q}{d\psi^2}\right).$$

$$\frac{d^2 a}{d\psi^2} = 2\left(\frac{dk}{d\psi}\right)^2 + 2k \frac{d^2 k}{d\psi^2},$$

$$\text{дзе } \frac{d^2 k}{d\psi^2} = \frac{\Delta_y^2 (d^2 \Delta_x / d\psi^2) - \Delta_x \Delta_y (d^2 \Delta_y / d\psi^2) - 2\Delta_y (d\Delta_x / d\psi)(d\Delta_y / d\psi) + 2\Delta_x (d\Delta_y / d\psi)^2}{\Delta_y^3}.$$

Знаходзім астатнія вытворныя для вызначэння $d^2 s / d\psi^2$:

$$\frac{d^2 p}{d\psi^2} = 2 \left[\begin{aligned} & \left((d^2 m / d\psi^2) \frac{\Delta_x}{\Delta_y^2} + 2(dm/d\psi) \left(\frac{(d\Delta_x / d\psi)}{\Delta_y^2} - 2 \frac{\Delta_x (d\Delta_y / d\psi)}{\Delta_y^3} \right) + \right. \\ & \left. + m \left(\frac{(d^2 \Delta_x / d\psi^2)}{\Delta_y^2} - 4 \frac{(d\Delta_x / d\psi)(d\Delta_y / d\psi)}{\Delta_y^3} - 2 \frac{\Delta_x (d^2 \Delta_y / d\psi^2)}{\Delta_y^3} + \right. \right. \\ & \left. \left. + 6 \frac{\Delta_x (d\Delta_y / d\psi)^2}{\Delta_y^4} \right) \right]; \end{aligned} \right];$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 q}{d\psi^2} = & \frac{2}{\Delta_y^3} \left[\Delta_y (dm/d\psi)^2 + m\Delta_y (d^2 m / d\psi^2) - m(dm/d\psi)(d\Delta_y / d\psi) - m^2 (d^2 \Delta_y / d\psi^2) \right] - \\ & - \frac{6m(\Delta_y (dm/d\psi) - m(d\Delta_y / d\psi))(d\Delta_y / d\psi)}{\Delta_y^4}; \end{aligned}$$

$$\frac{d^2 m}{d\psi^2} = - \frac{(d^2 \Delta_x / d\psi^2) \Delta_x + (d^2 \Delta_y / d\psi^2) \Delta_y + (d\Delta_x / d\psi)^2 + (d\Delta_y / d\psi)^2}{l_3};$$

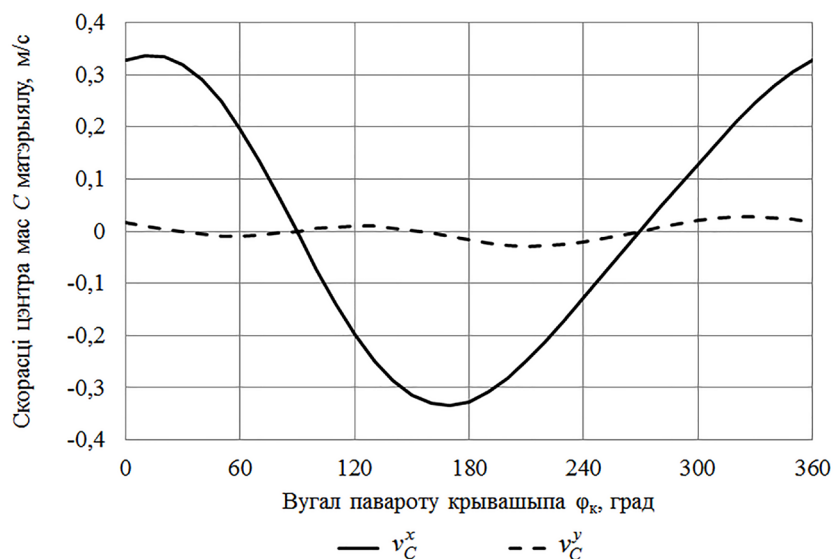
$$\frac{d^2 \Delta_x}{d\psi^2} = (A_1 O_3 - l_1) \left(\cos \alpha'_1 \frac{d^2 \alpha'_1}{d\psi^2} - \sin \alpha'_1 \left(\frac{d\alpha'_1}{d\psi} \right)^2 \right) - B_1 O_4 \cos \theta \frac{d^2 \theta}{d\psi^2} + B_1 O_4 \sin \theta \left(\frac{d\theta}{d\psi} \right)^2;$$

$$\frac{d^2 \Delta_y}{d\psi^2} = (l_1 - A_1 O_3) \left(\sin \alpha'_1 \frac{d^2 \alpha'_1}{d\psi^2} + \cos \alpha'_1 \left(\frac{d\alpha'_1}{d\psi} \right)^2 \right) - B_1 O_4 \cos \theta \left(\frac{d\theta}{d\psi} \right)^2 - B_1 O_4 \sin \theta \frac{d^2 \theta}{d\psi^2},$$

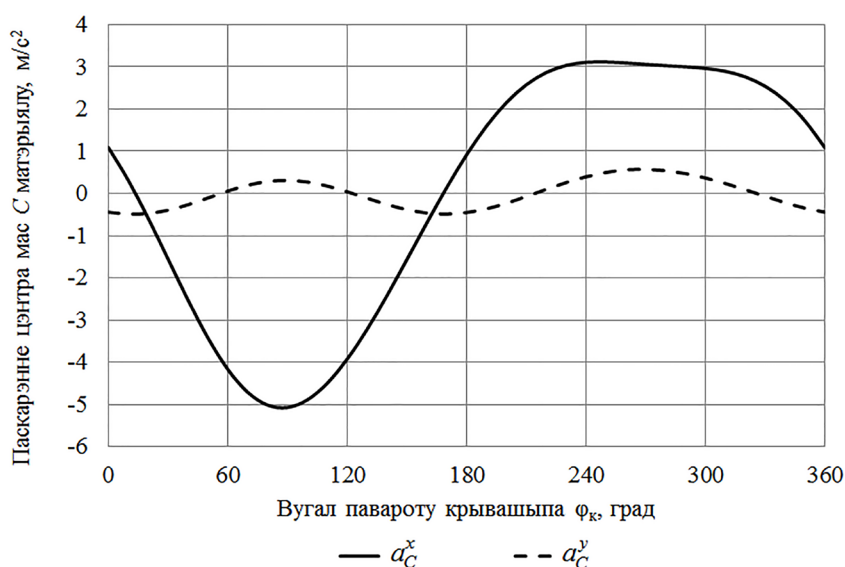
$$\text{дзе } \frac{d^2 \theta}{d\psi^2} = - \frac{d^2 \gamma}{d\psi^2}.$$

Выкарыстоўваючы геаметрычныя параметры і кінематычныя характарыстыкі эксперыментальнага ўзора ланцужага тэхналагічнага агрэгата, пабудуем графікі скорасцей і паскарэнняў цэнтра мас C матэрыялу ў выглядзе функцый вугла павароту φ_k крывашыпа (рысункі 4, 5).

З рысунка 4 відаць, што падчас руху матэрыялу дамінуе гарызантальны кампанент скорасці v_C^x . Найбольшыя значэнні ён набывае пры вуглах ψ павароту каромысла, блізкіх да нуля (пры $\varphi_k \approx 0, 180, 360$ градусаў). Атрыманая інфармацыя аб скорасці v_C улічваецца пры аналізе ўдарных эфектаў у рабочай камеры.



Рисунак 4. – Графік змянення скорасцей центра мас C матэрыялу ўздоўж восей каардынат



Рисунак 5. – Графік змянення паскарэнняў центра мас C матэрыялу ўздоўж восей каардынат

Сілавое ўзаемадзеянне часцінак рэчыва, як вядома, вызначаецца велічыняй іх паскарэнняў. З графікаў на рысунку 5 відаць, што прэваліруе складальная a_C^x . Значыць, часцінкі матэрыялу (ці яго структурныя элементы) сціскаюцца пераважна гарызантальнымі сіламі ўзаемадзеяння.

Заклучэнне. На падставе формул (11)–(14) пабудаваны графікі скорасцей і паскарэнняў у выглядзе функцый вугла паварту φ_k кривашыпа (рысункі 4, 5). Яны набліжана апісваюць і рух асобных структурных элементаў перапрацоўваемага матэрыялу. У разліках прыняты параметры эксперыментальнага ўзора ланцужнага аграгата [3]: вуглавая скорасць кривашыпа – $\omega_k = 12,566$ рад/с, даўжыні кривашыпа, шатуна і каромысла: $r = 0,08$ м, $l = 0,5459$ м і $h = 0,585$ м. Геаметрычныя параметры мадэлі рабочай камеры: $z = 0,205$ м, $l_1 = 0,455$ м, $l_2 = 0,175$ м, $e = 0,28$ м. Адвольна прыняты даўжыні звенняў для мадэліравання становішча матэрыяла ў рабочай камеры: $l_3 = 0,0567$ м, $l_4 = 0,058$ м, $A_1O_3 = 0,355$ м, $B_1O_4 = 0,1$ м.

З дапамогай распрацаванага алгарытму магчыма аналізаваць уплыў геаметрычных параметраў звенняў мадэлі рабочай камеры і ступень яе напоўненасці на кінематычныя характарыстыкі руху матэрыяла, што дазваляе ў далейшым аптымізаваць тэхналагічны працэс, а таксама ўдакладніць разлік неабходнай магутнасці рухавіка.

ЛІТАРАТУРА

1. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия / Л.А. Сиваченко, Л.Л. Сотник, Т.Л. Сиваченко и др.; под науч. ред. Л.А. Сиваченко. – Барановичи: Баранович. гос. ун-т, 2020. – 359 с.
2. Цепной агрегат в технологии сортировки твердых коммунальных отходов / В.А. Потапов, Л.А. Сиваченко, В.О. Китиков и др. // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: сб. тр. / Ин-т жилищ.-коммун. хоз-ва НАН Беларуси; под общ. ред. В.О. Китикова. – Минск: БГУИР, 2025. – С. 160–166.
3. Сиваченко Л.А., Потапов В.А., Русан С.И. Цепные технологические агрегаты: монография. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2025. – 164 с.
4. Патапаў У.А., Русан С.І., Сівачэнка Л.А. Мадэліраванне і аналіз сілавого ўзаемадзеяння звянаў у рабочай камеры ланцужага аграгата // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Машиностроение. – 2023. – № 1(130). – С. 95–108. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-130-1-95-108
5. Распрацоўка алгарытму аналітычнага метаду кінематычнага аналізу чатырохзвеннага механізма ланцужага аграгата / У.А. Патапаў, С.І. Русан, Л.А. Сівачэнка і інш. // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Машиностроение. – 2022. – № 2(128). – С. 105–112. DOI: 10.36773/1818-1112-2022-128-2-105-112
6. Агляд аналітычных метадаў кінематычнага аналізу прываднага механізма ланцужага аграгата / У.А. Патапаў, С.І. Русан, Л.С. Сідор і інш. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 2. – С. 8–17. DOI: 10.52928/2070-1616-2025-52-2-8-17

Поступила 19.05.2026

УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ЦЕПНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АГРЕГАТА

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

Выполненное уточнение структуры заполненной рабочей камеры цепного технологического агрегата приближает ее модель к реальной конструкции и, таким образом, позволяет более точно исследовать технологический процесс в ней. В статье изложены алгоритмы приближенного определения координат центра масс материала, заполняющего рабочую камеру, его скорости и ускорения. Построены графики изменения кинематических характеристик центра масс в виде функций угла поворота кривошипа. Для их построения выбраны геометрические параметры и кинематические характеристики, соответствующие экспериментальному образцу цепного агрегата. Полученные результаты в виде графиков позволяют анализировать движение частиц материала, их скорости и ускорения, необходимые для анализа ударных эффектов в рабочей камере, а также для подбора ее геометрических параметров. Разработанный алгоритм может быть использован для уточнения расчета необходимой мощности двигателя.

Ключевые слова: цепной агрегат, рабочая камера, модель, кинематические характеристики, анализ.

IMPROVEMENT OF THE WORKING CHAMBER MODEL OF A CHAIN TECHNOLOGICAL AGGREGATE

V. POTAPOV, S. RUSAN
(Baranavichy State University)
L. SIVACHENKO
(Belarusian-Russian University, Mogilev)

The improvement made to the structure of the filled working chamber of the chain technological aggregate brings its model closer to the actual design and, thereby, enables a more accurate investigation of the technological process occurring within it. The article presents algorithms for the approximate determination of the coordinates of the center of mass of the material filling the working chamber, as well as its velocity and acceleration. Graphs of the changes in the kinematic characteristics of the center of mass are constructed as functions of the crank rotation angle. Geometric parameters and kinematic characteristics corresponding to the experimental prototype of the chain aggregate were selected for plotting these graphs. The obtained results in the form of graphs allow analyzing the motion of substance particles, their velocities and accelerations, which are necessary for the analysis of impact effects in the working chamber, as well as for selecting its geometric parameters. The developed algorithm can be used to refine the calculation of the required engine power.

Keywords: chain aggregate, working chamber, model, kinematic characteristics, analysis.

ТРАНСПОРТ

УДК 656.11:625.7

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-42-47

ИССЛЕДОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ
НА ОСНОВЕ МИНИМИЗАЦИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

*А.В. КОРЖОВА¹, д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ², д-р техн. наук, доц. А.Г. БАХАНОВИЧ^{1,3},
О.А. СОНИЧ¹, Д.В. МОЗАЛЕВСКИЙ¹*

*(¹Белорусский национальный технический университет (БНТУ),
филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»,
Научно-исследовательский и испытательный центр транспортных средств, Минск;*

²Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;

³Министерство образования Республики Беларусь, Минск)

Статья посвящена проблеме повышения эффективности функционирования транспортной инфраструктуры городов путем снижения всех видов потерь в дорожном движении на примере магистральной улицы районного значения. В ходе исследования выполнен детальный топографический и количественный анализ аварийности, а также натурные измерения параметров транспортных и пешеходных потоков, на основе которых произведен расчет экономических, экологических и аварийных издержек. Предложен комплекс инженерных мероприятий (введение светофорного регулирования, обустройство направляющих островков, кольцевых пересечений), экономическая целесообразность которых обоснована сокращением суммарных потерь и приемлемыми сроками окупаемости.

Ключевые слова: *организация дорожного движения, аварийность, теория потерь, светофорное регулирование, кольцевое пересечение, транспортный поток, задержки, экологический ущерб.*

Введение. Современный этап развития крупных городов неизбежно сопровождается интенсивным ростом уровня автомобилизации [1; 2]. Автомобильный транспорт, являясь драйвером экономической мобильности и обеспечения комфорта населения, а также устойчивого развития особенно мегаполисов, одновременно выступает главным источником ряда серьезных градостроительных и социально-экономических проблем. Среди наиболее острых негативных экстерналий дорожного движения выделяются дорожно-транспортная аварийность, сопровождающаяся гибелью и травматизмом людей, материальным ущербом, а также заторовые ситуации, ведущие к колоссальным потерям времени (задержкам), снижению скорости сообщения и критическому ухудшению экологической обстановки за счет выбросов отработавших газов и акустического загрязнения [3].

Решение проблем дорожного движения требует перехода от экстенсивных методов (бесконечное расширение проезжей части) к интенсивным – внедрению современных методов организации дорожного движения (ОДД) на базе глубокого анализа параметров транспортных и пешеходных потоков. В отечественной науке ведущим подходом к оценке качества ОДД является методология, основанная на квалиметрии и определении суммарных потерь в дорожном движении (экономических, экологических, социальных)¹ [4; 5]. Согласно данной методологии, любое управляющее воздействие в транспортной системе должно оцениваться через призму монетизации сэкономленного времени, предотвращенного ущерба здоровью и улучшению экологии.

Целью данного исследования является оценка существующих условий дорожного движения и разработка научно обоснованных предложений по совершенствованию ОДД на магистральной улице районного значения – ул. Одоевского во Фрунзенском районе г. Минска – для комплексного снижения всех видов потерь.

Основная часть. Аварийность является наиболее выраженным отрицательным фактором процесса автомобилизации [4; 5]. Анализ дорожно-транспортных происшествий (ДТП) позволяет не только установить места их концентрации (очаги), но и выявить первопричины их возникновения для последующей нейтрализации. В ходе исследования использовались официальные статистические данные ОГАИ Фрунзенского РУВД г. Минска за период с 2021 по 2025 гг. За исследуемый период на дорожной сети района произошло 19 698 ДТП. На самой улице Одоевского (протяженность 3,2 км) произошло 175 ДТП (доля от районной аварийности – 0,89%), в т.ч. 18 учетных ДТП, в которых было ранено 20 человек. Также отмечен высокий уровень аварийности на прилегающих дворовых территориях (132 ДТП).

¹ RTF-Road traffic flows: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 222 / Д.В. Капский, Д.В. Мозалевский, В.Н. Кузьменко и др. – Нац. центр интеллектуальной собственности, 2010.

Количественный анализ распределения ДТП по месяцам показал, что наиболее аварийно-опасными периодами являются осенне-зимние месяцы (с октября по декабрь). Суммарно на этот период приходится большинство происшествий, что коррелирует с ухудшением коэффициента сцепления дорожного покрытия и ухудшением видимости. Распределение по дням недели демонстрирует пики в понедельник и пятницу. Внутрисуточное распределение ярко выделяет два пика аварийности: утренний (08:00–09:00) и вечерний (15:00–21:00).

В структуре ДТП абсолютно доминируют попутные столкновения (включая наезды сзади) и столкновения на перекрестках. Подобное распределение указывает на дефицит пропускной способности узлов, наличие непредвиденных остановок в потоке (перед нерегулируемыми пешеходными переходами) и конфликтные ситуации при маневрировании. Выявлены очаги аварийности: перекрестки ул. Одоевского с пр. Пушкина, ул. Бельского, ул. Я. Мавра, ул. Е. Полоцкой и ул. Б. Берута, а также нерегулируемые пешеходные переходы (НПП) в районе домов №81 и №115А. Топографический анализ аварийности представлен на рисунке 1.

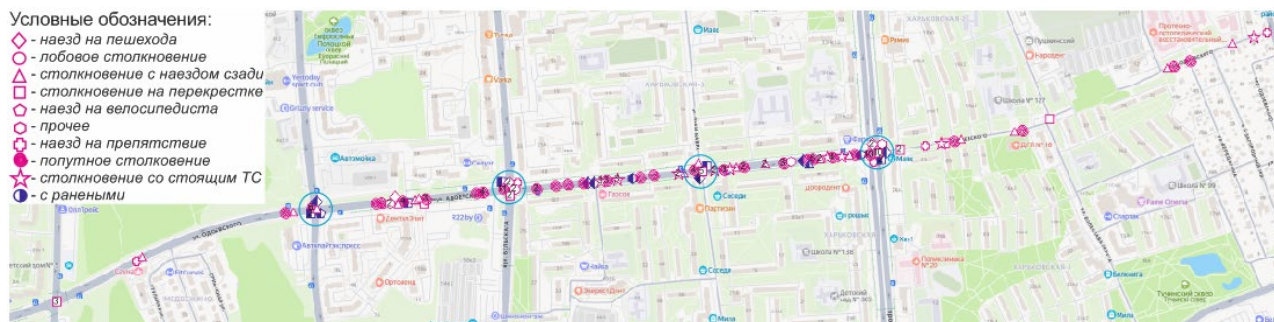


Рисунок 1. – Топографический анализ аварийности на исследуемом участке улицы

Для разработки адекватной математической модели существующего состояния был осуществлен сбор эмпирических данных. Любое вмешательство в существующую ОДД невозможно без знания гидродинамических параметров потока. Были проведены натурные обследования и измерения микро- и макропараметров (интенсивности, плотности и состава потока) в репрезентативные дни, автоматическая обработка которых проводилась в программе RTF-Road traffic flows². Измерения интенсивности и состава движения проводились по полосам на входах с 07:30 до 20:00 в будний день. Дискретность измерений составляла 10 светофорных циклов (либо 15 мин для нерегулируемых объектов). Пример картограммы представлен на рисунке 2.

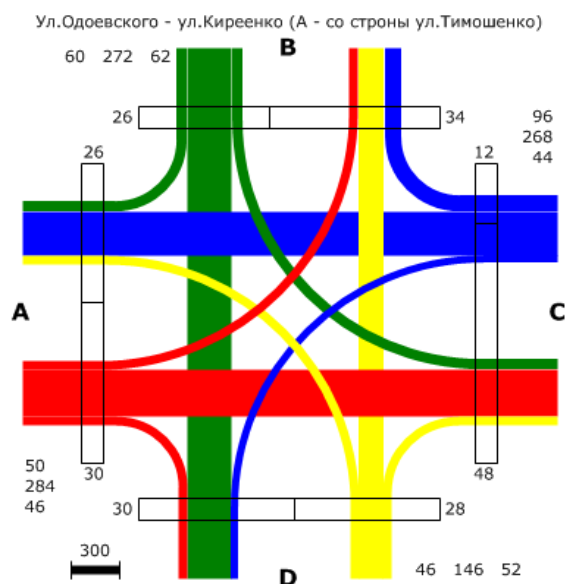


Рисунок 2. – Картограмма интенсивности движения (пример)

² RTF-Road traffic flows: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 222 / Д.В. Капский, Д.В. Мозалевский, В.Н. Кузьменко и др. – Нац. центр интеллектуальной собственности, 2010.

Картограмма интенсивности для самого загруженного пересечения (ул. Одоевского – ул. Е. Полоцкой) показала, что значительную долю в структуре потока занимают левоповоротные направления, которые в условиях отсутствия выделенных полос и специализированных фаз регулирования создают «запирающий» эффект для транзитного потока, генерируя высокие задержки.

Расчет потерь в дорожном движении при существующей схеме ОДД. Оценка состояния производилась по математическим моделям расчета экономических, экологических и аварийных потерь [2–5].

Экономические потери включают потери от транспортных задержек, простоев и задержек пешеходов. Расчет удельной задержки транспорта выполнялся по модифицированной формуле Вэбстера, учитывающей случайный характер прибытия транспортных средств (ТС) и степень насыщения. Экологические потери определялись ущербом от выбросов вредных веществ (приведенных к CO) и от акустического воздействия. Аварийные потери рассчитывались исходя из стоимости последствий ДТП различной степени тяжести.

Пример (*Перекресток ул. Одоевского – ул. Е. Полоцкой*): существующая 4-фазная схема с конфликтами приводила к высоким потерям. Расчетные экономические потери составили 493,98 тыс. у.е./год, экологические потери – 240,51 тыс. у.е./год, аварийные – 6,43 тыс. у.е./год (сумма – 740,92 тыс. у.е./год). На НПП (в районе дома № 81) применение искусственных неровностей (ИН1) вызывало постоянные циклы «торможение-разгон», из-за чего экологические издержки превышены.

Разработка комплекса предложений по совершенствованию ОДД. Опираясь на системный подход, с учетом требований действующих технических нормативных правовых актов, предложены мероприятия, направленные на минимизацию конфликтных точек³ [6–10].

Пересечение ул. Одоевского – ул. Е. Полоцкой (рисунок 3):

- Устройство конструктивно выделенных островков на входах А и С;
- канализирование движения: выделение полосы для левого поворота (вход А) и для правого поворота (вход С);
- изменение диаграммы светофорного регулирования с добавлением дополнительных секций для бесконфликтного пропуска поворачивающих потоков.

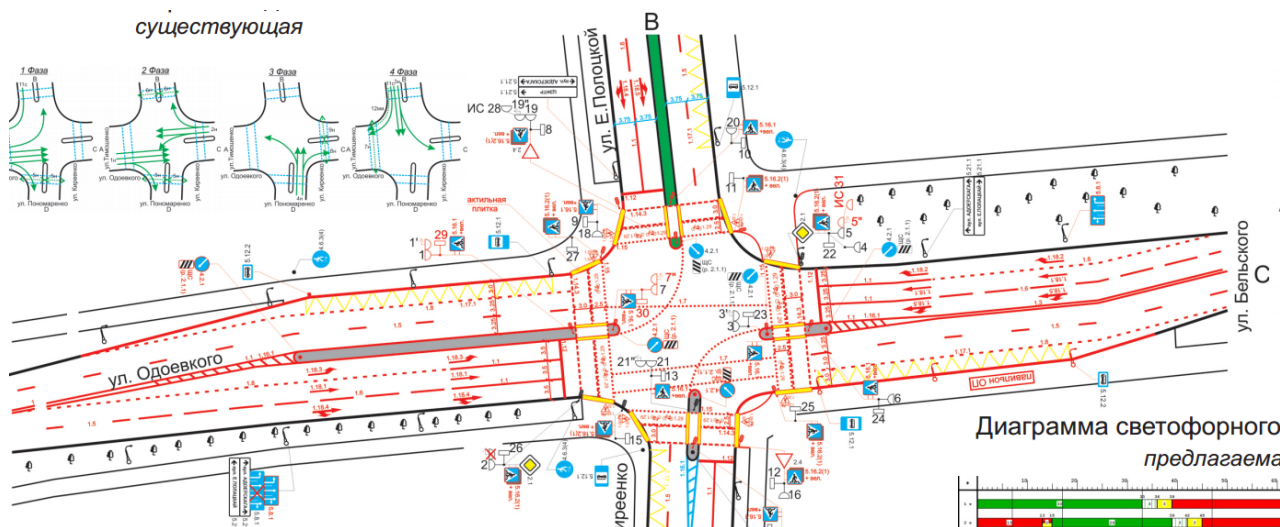


Рисунок 3. – Предлагаемая схема ОДД на перекрестке

Пересечение ул. Одоевского – ул. Янки Мавра (рисунок 4):

- создание карманов для остановочных пунктов маршрутных транспортных средств;
- устройство островков безопасности и выделение отдельной полосы для правого поворота;
- организация легализованных велопереездов и корректировка пофазного разъезда.

НПП на ул. Одоевского (р-н дома № 81) (рисунок 5):

- демонтаж искусственной неровности ИН1;
- обустройство пешеходного перехода светофорами с табло вызова пешеходов (ПВУ) и строительство конструктивного островка безопасности. Это устранил генерацию выбросов от торможения и разгона транспортного потока.

³ Технические средства организации дорожного движения. Правила применения: СТБ 1300-2024. – Взамен 1300-2014; введ. 01.04.2025. – Минск: Госстандарт, 2024. – 124 с.

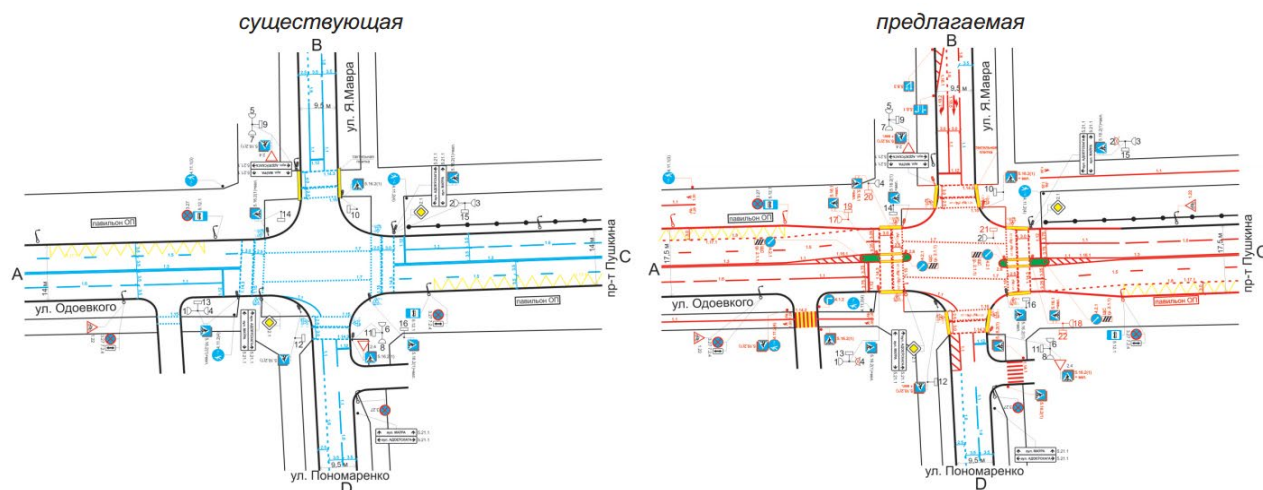


Рисунок 4. – Существующая и предлагаемая схемы ОДД на перекрестке

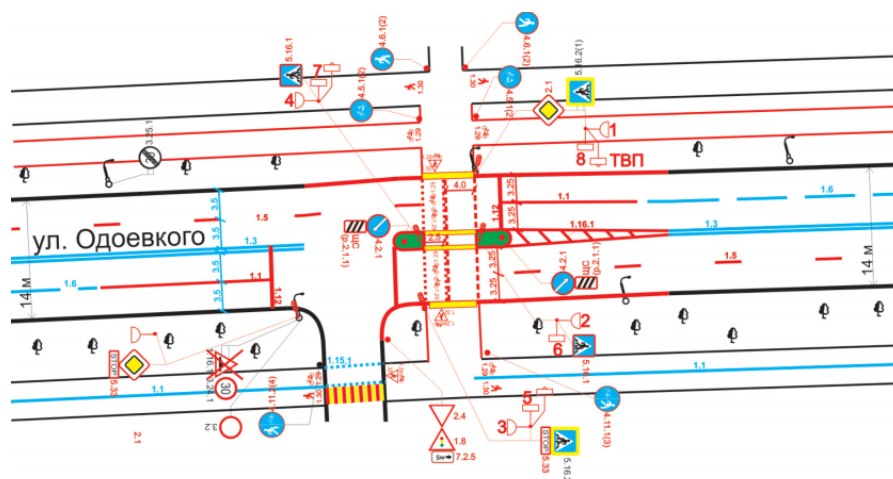


Рисунок 5. – Предлагаемая схема ОДД на пешеходном переходе

Пересечение ул. Одоевского – ул. Б. Берута (рисунок 6):

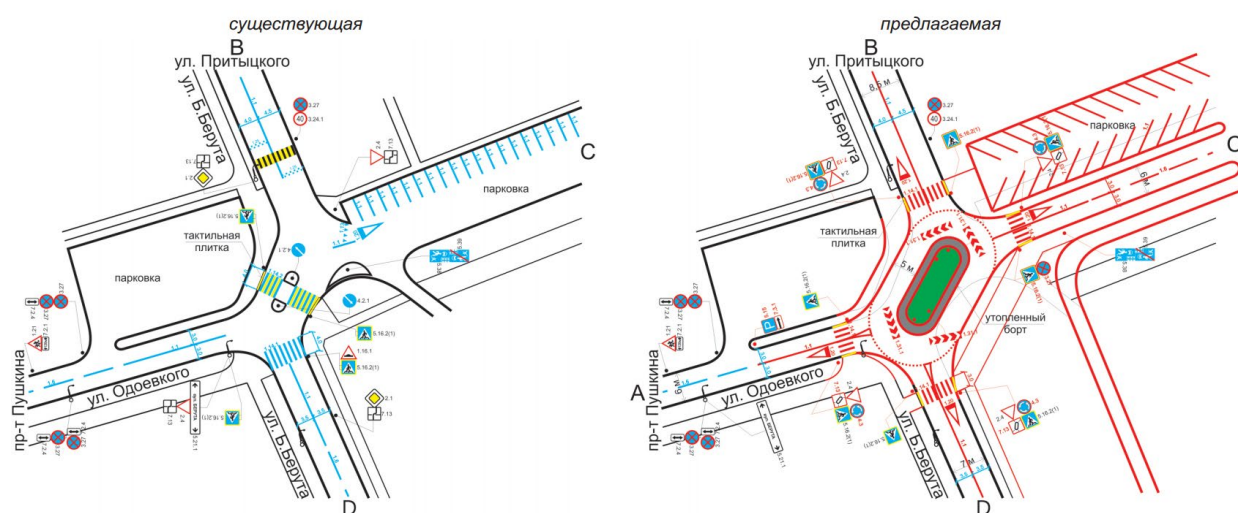


Рисунок 6. – Существующая и предлагаемая схемы ОДД на перекрестке

– реорганизация узла в одноуровневое кольцевое пересечение малого радиуса («мини-кольцо» с утопленным центральным бортом). Кольцевые пересечения кардинально снижают тяжесть ДТП и минимизируют транспортные задержки на пересечениях второстепенных улиц.

Внедрение предложенных инженерных мер кардинально меняет коэффициенты безопасности и структуру потерь. Прогнозы показали падение суммарных аварийных потерь на исследуемых узлах. Экологические показатели значительно улучшаются благодаря исключению лишних остановок-разгонов и сокращению длины очередей перед перекрестками (рисунок 7).

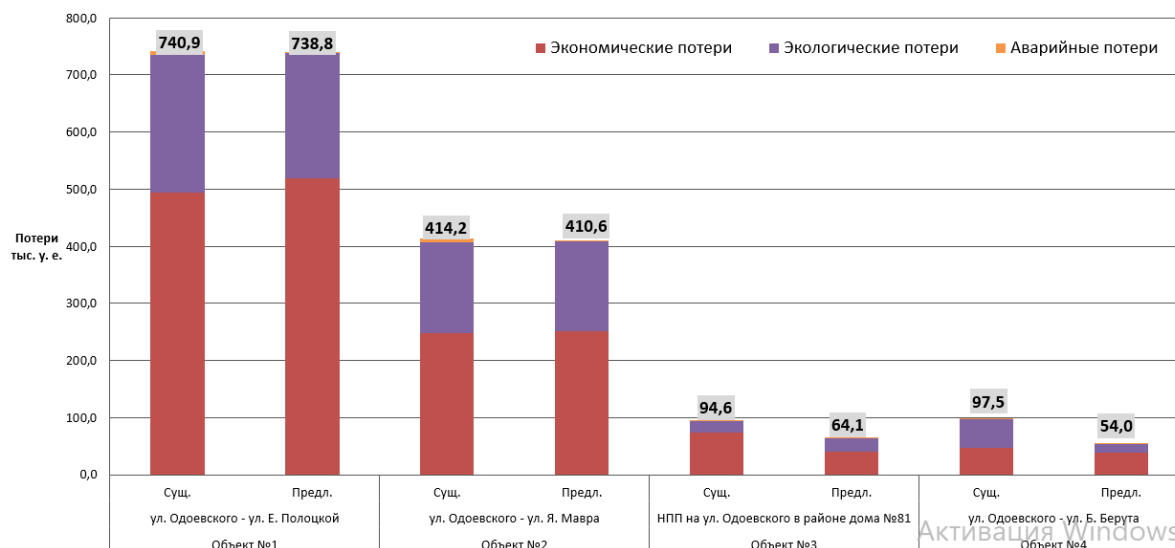


Рисунок 7. – Потери при существующей и предлагаемой ОДД

Закключение. Организация дорожного движения в урбанизированных агломерациях требует категорического отказа от интуитивно-эмпирического подхода в пользу строгих физико-математических и квалитетических методов. Настоящее исследование, проведенное на полигоне улично-дорожной сети г. Минска с применением теории потерь, эксплицитно доказывает, что таргетная инженерная оптимизация генерирует макроэкономические дивиденды.

Детализированная алгоритмизация процессов управления позволила идентифицировать узкие места системы. Доказано, что применение грубых методов трафик-калминга (искусственные неровности) на магистральных артериях экономически и экологически контрпродуктивно. Их замена на адаптивные светофорные объекты с пешеходным вызовом, наряду с внедрением кольцевых саморегулируемых микроузлов и жесткого канализирования потоков, не только устраняет кинематические парадоксы (циклы «разгон-торможение»), но и прерывает генерацию аварийных конфликтов.

Экономическое обоснование подтвердило беспрецедентную инвестиционную емкость локальных проектов ОДД: сроки окупаемости разработанных решений не превышают 5 лет, а для проектов замены ИН на ПВУ и внедрения «мини-колец» исчисляются 4 месяцами. Практическая имплементация предложенного алгоритмического и инфраструктурного комплекса гарантирует минимизацию интегральных издержек общества, повышение индекса транспортной мобильности населения и устойчивое экологическое оздоровление городской среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
3. Капский Д.В. Методология повышения качества дорожного движения / Белорусский национальный технический университет. – Минск: БНТУ, 2018. – 370 с.
4. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
5. Капский Д.В. Организация дорожного движения. Аварийность: анализ, оценка, прогнозирование: учеб.-метод. пособие. – Минск: БНТУ, 2023. – 439 с.
6. Кот Е.Н., Капский Д.В., Коржова А.В. Технические средства организации дорожного движения. – Минск: БНТУ, 2016. – 239 с.
7. Капский Д.В. Совершенствование организации дорожного движения на пешеходных переходах // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2006. – № 6. – С. 62–64.
8. Korzhova A., Kapski D. The research of traffic offences by pedestrians on the unregulated crossings with humps // MATEC Web of Conferences-2018 / Bydgoszcz (25–26 сент. 2018 г.) – Bydgoszcz, 2018. – P. 02012. DOI: 10.1051/matecconf/201818202012

9. Капский Д. В. Разработка мероприятий по повышению безопасности движения на регулируемых перекрестках // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2005. – № 1. – С. 55–58.
10. Sarazhinsky D.S., Kapski D.V. An analytical model of pedestrian delay for pedestrian-actuated cycle length preserving signal traffic control // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics Series. – 2025. – Vol. 61, No. 1. – P. 63–73. DOI: 10.29235/1561-2430-2025-61-1-63-73

Поступила 17.07.2026

**A STUDY OF ROAD TRAFFIC ORGANIZATION
BASED ON MINIMIZING SOCIO-ECONOMIC LOSSES**

A. KORZHOVA¹, V. IVANOV², A. BAKHANOVICH^{1,3}, O. SONICH¹, D. MOZALEVSKY¹

(¹Belarusian National Technical University (BNTU),

BNTU Branch “Research Polytechnic Institute”,

Research and Testing Center for Vehicles, Minsk;

²Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;

³Ministry of Education of the Republic of Belarus, Minsk)

This article examines the problem of improving the efficiency of urban transport infrastructure by reducing all types of traffic losses, using a major street of district significance as an example. The study included a detailed topographic and quantitative analysis of accident rates, as well as in-kind measurements of traffic and pedestrian flow parameters, which were used to calculate economic, environmental, and accident costs. A set of engineering measures (introduction of traffic lights, installation of guide islands, and roundabouts) was proposed. Their economic feasibility was justified by a reduction in total losses and acceptable payback periods.

Keywords: traffic management, accident rate, loss theory, traffic lights, roundabouts, traffic flow, delays, environmental damage.

УДК 656.11:625.7

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-48-54

ИНФРАСТРУКТУРНАЯ ПРИОРИТЕТИЗАЦИЯ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА КАК ПАТТЕРН МИНИМИЗАЦИИ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

**А.В. КОРЖОВА¹, д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ², д-р техн. наук, доц. А.Г. БАХАНОВИЧ^{1,3},
О.А. СОНИЧ¹, Д.В. МОЗАЛЕВСКИЙ¹**

**(¹Белорусский национальный технический университет (БНТУ),
филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»,
Научно-исследовательский и испытательный центр транспортных средств, Минск;**

²Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;

³Министерство образования Республики Беларусь, Минск)

Статья посвящена проблеме повышения качества функционирования маршрутного пассажирского транспорта в условиях дефицита пропускной способности улично-дорожной сети. На основе методологии квалитметрии дорожного движения и теории потерь реализован топографический аудит аварийности и анализ гидродинамических параметров транспортных потоков на магистральной сети Фрунзенского района г. Минска. Синтезирован комплекс инженерных решений, включающий геометрическое канализирование узлов, организацию обособленных полос и адаптацию алгоритмов светофорного регулирования. Экономическая целесообразность предложенной концепции верифицирована расчетом сокращения транспортных задержек и экологической эмиссии, подтверждающим высокую инвестиционную рентабельность инфраструктурных модификаций.

Ключевые слова: маршрутный пассажирский транспорт, обособленная полоса, организация дорожного движения, теория потерь, транспортная задержка, экологический ущерб, квалитметрия дорожного движения, пропускная способность, геометрическое канализирование.

Введение. Современный вектор развития крупных урбанизированных агломераций детерминирует объективную необходимость концептуальной трансформации транспортной политики: от безусловного обеспечения мобильности индивидуального автотранспорта к парадигме устойчивой городской мобильности [1–3]. Базисом данной парадигмы выступает обеспечение приоритетного движения маршрутного пассажирского транспорта (МПТ) [2; 3]. В условиях нарастающего дефицита пропускной способности улично-дорожной сети (УДС) перманентный рост парка индивидуальных транспортных средств генерирует комплекс взаимосвязанных отрицательных экстерналий: экспоненциально снижается эксплуатационная скорость движения МПТ, нарушается регулярность циклов обслуживания, деградирует качество предоставления транспортных услуг, что в конечном итоге провоцирует дальнейший отток пассажиров в сегмент использования личных автомобилей [4–9]. Подобная циклическая регрессия мультиплицирует экологический ущерб, транспортные задержки (как для автомобилистов, так и для пассажиров) и вероятностный уровень дорожно-транспортного травматизма [4; 9–11].

Репрезентативным научно-практическим подходом к разрешению данного конфликта интересов в транспортном пространстве является методология квалитметрии дорожного движения и системной минимизации социально-экономических потерь [9–11]. Базовый постулат данной методологии гласит, что оценка эффективности любого инженерно-планировочного решения должна осуществляться исключительно посредством математического моделирования и перевода в монетарный эквивалент совокупного интегрального ущерба (состоящего из аварийного, экономического и экологического компонентов) [10; 11]. Пространственный реинжиниринг, сфокусированный на защите МПТ от флуктуаций транзитных потоков и канализировании конфликтных узлов, позволяет радикально снизить непроизводительные потери в масштабах экономики города.

Целью настоящего исследования является комплексная диагностика гидродинамических и кинематических параметров функционирования магистральной улицы районного значения – ул. Лобанка и сопряженных с ней артерий (ул. Одинцова, ул. Мазурова, ул. Горецкого, ул. Шаранговича) во Фрунзенском районе г. Минска, а также разработка научно обоснованных градостроительных паттернов приоритизации МПТ при минимизации совокупных видов дорожных потерь.

Основная часть. Анализ статистики дорожно-транспортных происшествий (ДТП) выполняет функцию базового индикатора структурно-функциональных дефектов УДС. В рамках представленного исследования реализованы статистический и топографический аудиты аварийности на обозначенном полигоне, базирующиеся на верифицированных массивах данных ОГАИ за репрезентативный период 2022–2025 гг.

За исследуемый период на рассматриваемых участках сети зафиксировано 208 инцидентов. Выявлено 5 учетных ДТП с пострадавшими (5 раненых); происшествий с летальным исходом не зарегистрировано. Абсолютное большинство (203 случая, или 97,6%) составили инциденты, квалифицируемые как ДТП с материальным ущербом. Данный факт свидетельствует о наличии хронических конфликтов в узловых зонах, не приводящих к фатальным последствиям исключительно за счет высокой плотности потока и, как следствие, низких скоростей в моменты столкновений.

Квантитативный анализ сезонного распределения обнаружил жесткую корреляцию аварийности с осенне-зимним климатическим периодом. Суммарно на зимний (67 ДТП; 32,2%) и осенний (64 ДТП; 30,7%) сезоны приходится 63% всех происшествий. Локальные экстремумы зарегистрированы в октябре (26 ДТП), январе

(25 ДТП) и феврале (24 ДТП). Выявленная динамика имеет научное обоснование, связанное с деградацией трибологических (фрикционных) характеристик дорожного покрытия, ухудшением оптической прозрачности атмосферы и сокращением периода естественной инсоляции [12; 13].

Внутринедельная аппроксимация фиксирует локальные максимумы энтропии системы по понедельникам (14,7%) и пятницам (18,0%). Анализ суточного профиля распределения эксплицитно демонстрирует бимодальный характер с пиковыми значениями, синхронизированными с фазами маятниковой трудовой миграции: утренним (08:00–09:00) и пролонгированным вечерним (17:00–19:00) максимумами.

В видовой структуре ДТП доминирующей категорией выступают попутные столкновения (110 эпизодов; 52,88%) и столкновения, классифицируемые как наезд сзади (28 эпизодов; 13,46%). Угловые столкновения на перекрестках представлены 17 инцидентами. Доминирование продольных (попутных) инцидентов является имманентным паттерном для перегруженных многополосных магистралей, не имеющих жесткого геометрического канализирования маневров и физического расщепления фаз светофорного регулирования [9–14]. Перманентные латеральные перестроения, инициируемые наличием припаркованных в крайнем правом ряду транспортных средств, а также стохастические замедления перед заторовыми зонами генерируют высокую дисперсию скоростного режима.

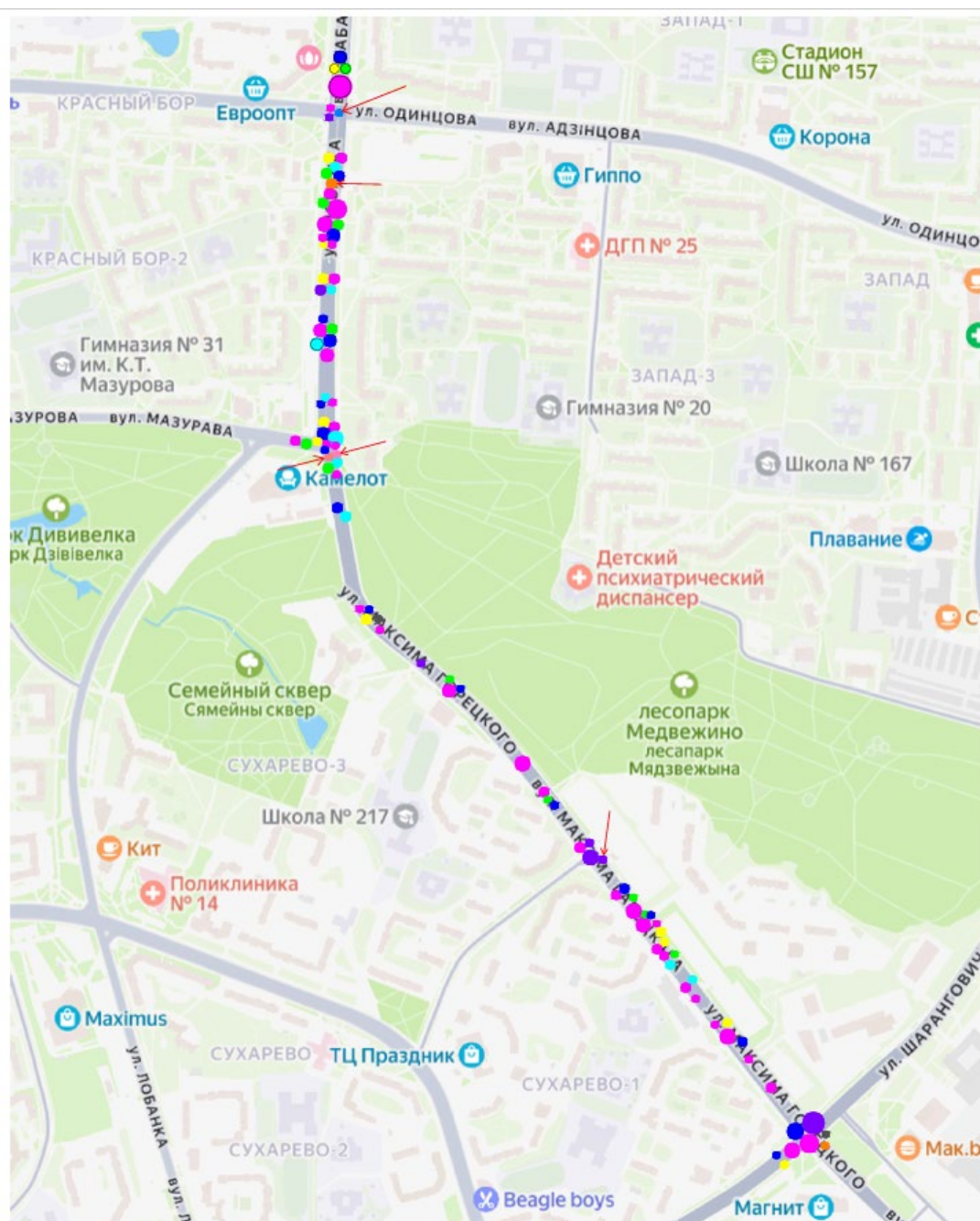


Рисунок 1. – Топографический анализ аварийности

Пространственная привязка событий (топографический анализ, см. рисунок 1) верифицировала гипотезу о том, что подавляющее большинство инцидентов (84,62%) локализуется в зонах пересечений в одном уровне. Главными очагами признаны узлы: ул. Лобанка – ул. Одинцова (очаг интерференции транзитных и локальных потоков у домов № 22 и № 19), ул. Шаранговича – ул. Горького, а также сопряжения с ул. Мазурова и ул. Чайлытко.

Для инструментальной верификации имитационной модели осуществлен комплекс натурных микроскопических измерений кинематических характеристик транспортных и пешеходных потоков с использованием программно-аппаратного комплекса *RTF-Road traffic flows*¹ (примеры картограмм представлены на рисунках 2 и 3). Измерительная дискретность устанавливалась кратной 10 световым циклам в различные суточные фазы.

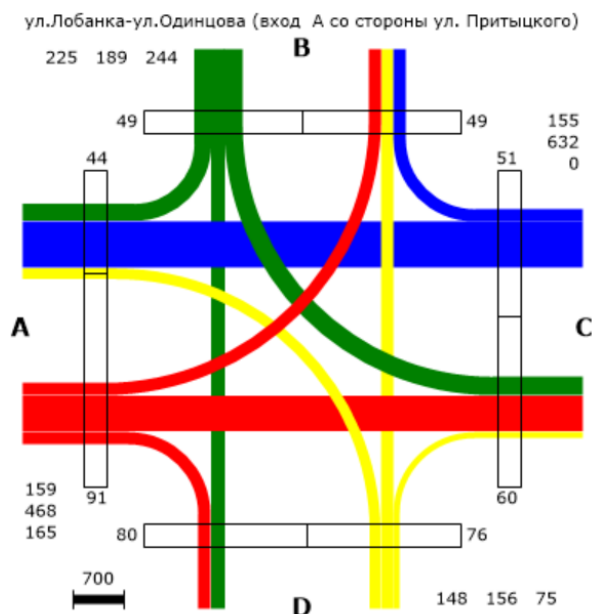


Рисунок 2. – Картограмма интенсивности движения на пересечении ул. Лобанка – ул. Одинцова

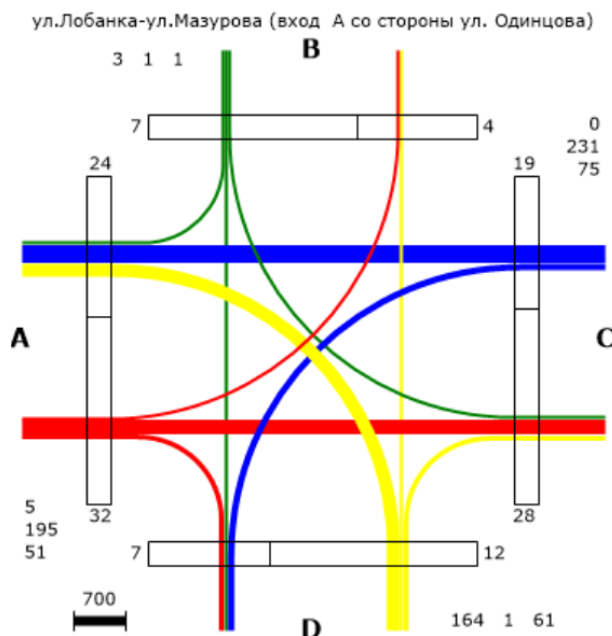


Рисунок 3. – Картограмма интенсивности движения на пересечении ул. Лобанка – ул. Мазурова

¹ RTF-Road traffic flows: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 222 / Д.В. Капский, Д.В. Мозалевский, В.Н. Кузьменко и др. – Нац. центр интеллектуальной собственности, 2010.

Особое внимание в архитектуре исследования уделено мониторингу скорости профильных объектов МПТ (троллейбуса маршрута № 25 и автобуса № 140). Расчетный модуль выявил, что среднестатистическая скорость подвижного состава флуктуирует в критически широком коридоре – от 13,48 км/ч до 22,14 км/ч (рисунки 4). Аналитически зафиксированы anomalously высокие значения коэффициента вариации распределения скоростей ($Iv \approx 0,72...1,00$), что характеризует движение потока как высокотурбулентное и непредсказуемое.

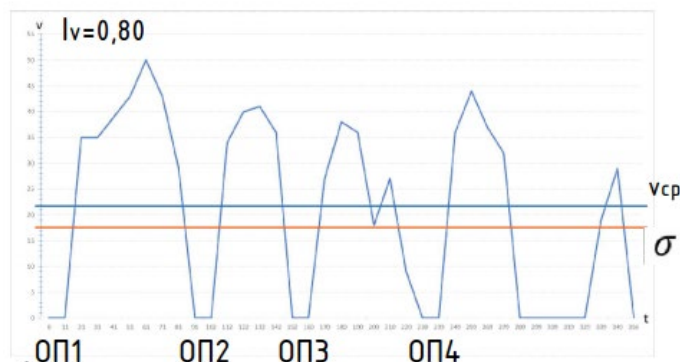


Рисунок 4. – Фрагмент измерения скорости движения методом «плавающего (в потоке) автомобиля»

Девияция и высокая дисперсия кинематики МПТ детерминируются следующими инфраструктурными дисфункциями:

1. Вынужденное броуновское маневрирование автобусов и троллейбусов в конгломерате плотного транзитного потока ввиду отсутствия обособленной (выделенной) полосы.
2. Динамическое замедление у линейных остановочных пунктов, лишенных изолированных заездных карманов (осуществление высадки/посадки сопряжено с перманентной блокировкой крайнего правого транзитного створа).
3. Тотальная запаркованность крайних правых полос на перегонных участках индивидуальным легковым транспортом.
4. Отсутствие аппаратного приоритета МПТ в структуре фазовых переходов светофорных контроллеров.

Комплексная квалиметрическая оценка функционального состояния рассматриваемых сегментов УДС выполнялась посредством монетизации физических потерь по запатентованным методикам. Экономические издержки ($P_{экон}$) рассчитывались как аддитивная функциональная зависимость от времени задержек транспортных средств (P_d), избыточных циклов остановки-разгона перед светофорными объектами (P_o) и задержек пешеходных потоков (P_{dn}). Итерационный расчет удельной транспортной задержки опирался на теорию массового обслуживания с применением уравнения Вэбстера, адаптированного под вероятностный характер пуассоновского прибытия транспортных единиц. Экологические издержки ($P_{экол}$) квантифицировались через расчет эмиссии газообразных поллютантов (M_0), приведенных к оксиду углерода, и уровня акустической диссипации. В качестве объектов рецепции вредного воздействия (потребителей) выделены: участники транспортного потока, пешеходы и резиденты прилегающих жилых образований. Расчет производился с учетом поправочных коэффициентов пространственного затухания звука, наличия фасадного экранирования и дендрологической абсорбции (озеленения).

Эмпирические результаты произведенной квалиметрии обнаружили критический масштаб социально-экономических непроизводительных затрат:

- На узле интерференции «ул. Лобанка – ул. Одинцова» агрегированные экономические потери, генерируемые непроизводительным простаиванием экономически активного населения в транспортных заторах, оцениваются в 1 426,1 тыс. у.е./год, тогда как экологический ущерб составляет порядка 500,0 тыс. у.е./год.
- На пересечении «ул. Шаранговича – ул. Горького» экономические издержки зафиксированы на уровне 1 300,7 тыс. у.е./год, экологические потери – 274,0 тыс. у.е./год.

Математический аппарат доказывает, что при достижении коэффициента загрузки полосы (фазы) значений, близких к порогу насыщения ($X > 0,85$), формируются нелинейно возрастающие скопления транспортных средств. На указанных участках частота циклов «торможение–ожидание–разгон» кратно увеличивала расход углеводородного топлива, выводя эмиссионные характеристики (по оксиду углерода, формальдегиду и акролеину) за пределы санитарно-гигиенических регламентов.

Синтез проектных решений. Для системного выявленных структурных дисфункций разработан инженерный алгоритм, методологическим стержнем которого выступает сегрегация транзитно-целевых потоков и введение жесткого инфраструктурного приоритета МПТ. Фундаментальным научным требованием здесь выступает принцип синергии: геометрическая трансформация узлов императивно обуславливает потребность

перерасчета пропускной способности (величин потоков насыщения, qH и перераспределения долей эффективного разрешающего сигнала (λ) в архитектуре светофорных циклов.

Империческая реаллокация пространства: выделенные полосы МПТ. Разработан протокол обособления полосы для маршрутного транспорта (обозначение линейной разметкой 1.23 «А» и комплексом знаков 5.9.1) на протяжении базисного полигона «ул. Лобанка – ул. Горького» в соответствии с действующими нормативами и рекомендациями (рисунок 5)²[15]. Пространственно-планировочный резерв для данной реаллокации образуется за счет интеграции двух факторов:

- радикальной элиминации стохастического паркования в первой полосе посредством установки предписывающих знаков 3.27 «Остановка запрещена» (перенос статической нагрузки на смежные межквартальные проезды);
- внедрения переразметки в створах приближения к узлам (где существующая ширина профиля позволяет осуществить переформатирование с 6 на 7 полос без масштабного сноса бортового камня).



Рисунок 5. – Фрагмент размещения выделенной полосы для МПТ

Модернизация топологии узла «ул. Лобанка – ул. Одинцова»

- деструкция (демаркировка) неактуальных геометрических параметров и перепланировка остановочных карманов с обеспечением плавных кривых заезда сочлененного подвижного состава МПТ;
- метрический пересмотр длительности фаз и матрицы пофазного разъезда с целью компенсации издержек, которые несет индивидуальный транспорт вследствие изъятия правой полосы под МПТ. Внедрение знаков направления движения по полосам (5.10.3).

Реконструктивный паттерн узла «ул. Лобанка – ул. Мазурова»

- интеграция направляющих островков безопасности физического типа (в бордюрном камне) на входах С и D для кинематического разделения конфликтующих векторов движения и формирования буферных зон пешеходного трафика;
- пространственное смещение островка на входе А к геометрическому центру пересечения с синхронным добавлением консольных стоек для установки светофорных секций Т.1.л;
- алгоритмическая изоляция левого поворота: формирование бесконфликтной защищенной фазы для блокирования фронтально-попутных инцидентов (маркировка линиями 1.1 и 1.18.2).

Топологическая трансформация «ул. Шаранговича – ул. Горького» Сложная многолучевая топология перекрестка с 5-фазным циклом (длительность цикла $T_c = 90$ с генерировала чрезмерный экологический ущерб из-за задержек.

Развертывание симметричной системы треугольных направляющих островков на всех входах, обеспечивающих принудительное канализирование правоповоротных потоков без въезда в центральную зону узла. Расширение входов для обособления маневров МПТ в отдельных каналах, минимизирующее помехи со стороны индивидуального автотранспорта.

Технико-экономическая верификация инфраструктурных интервенций. Ожидаемое улучшение макропараметров моделировалось через пересчет коэффициентов аварийной конфликтности. Формирование выделенных полос МПТ (как инструмента подавления турбулентности) и физическое канализирование маневров, согласно калибровочным таблицам теории потерь, способно снизить количество пересечений траекторий и общую аварийность на сложных узлах на 40–50%. Инфраструктурный проект покрывает собственные затраты всего за 4 месяца эксплуатации (в таблице приведен пример расчета для одного объекта).

² Технические средства организации дорожного движения. Правила применения: СТБ 1300-2024. – Взамен 1300-2014; введ. 01.04.2025. – Минск: Госстандарт, 2024. – 124 с.

Таблица. – Потери на пересечении ул. Шарановича – ул. Горецкого

Показатель	Индекс	Размерность	Значение	Сумма
Потери экономические при сущ. ОДД	$P_{экон1}$	у.е./год	1300759,3	1574776,9
Потери экологические при сущ. ОДД	$P_{экол1}$	у.е./год	274017,6	
Потери экономические при предл. ОДД	$P_{экон2}$	у.е./год	1193952,1	1394692,7
Потери экологические при предл. ОДД	$P_{экол1}$	у.е./год	200740,6	

Заключение. Внедрение квалиметрического математического аппарата и инструментария теории потерь при аудите функционирования улично-дорожной сети доказывает, что системный кризис пропускной способности современных мегаполисов подлежит разрешению не путем безграничного расширения дорожного полотна, а посредством прецизионного инженерного реинжиниринга и алгоритмизации.

Представленное исследование, базирующееся на данных магистралей Фрунзенского района г. Минска, научно доказывает уязвимость гетерогенных потоков. Интеграция большегрузного и маршрутного пассажирского транспорта в плотный индивидуальный поток легковых автомобилей обуславливает критический рост дисперсии скоростей (I_v в диапазоне 0,72–1,00). Подобная кинематическая энтропия является главным генератором попутных столкновений, а также инициатором аномальных объемов акустической и газовой эмиссии из-за перенасыщения участков циклами “stop-and-go”.

Доказано, что главным фактором высвобождения резервов эффективности УДС и минимизации издержек, выражающихся в огромных потерях экономически активного фонда времени населения, выступает пространственная приоритизация МПТ. Реаллокация геометрического ресурса – ликвидация стохастической прибордюрной запаркованности с введением выделенных полос МПТ – выводит маршрутный транспорт в режим ламинарного течения. Одновременное введение направляющих физических островков на перекрестках с пересчетом матриц светофорного управления экранирует транзитный поток от право- и левоповоротных конфликтов.

Верификация макроэкономического эффекта зафиксировала высокую результативность предложенных инфраструктурных мер. Минимизация капитальных вложений, достигаемая использованием существующих габаритов дороги за счет грамотного нанесения линий разметки и установки средств ОДД, приводит к тому, что инвестиции окупаются в сроки от 11 суток до 3 лет. Подобные показатели эффективности формируют убедительную доказательную базу для повсеместного перехода к концепции устойчивой, экологичной и алгоритмизированной транспортной среды, в которой абсолютный приоритет отдан массовому маршрутному перемещению пассажиров.

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. Маршрутный транспорт городов Полоцка и Новополоцка: эффективность и тенденции развития / Д.В. Капский, В.П. Иванов, Т.В. Вигерина и др. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2021. – 306 с.
3. Новая парадигма разработки проектных документов развития транспортных систем для городов разной крупности или многодесятилетнее выстраивание стадийности решения проблем развития и организации функционирования ТСГ (дискуссия № 6) / С.А. Ваксман, Ф.Г. Глик, П.В. Зюзин [и др.] // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XXV Междунар. (двадцать восьмой Екатеринбургской) науч.-практ. конф. / Екатеринбург (16–17 июня 2019 г.). – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2019. – Т. 1. – С. 18–47.
4. Ярошевич В.К., Седюкевич В.Н., Капский Д.В. Оценка экологических потерь при организации автомобильных перевозок // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2006. – № 5. – С. 61–62.
5. Kapski D., Semchenkov 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
6. Identification of key route indicators to compare different modes of transport / D. Kapski, S. Semchenkov, M. Korolchuk et al. // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 03017. DOI: 10.1051/bioconf/202414503017
7. Изменение параметров городской транспортной системы при введении платы с владельцев автомобилей за использование улично-дорожной сети и варьировании стоимости проезда в общественном транспорте / Д.А. Захаров, Е.М. Чикишев, Д.В. Капский и др. // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 4. – С. 336–344. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-4-336-344
8. Eco-efficient and environmentally sustainable prioritization of urban passenger transport movement / S.V. Skirkovsky, D.V. Kapski, B. Sattivaldiyev et al. // E3S Web of Conferences. – 2025. – Vol. 646. – P. 00051. DOI: 10.1051/e3sconf/202564600051
9. Капский, Д. В. Методологические основы создания системы повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности в Республике Беларусь / Д. В. Капский // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2009. – № 6. – С. 81–88. – EDN WXONBB.
10. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
11. Капский Д.В. Методология повышения качества дорожного движения. – Минск: БНТУ, 2018. – 370 с.
12. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
13. Капский Д.В. Организация дорожного движения. Аварийность: анализ, оценка, прогнозирование: учеб.-метод. пособие. – Минск: БНТУ, 2023. – 439 с.
14. Ibrayev K., Kapskiy D., Bogdanovic S. Ways to Improve Road Safety Audit in the Republic of Kazakhstan // Science and Technique. – 2021. – Vol. 20, No. 1. – P. 45–51. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-1-45-51

15. Кот Е.Н., Капский Д.В., Коржова А.В. Технические средства организации дорожного движения. – Минск: БНТУ, 2016. – 239 с.

Поступила 02.07.2026

**INFRASTRUCTURE PRIORITIZATION OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT
AS A PATTERN FOR MINIMIZING MACROECONOMIC LOSSES**

A. KORZHOVA¹, V. IVANOV², A. BAKHANOVICH^{1,3}, O. SONICH¹, D. MOZALEVSKY¹

(¹Belarusian National Technical University (BNTU),

BNTU Branch "Research Polytechnic Institute",

Research and Testing Center for Vehicles, Minsk;

²Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;

³Ministry of Education of the Republic of Belarus, Minsk)

This article examines the issue of improving the performance of public transport in the context of limited road network capacity. Using traffic qualimetry and loss theory, a topographic accident audit and analysis of the hydrodynamic parameters of traffic flows on the main road network of the Frunzensky District of Minsk were conducted. A set of engineering solutions was synthesized, including geometric channelization of nodes, the organization of dedicated lanes, and the adaptation of traffic light control algorithms. The economic feasibility of the proposed concept was verified by calculating the reduction in traffic delays and environmental emissions, confirming the high investment return on infrastructure modifications.

Keywords: *public transport, dedicated lane, traffic management, loss theory, traffic delay, environmental damage, traffic qualimetry, capacity, geometric channelization.*

УДК 656.015

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-55-58

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ТРАМВАЙНЫХ ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ

А.А. КУСТЕНКО, д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Проведен сравнительный анализ двух основных типов трамвайных остановочных пунктов (ОП), применяемых в городской улично-дорожной сети г. Минска: ОП с посадкой с проезжей части (ОП-1) и ОП с огражденной посадочной площадкой на середине проезжей части при совмещенном движении трамвая и транспортного потока (ОП-2). На основе натурных экспериментальных исследований получена регрессионная модель времени простоя трамвая на ОП. Выявлены принципиальные различия в динамике посадки-высадки пассажиров, в том числе установлена зависимость времени простоя от соотношения потоков посадки и высадки для ОП-1. Разработаны дифференцированные коэффициенты корректировки нормативного времени простоя. Сформулированы рекомендации по выбору типа ОП с учетом градостроительных условий, требований безопасности и необходимости применения светофорного регулирования.

Ключевые слова: трамвай, остановочный пункт, время простоя, пассажирообмен, безопасность, светофорный объект, коэффициент корректировки, посадочная площадка.

Введение. Остановочный пункт является ключевым элементом трамвайной инфраструктуры, непосредственно определяющим как эксплуатационные показатели (скорость сообщения, соблюдение расписания), так и уровень безопасности пассажиров и участников дорожного движения. Конструктивное решение ОП обуславливает порядок посадки-высадки пассажиров, характер взаимодействия трамвайного вагона с окружающими транспортными потоками и, в конечном счете, время простоя подвижного состава.

Цель исследования – сравнительный анализ двух типов трамвайных остановочных пунктов г. Минска (ОП-1 и ОП-2) и разработка практических рекомендаций по их применению с учетом требований безопасности и эффективности движения.

Основная часть. Экспериментальные исследования проводились на ОП трамвайной сети г. Минска с применением метода видеофиксации. В исследовании рассматривались трамваи с тремя дверями (тип АКСМ-601): двумя двухпоточными и одной однопоточной. Фиксировалось суммарное количество вошедших и вышедших пассажиров; время отсчитывалось от момента полной остановки трамвая до начала трогания с места.

Объектом наблюдения служили все ОП трамвайной сети г. Минска. Суммарный объем выборки составил 1284 измерения. На основании данных регрессионного анализа получена линейная модель зависимости времени простоя трамвая на ОП от суммарного пассажирообмена [1–3]:

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

где $t_{\text{оп}}$ – время простоя трамвая на ОП, с;

$Q_{\text{пас.об}}$ – суммарный пассажирообмен (вошедшие + вышедшие пассажиры), пасс.;

0,508 – коэффициент регрессии, с/пасс.;

9,96 – свободный член, соответствующий технологическому времени открытия и закрытия дверей, с.

Важный результат натурных наблюдений – выявление существенных различий в динамике посадки-высадки пассажиров в зависимости от типа ОП и соотношения интенсивности потоков посадки и высадки. Эти различия послужили основой для разработки дифференцированных коэффициентов корректировки, рассматриваемых ниже.

На трамвайной сети г. Минска при совмещенном движении трамвая и автотранспорта выделяются два основных типа ОП, различающихся конструктивным решением и способом организации посадки-высадки пассажиров:

тип 1 – ОП с посадкой с проезжей части (далее – ОП-1): пассажиры ожидают трамвай на тротуаре и выходят на проезжую часть непосредственно в момент остановки вагона;

тип 2 – ОП с огражденной посадочной площадкой на середине проезжей части при совмещенном движении трамвая и транспортного потока (далее – ОП-2): физически выделенная островковая платформа располагается на раздельительной полосе или специально организованном «кармане» в центре проезжей части.

ОП-1 – это обозначенная остановка без физически выделенной посадочной платформы. Пассажиры ждут трамвай на тротуаре или обочине и выходят на проезжую часть уже в момент остановки вагона. Там, где трамвайный путь совмещен с общим транспортным потоком, зоны ожидания пассажиров и движения автомобилей никак не разделены – отсюда характерные риски для всех участников дорожного движения.

Из конструктивных особенностей ОП-1 стоит отметить: отсутствие физических ограждений и посадочной платформы; посадка и высадка происходят с уровня проезжей части; пассажирам приходится пересекать

полосы движения автотранспорта; наконец, попутные автомобили могут занимать пространство в зоне трамвайной остановки.

Экспериментальные исследования на ОП-1 показали, что время простоя трамвая принципиально зависит от соотношения потоков посадки и высадки. В этом его принципиальное отличие от ОП-2.

Здесь можно выделить три характерных сценария.

Сценарий 1: высадка преобладает над посадкой. В этом случае время простоя на ОП-1 оказывается меньше, чем на сопоставимой ОП-2. Это объясняется тем, что пассажиры, выходящие из трамвая, не ограничены размерами посадочной площадки и свободно расходятся по проезжей части, не создавая пробок у дверей. Отсутствие физического ограждения устраняет «бутылочное горлышко», которое возникает на ОП-2 там, где ширина платформы замедляет рассредоточение пассажиров. В итоге высадка завершается быстрее, а трамвай трогается раньше.

Сценарий 2: посадка преобладает над высадкой. Здесь картина обратная: время простоя на ОП-1 больше, чем на ОП-2. Пассажиры ожидают трамвай на тротуаре и выходят на проезжую часть только после того, как трамвай прекратил движение, – вагон простаивает, пока люди добираются от тротуара до дверей. Вместе с тем есть и компенсирующий момент: двигаясь к трамваю по проезжей части, пассажиры заранее видят, насколько загружена каждая дверь, и распределяются по ним равномернее. Это сокращает время посадки по сравнению с ситуацией, когда выбор двери происходит уже на платформе в условиях высокой плотности ожидающих.

Сценарий 3: посадка и высадка приблизительно равны. При сбалансированном пассажирообмене время простоя на ОП-1 статистически не отличается от времени простоя на ОП-2. Пока одна группа пассажиров выходит из трамвая, другая – те, кто ждал на тротуаре, – успевает выйти на проезжую часть и подойти к дверям вагона. Задержки посадки не возникает: процессы завершаются практически одновременно.

ОП-1 характеризуется наиболее высоким уровнем потенциальной опасности для пассажиров. Среди ключевых факторов риска:

- выход пассажиров на проезжую часть. И при посадке, и при высадке людям приходится пересекать полосы движения автотранспорта. Это создает конфликтные ситуации с попутным транспортом [4];

- высота ступеней при посадке в трамвай. Если подвижной состав не является низкопольным, пассажиры вынуждены преодолевать значительную высоту подъема при посадке с уровня проезжей части (ниже, чем уровень посадочной платформы), что повышает риск падения и создает барьеры для маломобильных групп населения (МГН).

Для ОП-1 необходимо применение дифференцированного коэффициента корректировки $K_{оп}$, учитывающего соотношение потоков посадки и высадки:

$$t_{оп} = K_{оп} \cdot (0,508 \cdot Q_{пос.об} + 9,96), \text{ с.} \quad (2)$$

Значение $K_{оп}$ принимается в зависимости от соотношения $Q_{пос}/Q_{выс}$ (таблица 1).

Таблица 1. – Коэффициенты корректировки времени простоя для ОП-1

Соотношение потоков	$K_{оп}$	Физическое обоснование	Примечание
$Q_{выс} > Q_{пос}$ (высадка преобладает)	0,90–0,95	Отсутствие ограждения ускоряет рассредоточение высаживающихся; нет «бутылочного горлышка»	Время простоя меньше, чем на ОП-2
$Q_{пос} \approx Q_{выс}$ (сбалансированный обмен)	1,00–1,10 (рек. 1,05)	Процессы посадки и высадки синхронизированы; подходящие пассажиры успевают занять место у дверей	Статистически не отличается от ОП-2
$Q_{пос} > Q_{выс}$ (посадка преобладает)	1,05–1,15 (рек. 1,10)	Трамвай ожидает пассажиров с тротуара; компенсируется лучшим распределением по дверям	Время простоя больше, чем на ОП-2

ОП-2 представляет собой физически выделенную островковую платформу, располагаемую на разделительной полосе или специально организованном «кармане» в центре проезжей части. Платформа ограждена бордюром или барьерным ограждением и обеспечивает пассажирам защищенную зону ожидания. Данный тип ОП применяется на улицах, где трамвайный путь проходит по оси проезжей части совместно с автомобильным движением, и ширина поперечного профиля позволяет разместить посадочный островок.

Конструктивное решение ОП-2 обеспечивает физическое разделение ожидающих пассажиров и транспортного потока, однако не исключает их взаимодействия: пассажиры вынуждены пересекать полосы движения при подходе к платформе и после высадки с нее.

Конструктивные особенности ОП-2: платформа физически отделена от проезжей части бордюром или металлическим ограждением; посадка и высадка происходят с уровня платформы, поэтому перепад высот при входе в вагон меньше. При этом площадь платформы ограничена, и чтобы добраться до нее или уйти после высадки, пассажирам приходится пересекать полосы движения, как правило, по пешеходному переходу или при светофорном регулировании.

Сам процесс посадки-высадки на ОП-2 более предсказуем, чем на ОП-1: пассажиры уже находятся на платформе и не тратят время, чтобы выйти с тротуара. Это дает стабильное время простоя, которое практически не зависит от соотношения $Q_{\text{пос}}/Q_{\text{выс}}$ – в отличие от ОП-1, где это соотношение играет принципиальную роль.

Однако у ОП-2 есть свой ограничивающий фактор: ширина посадочной платформы сдерживает скорость рассредоточения выходящих пассажиров. При интенсивной высадке ($Q_{\text{выс}} > Q_{\text{пос}}$) возникает эффект «бутылочного горлышка» в зоне выхода: пассажиры вынуждены двигаться по ограниченному пространству платформы и не могут быстро рассредоточиться. В результате время высадки на ОП-2 при доминировании выходящего потока оказывается больше, чем на ОП-1.

Дополнительным фактором задержки является скопление пассажиров вблизи дверей при высокой плотности ожидающих на ограниченной по площади платформе: посадочный пассажиропоток не всегда успевает оптимально распределиться по входным дверям, что увеличивает неравномерность нагрузки на отдельные двери и суммарное время посадки. Это принципиально отличает ОП-2 от ОП-1, где пассажиры имеют возможность заблаговременно выбрать наименее загруженную дверь при подходе к вагону.

Благодаря физическому ограждению зоны ожидания ОП-2 обеспечивает значительно более высокий уровень безопасности по сравнению с ОП-1. Пассажиры, находящиеся на платформе, защищены от бокового контакта с транспортными средствами. Посадка осуществляется с уровня платформы, что уменьшает перепад высот по сравнению с посадкой с проезжей части, снижая риск падения и облегчая доступ для МГН.

Тем не менее ОП-2 не лишен уязвимых точек с точки зрения безопасности. Конфликты с автотранспортом возникают в момент перехода пассажиров от тротуара к платформе и обратно. При отсутствии пешеходного перехода или светофорного регулирования в зоне подхода к ОП-2 пассажиры вынуждены пересекать потоки движущегося транспорта. Для ОП-2 вводится коэффициент корректировки K_2 , учитывающий специфику посадки-высадки с ограниченной платформы при совмещенном движении (таблица 2).

Таблица 2. – Составляющие коэффициента корректировки времени простоя для ОП-2

Составляющая $K_{\text{оп}}$	Значение	Обоснование
Влияние ширины платформы на скорость рассредоточения (при $Q_{\text{выс}} > Q_{\text{пос}}$)	1,00–1,05	Ограниченная площадь платформы замедляет высадку
Влияние уровня платформы (снижение высоты подъема)	0,97–1,00	Платформа уменьшает перепад высот при посадке
Доступность для МГН	1,00–1,03	Частичное повышение доступности по сравнению с ОП-1

Проведенный анализ позволяет систематизировать различия между двумя типами ОП в отношении времени простоя трамвая, уровня безопасности и условий доступности. Главный вывод здесь: однозначного «лидера» по времени простоя среди рассматриваемых типов нет. Какое решение окажется эффективнее, зависит от конкретного соотношения потоков посадки и высадки на конкретной остановке (таблица 3).

Таблица 3. – Сравнительная характеристика типов ОП по времени простоя и безопасности

Сценарий пассажирообмена	Преимущество
Высадка > Посадки	ОП-1 по времени простоя. ОП-2 по безопасности
Посадка ≈ Высадке	Равноценны по времени. ОП-2 по безопасности
Посадка > Высадки	ОП-2 по времени простоя. ОП-2 по безопасности
Безопасность (риск)	ОП-2 по безопасности

ОП-1 показывает наименьшее время простоя, когда пассажиры в основном выходят: отсутствие ограждения дает им возможность свободно разойтись по проезжей части, процесс идет быстрее. Когда преобладает посадка, ОП-1 уступает ОП-2: пассажирам сначала нужно выйти с тротуара на проезжую часть, что добавляет время ожидания, хотя частично потери компенсируются тем, что люди лучше распределяются по дверям вагона. В сбалансированном режиме время простоя на ОП-1 и ОП-2 статистически неразличимо.

ОП-2 обеспечивает наиболее стабильное и предсказуемое время простоя, что важно для планирования расписания. При доминировании высадки ОП-2 проигрывает ОП-1 вследствие эффекта «бутылочного горлышка» на платформе.

Заключение. Динамика посадки-высадки на ОП-1 зависит от соотношения $Q_{\text{пос}}/Q_{\text{выс}}$. При доминировании высадки время простоя на ОП-1 оказывается меньше, чем на ОП-2, вследствие свободного рассредоточения пассажиров по проезжей части. При доминировании посадки – больше из-за ожидания выхода пассажиров с тротуара, хотя частично компенсируется улучшенным распределением по дверям. В сбалансированном режиме показатели ОП-1 и ОП-2 статистически не отличаются.

При совмещенном движении трамвая и автотранспорта оптимальным решением является ОП-2 с огражденной посадочной площадкой. Рекомендуется применять ОП-2 на всех магистральных улицах, где ширина поперечного профиля позволяет разместить посадочный островок.

В исторически сложившейся застройке или в случаях, когда технические и градостроительные условия не позволяют разместить посадочную платформу, допускается применение ОП-1. Для обеспечения безопасности пассажиров при ОП-1 обязательным условием является временное разделение трамвайного и автомобильного движения с применением светофорного регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. DOI: 10.52928/2070-1616-2025-52-2-26-33
2. 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. DOI: 10.20291/1815-9400-2025-2-22-28
3. 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 Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова / Воронеж (24–25 апр. 2025 г.). – Воронеж, 2025. – С. 171–184. DOI: 10.58168/MSTT2025_171-184
4. 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 17.07.2026

COMPARATIVE ANALYSIS OF TRAM STOP DESIGNS

A. KUSTENKO, D. KAPSKI
(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article presents a comparative analysis of two main types of tram stops used in the urban street-road network of Minsk: stops with boarding from the roadway (Stop Type 1) and stops with an enclosed boarding platform in the middle of the roadway under mixed tram and traffic flow conditions (Stop Type 2). Based on field experimental studies, a regression model of tram dwell time at stops was developed. Fundamental differences in passenger boarding and alighting dynamics were identified, including an established dependency of dwell time on the ratio of boarding and alighting passenger flows for Stop Type 1. Differentiated correction coefficients for the standard dwell time were developed. Recommendations for selecting the stop type were formulated, taking into account urban planning conditions, safety requirements, and the need for traffic signal regulation.

Keywords: tram, stop, dwell time, passenger exchange, safety, traffic signal, correction coefficient, boarding platform.

УДК 656.015

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-59-63

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТРАМВАЯ В УСЛОВИЯХ СОВМЕСТНОГО ГОРОДСКОГО ТРАФИКА

*А.А. КУСТЕНКО, д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Разработан и обоснован комплекс математических моделей, образующих замкнутый контур автономного управления трамваем в условиях смешанного городского трафика. На основе коэффициента синхронизации светофорных фаз предложены оригинальные формализации четырех иерархических уровней управления: многомодальной системы восприятия (L1), оптимального планирования скорости методом динамического программирования (L2), нечеткого ситуационного принятия решений по алгоритму Мамдани (L3) и адаптивного приоритетного управления светофорным регулированием через интерфейс V2I (L4).

Ключевые слова: автономный трамвай, коэффициент синхронизации светофорных фаз, расширенный фильтр Калмана, динамическое программирование, функциональная безопасность, приоритетное управление СФО.

Введение. Современные тенденции в области городского электрического транспорта свидетельствуют о постепенном переходе от экспериментальной отработки технологий беспилотного управления к формированию соответствующей нормативно-правовой базы.

Цель настоящей работы – разработка математического аппарата для автономного управления трамваем, который объединяет в единый контур восприятие обстановки, планирование маршрута, принятие решений и воздействие на светофорные объекты (СФО). Сквозным параметром, связывающим все эти этапы, выступает величина η_c .

Основная часть. Автономный трамвай – это рельсовое транспортное средство, которое способно самостоятельно проехать весь маршрут: от отправления с начальной остановки до прибытия на конечную. Он должен управлять скоростью, реагировать на дорожную обстановку, взаимодействовать со светофорами и следить за безопасностью пассажиров.

Трамвай отличается от беспилотных автомобилей на колесах тем, что его движение жестко привязано к рельсам. Благодаря этому его положение можно описывать не в двух измерениях, а вдоль одной линии – маршрута, что заметно упрощает задачи локализации и планирования траектории. Но взамен возникают свои сложности: трамваю приходится взаимодействовать со светофорами, пересечениями, пешеходными переходами и другими участниками городского движения, с которыми он делит пространство.

В основе системы лежат три ключевых принципа, первый из которых – иерархичность управления. Она предполагает разделение всей системы на четыре независимых уровня (L1–L4), каждый из которых работает через четко определенные интерфейсы с соседними уровнями. Второй – информационная связность – единый сквозной параметр η_c (коэффициент синхронизации светофорных фаз) проходит через все уровни, обеспечивая согласованность решений. Третий – замкнутость контура – результат воздействия на объект (изменение скорости, запрос приоритета) возвращается в систему как новые данные для следующего цикла управления.

Система автономного управления трамваем организована в виде четырех иерархических уровней, каждый из которых работает на своем временном горизонте и решает свою функциональную задачу (таблица).

Таблица. – Иерархические уровни

Уровень	Название	Временной горизонт	Основная задача
L1	Восприятие среды	10–100 мс (реальное время)	Слияние данных сенсоров, оценка вектора состояния, построение карты занятости
L2	Планирование скорости	1–60 с (горизонт планирования)	Оптимальный профиль скорости для прохождения СФО на зеленый сигнал с минимальными затратами
L3	Принятие решений	0,1–1 с (ситуационный)	Выбор режима движения: сохранение, ускорение, торможение или запрос приоритета
L4	Взаимодействие с инфраструктурой (V2I Communication)	Цикл СФО (до 150 с)	Адаптивная коррекция фазового плана светофора через протокол V2I

Информационная база системы формируется гетерогенным набором датчиков и внешних источников данных:

1. LiDAR (лазерный дальномер): Точность $\sigma \approx 0,05\text{--}0,30$ м, частота 10–20 Гц. Основной источник для построения карты препятствий и точной локализации. Обеспечивает трехмерное сканирование ближней зоны (до 100–150 м).

2. Стереокамера: Точность $\sigma \approx 0,10\text{--}0,50$ м. Распознавание объектов (пешеходы, автомобили, знаки), семантическая сегментация дорожной сцены. Дополняет LiDAR при низкой отражательной способности объектов.

3. GNSS/IMU (спутниковая навигация + инерциальный модуль): Точность $\sigma \approx 2\text{--}5$ м, частота 10 Гц. Абсолютная привязка к карте маршрута, оценка скорости и ориентации. Ненадежен в тоннелях и под мостами – компенсируется LiDAR.

4. Радиолокатор (радар): Точность $\sigma \approx 0,50\text{--}2,00$ м. Обнаружение объектов в условиях тумана, дождя, снега, когда LiDAR и камера деградируют. Основной датчик для экстренного торможения.

5. V2I-приемник (ETSI ITS-G5): Прием сигналов от светофорных объектов: текущая фаза, оставшееся время, параметры цикла. Единственный источник данных для расчета η_c и формирования запроса приоритета.

Все четыре уровня управления работают с единым вектором состояния трамвая, который непрерывно обновляется уровнем L1:

$$X(t) = [x(t), v(t), a(t), \eta_c(t), d_{\text{ост}}(t), \Delta\tau(t)]^T,$$

где $x(t)$ – позиция вдоль маршрута, м;

$v(t)$ – скорость, м/с;

$a(t)$ – ускорение, м/с²;

$\eta_c(t)$ – математическое ожидание коэффициента синхронизации светофорных фаз (рассматривается как стохастическая величина, имеющая нормальное распределение, дисперсия которой пересчитывается в матрице ковариации фильтра Калмана по мере движения);

$d_{\text{ост}}(t)$ – расстояние до ближайшего СФО, м;

$\Delta\tau(t)$ – отклонение от расписания, с.

T – знак транспонирования (т.к. вектор состояния — это вектор-столбец);

Вектор $X(t)$ является «общим языком» системы: каждый уровень читает из него нужные компоненты и записывает результаты своей работы обратно, обеспечивая согласованность всех подсистем в реальном времени.

Центральным связующим параметром всей архитектуры является безразмерный коэффициент синхронизации светофорных фаз $\eta_c \in [0, 1)$.

Физический смысл: η_c показывает, в какой момент фазового цикла светофора (длительностью C секунд) прибывает трамвай. Значение $\eta_c = 0$ означает прибытие в самом начале цикла; $\eta_c = 1$ – в конце. Если $\eta_c < \lambda$ (где λ – доля зеленого сигнала в светофорном цикле), трамвай проходит на зеленый; если $\eta_c \geq \lambda$ – вынужден остановиться [1].

Роль η_c на каждом уровне управления:

- L1: вычисляется по данным V2I и GNSS как компонента вектора состояния.
- L2: определяет необходимую корректировку скорости через управляющее соотношение $\Delta\mu$.
- L3: является входной переменной нечеткого контроллера для выбора режима движения.
- L4: служит основанием для инициирования запроса приоритета к контроллеру СФО.

Ввиду различной динамики физических процессов, уровни иерархии функционируют асинхронно. Полный комплекс алгоритмов автономного управления включает следующие этапы:

Шаг 1. Сбор данных (L1): Все датчики (LiDAR, камера, GNSS, радар, V2I) одновременно формируют измерения. Время цикла: 50–100 мс.

Шаг 2. Слияние данных и оценка состояния (L1): Расширенный фильтр Калмана (EKF) объединяет разнородные измерения в единый вектор состояния $X(t)$ с оптимальными весами. Карта занятости обновляется по правилу Байеса.

Шаг 3. Прогноз η_c и планирование скорости (L2): На горизонте $Th = 60$ с методом динамического программирования вычисляется оптимальный профиль скорости $v(t)$, минимизирующий задержки, расход энергии и отклонение от расписания.

Шаг 4. Ситуационное принятие решений (L3): Нечеткий контроллер Мамдани анализирует три входа (η_c , $\Delta\tau$ (отклонение от расписания в секундах), $P_{\text{риск}}$ (вероятность столкновения с препятствием)) и формирует команду управления: сохранить скорость, ускорить, затормозить или запросить приоритет. Непрерывная дефазификация обеспечивает плавное управление. Непрерывная дефазификация (работающая с высокой частотой 20–50 Гц) обеспечивает плавное реактивное управление.

Шаг 5. Воздействие на объекты (L4 + исполнители): При необходимости по протоколу V2I отправляется запрос приоритета к контроллеру СФО. Тяговый привод и тормозная система получают команды от L3. Сместение фазы $\Delta t_{\text{тр}}$ рассчитывается с учетом интересов автомобильного потока. Команды обновляются адекватно

текущим требованиям безопасности (до 50 раз в секунду), тогда как запрос V2I (уровень L4) пересчитывается с тактом 1 с.

Шаг 6. Обратная связь: Результат исполненных команд (новые показания датчиков) возвращается на Шаг 1. Оценка η_c обновляется через замкнутый контур фильтра Калмана

Автономный трамвай относится к объектам повышенной опасности, поэтому требования безопасности заложены в архитектуру системы на каждом уровне.

Аппаратная избыточность обеспечивается тремя независимыми вычислительными каналами, которые работают параллельно и решают одни и те же задачи в реальном времени. Каналы физически и логически изолированы друг от друга, поэтому неисправность в одном из них не может перекинуться на соседние подсистемы – именно этим архитектура принципиально отличается от простого дублирования. Каждый канал самостоятельно вырабатывает управляющее решение (например, о необходимости экстренного торможения), после чего результаты поступают в модуль голосования.

Архитектура «2 из 3» (2oo3, two-out-of-three) построена на детерминированном мажоритарном принципе: итоговая команда формируется только тогда, когда совпадают результаты минимум двух каналов из трех. Это дает сразу два важных свойства. Первое – отказоустойчивость: если один канал выходит из строя, оставшиеся два продолжают формировать согласованное решение. Второе – защита от ложных срабатываний: неисправный канал не может в одиночку навязать опасное решение, потому что для этого структурно нужно большинство. Получается, что архитектура 2oo3 закрывает сразу две противоположные по сути задачи надежности – устойчивость к отказам на срабатывание и устойчивость к ложным срабатываниям.

Уровень L1: многомодальная система восприятия. Трамвай оснащен набором разных по типу датчиков. У каждого своя погрешность и своя частота обновления данных, поэтому чтобы они работали слаженно, нужен интеллектуальный алгоритм слияния данных.

Эту роль выполняет расширенный фильтр Калмана [2]. Он работает в два этапа: сначала предсказывает положение трамвая на основе физической модели движения, а затем уточняет это предсказание по данным, поступающим с датчиков. При этом алгоритм сам учитывает точность каждого источника – чем надежнее датчик, тем больший вес получают его показания. При исправной работе датчиков, хороших GNSS-поправках и контрастных оптических ориентирах такое слияние данных позволяет добиться точности локализации 9–10 см – для сравнения, одна лишь спутниковая навигация дает погрешность до трех метров.

Пространство перед трамваем разбито на ячейки размером 0,5×0,5 м, и для каждой из них рассчитывается вероятность наличия препятствия. Эта вероятность постоянно пересчитывается по мере поступления новых данных, и как только она превышает заданный порог, ячейка помечается как занятая, и система подает сигнал тревоги. Если пешеход появляется на рельсах в двадцати пяти метрах от трамвая, сигнал на экстренное торможение формируется уже через 0,1 с.

Уровень L2 рассчитывает такой профиль скорости, чтобы трамвай проходил ближайшие светофоры без остановок, укладывался в расписание и тратил на это минимум энергии. Система прогнозирует, в какой момент трамвай подъедет к каждому перекрестку, и проверяет, попадет ли он в зеленую фазу. Если нет – вычисляется небольшая коррекция скорости (ускорение или замедление), которая сдвигает момент прибытия в разрешенный интервал.

Для поиска оптимального решения на всем горизонте планирования используется метод динамического программирования Беллмана [3]: перебираются все варианты скоростного режима, и выбирается тот, что дает минимальные суммарные потери. При этом, несмотря на большое количество перебираемых вариантов, расчет укладывается меньше чем в 1 мс.

Уровень L3 построен на нечетком контроллере и каждые 0,1 с определяет текущий режим движения – ускорение, поддержание скорости, торможение или запрос приоритета на светофоре.

Логика принятия решений задается набором правил. Например: если трамвай опаздывает, а светофор вот-вот переключится – нужно ускориться; если впереди обнаружено препятствие с высокой вероятностью столкновения – тормозить немедленно; если трамвай укладывается в расписание и опасности нет – запросить приоритет у светофора. Итоговое управляющее воздействие вычисляется как взвешенное среднее всех сработавших правил, что обеспечивает плавность управления и исключает резкие рывки. Алгоритм Мамдани выбран несмотря на то, что он требует больше вычислений на этапе дефазификации по сравнению с моделями Сугено – но зато он дает лингвистически прозрачную базу правил, без которой невозможно ни проверить логику управления, ни сертифицировать систему по стандартам функциональной безопасности не ниже уровня SIL-3.

Каждое решение контроллера проверяет отдельный, независимый модуль функциональной безопасности [4]. Он рассчитывает минимально необходимый тормозной путь исходя из текущей скорости и сравнивает его с фактическим расстоянием до препятствия. Если запаса недостаточно, модуль принудительно задает режим экстренного торможения, полностью переопределяя вывод нечеткого контроллера.

Уровень L4 – это интерфейс между трамваем и светофорной инфраструктурой города. Если уровень L2 управляет скоростью самого трамвая, то уровень L4 обращается напрямую к контроллеру светофора с запросом сдвинуть начало зеленой фазы так, чтобы трамвай проехал без остановки. Величина сдвига ограничена пятнадцатью секундами в ту или иную сторону.

Любое изменение фазы затрагивает автомобильный поток на пересекающих направлениях. Чем больше запрошенный сдвиг – тем значительно возрастает задержка автомобилей, причем эта зависимость нелинейна: удвоение сдвига увеличивает задержку вчетверо. При высокой загрузке перекрестка запрос приоритета автоматически блокируется, чтобы не спровоцировать транспортный коллапс.

Компромисс между интересами трамвая и автомобильного потока регулируется весовым коэффициентом. При равных весах трамвай и автомобили равноправны; при повышенном приоритете трамвая акцент смещается в его пользу – что обосновано тем, что один трамвай перевозит до двухсот пятидесяти пассажиров против одного-двух в легковом автомобиле. Прогноз момента прибытия к светофору непрерывно уточняется с помощью фильтра Калмана, который учитывает текущую скорость, расстояние до перекрестка и параметры светового цикла [5; 6].

Заключение. В статье разработан целостный математический аппарат автономного управления трамваем, который охватывает полный цикл – от восприятия обстановки до планирования, принятия решений и воздействия на инфраструктуру. Предложенная четырехуровневая иерархическая архитектура (L1–L4) позволяет всем подсистемам работать согласованно благодаря единому сквозному параметру – коэффициенту синхронизации световых фаз η_c .

На уровне L1 расширенный фильтр Калмана справляется со стохастической неопределенностью и обеспечивает точность локализации до 0,09 м. На уровне L2 метод динамического программирования рассчитывает оптимальный скоростной профиль менее чем за 1 мс на горизонте планирования до 60 с и компенсирует случайные отклонения времени прибытия. Контроллер Мамдани на уровне L3 благодаря прозрачным и понятным правилам обеспечивает надежный выбор режима движения в конкретной ситуации, а адаптивный интерфейс V2I на уровне L4 реализует приоритетное управление световой фазой с учетом интересов всего смешанного транспортного потока.

Полученные результаты закладывают теоретическую основу для практической реализации и последующей сертификации систем автономного управления городским рельсовым транспортом. Актуальность этой задачи подтверждается текущими тенденциями в нормативно-правовом регулировании данной области.

По итогам исследования предложены:

1. Комплексная архитектура системы автономного управления движением трамвая, в которой контур управления разделен на четыре иерархических уровня – восприятие, планирование, принятие решений и взаимодействие с инфраструктурой. Разнородные вычислительные процессы объединены через единый сквозной параметр – вектор состояния с компонентой коэффициента синхронизации световых фаз (η_c), что обеспечивает информационную связность подсистем бортового алгоритма в условиях смешанного городского трафика.

2. Алгоритм оптимизации скоростного профиля автономного трамвая в реальном времени (уровень L2) на основе метода динамического программирования. Он адаптивно вычисляет корректирующие воздействия на основе стохастического прогноза прибытия к регулируемому пересечению, что позволяет снизить энергозатраты тягового привода и избежать вынужденных остановок перед светофорами, не нарушая при этом график движения.

3. Метод ситуационного принятия решений и контроля режимов движения (уровень L3), построенный на нечеткой логике Мамдани и мажоритарном принципе резервирования вычислений («2 из 3»). Отдельный модуль независимой оценки функциональной безопасности (не ниже уровня SIL-3) гарантирует, что при обнаружении динамических препятствий на рельсовом пути команды управления безусловно переопределяются в пользу экстренного торможения.

4. Математическая модель адаптивного приоритетного управления (уровень L4), которая использует протокол связи V2I для динамической коррекции световых циклов инфраструктуры. Благодаря механизму непрерывной оценки временных потерь смежных автомобильных потоков – с учетом нелинейной зависимости задержек от сдвига фаз – удается сбалансировать приоритет городского электротранспорта с необходимостью не допускать перегрузки перекрестков и транспортных заторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кустенко А.А., Капский Д.В., Ларин О.Н. Исследование влияния светового регулирования на эффективность трамвайного движения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 2. – С. 26–33. DOI: 10.52928/2070-1616-2025-52-2-26-33
2. Extended Kalman Filter Sensor Fusion in Practice for Mobile Robot Localization / A. Housein, G. Xingyu, W. Li et al. // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2022. – Vol. 13, № 2. – P. 25–34. DOI: 10.14569/IJACSA.2022.0130204
3. Research on Speed Planning and Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Bus in Green Wave Scenarios at Traffic Light Intersections Based on Deep Reinforcement Learning / F. Yi, W. Guo, H. Gong et al. // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, № 24. – Art. 11156. DOI: 10.3390/SU162411156
4. Maddiboyina H., Ponnappalli V. A. S. Mamdani fuzzy-based vehicular grouping at the intersection of roads for smart transportation system // International Journal of Embedded and Intelligent Systems. – 2019. – Vol. 7, № 2/3. – P. 263–285. DOI: 10.1504/IJIEI.2019.099100

5. Аналитическое прогнозирование оптимальной траектории движения мобильного робота / А.А. Лобатый, Д.В. Капский, А.К. Ибрагим и др. // Системный анализ и прикладная информатика. – 2022. – № 2. – С. 21–26. DOI: 10.21122/2309-4923-2022-2-21-26
6. Моделирование заторов с использованием данных от блютуз-датчиков о транспортном потоке / Д.В. Навой, А.А. Лобатый, Д.В. Капский и др. // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. / Липецк (20–21 апр. 2022 г.) – Липецк: Липец. гос. техн. ун-т, 2022. – С. 171–177.

Поступила 17.07.2026

MATHEMATICAL FOUNDATIONS OF AUTONOMOUS TRAM MOVEMENT CONTROL IN MIXED URBAN TRAFFIC

A. KUSTENKO, D. KAPSKI
(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article develops and substantiates a set of mathematical models forming a closed-loop autonomous tram control system in mixed urban traffic conditions. Based on the traffic light phase synchronization coefficient, original formalizations of four hierarchical control levels are proposed: a multimodal perception system (L1), optimal speed profile planning using dynamic programming (L2), fuzzy situational decision-making based on the Mamdani algorithm (L3), and adaptive priority control of traffic light regulation via the V2I interface (L4).

Keywords: autonomous tram, traffic light phase synchronization coefficient, Extended Kalman Filter, dynamic programming, SIL-3 functional safety, priority traffic light control.

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

В.А. ЗЕНЬКОВ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Предложена методика оценки разрешающей способности виброакустического диагностирования автомобильных агрегатов, связывающая повторяемость диагностического параметра, локальную чувствительность калибровочной зависимости и неопределенность определения структурного параметра. В качестве объектов контроля рассмотрены цилиндропоршневая группа и коренные подшипники двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Уточнено различие между эффективным шагом косвенного измерения и статистически подтвержденной различимостью состояний. Приведены предварительные расчетные оценки и сопоставление способов диагностирования по семи показателям. Установлены условия включения оценки зазора в процесс прогнозирования ресурса и переноса методики на другие автомобильные агрегаты.

Ключевые слова: автомобильный агрегат, виброакустическое диагностирование, зазор, разрешающая способность, неопределенность измерения, остаточный ресурс.

Введение. Переход к техническому обслуживанию автомобильных агрегатов по фактическому состоянию требует обоснования решений о продолжении их использования или ремонте. Регистрация повышенной вибрации свидетельствует об изменении динамического состояния объекта, однако сама по себе не определяет износ и остаточный ресурс. Для ресурсного диагностирования необходима последовательная связь измеряемого диагностического параметра P_d со структурным параметром (зазором) P_c в конкретном соединении и законом изменения этого зазора во времени. В обзоре [1] диагностика и прогнозирование рассматриваются как составляющие обслуживания по состоянию. Применительно к автомобильным двигателям принципиально различаются задачи обнаружения отклонения сигнала и определения физического параметра, ограничивающего ресурс. Руководство JCGM 100:2008¹ устанавливает общую основу ее выражения, а методы сравнения средних, систематизированные в справочнике NIST/SEMATECH², позволяют проверять различимость результатов повторных наблюдений. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего регламентированы ГОСТ Р 50779.22-2005³. Недостаточно исследованным в рассматриваемой постановке остается согласование метрологических характеристик косвенной оценки зазора с технологическим процессом ресурсного диагностирования. Высокая корреляция признака с износом еще не означает, что малое приращение зазора достоверно обнаруживается при повторной установке датчика. Аналогично, высокая балльная оценка универсальности способа не характеризует ошибку прогноза.

Цель работы – разработка оценки разрешающей способности и технического уровня виброакустического диагностирования, определяющей условия контроля зазоров и последующей оценки ресурса автомобильных агрегатов.

Методы исследования. Объектом исследования выступили соединения «поршень–цилиндр» и «коренная шейка коленчатого вала–коренной подшипник» двигателя внутреннего сгорания (ДВС) ЗМЗ-402. В исследовании судового дизеля зазор между поршнем и втулкой рассматривается как фактор вибрации цилиндропоршневой группы [2]. Данные соединения представляют два типа кинематических взаимодействий: возвратно-поступательное движение в цилиндре и вращательное в подшипнике. Были выбраны структурный параметр P_c – зазор в соединении, и диагностический параметр P_d – среднеквадратическое значение (RMS) виброускорения стенки корпусной детали. Были предусмотрены девять точек: четыре в зонах цилиндров и пять в зонах коренных опор. Зоны выбирали по чувствительности и повторяемости сигнала [3]; чувствительную ось датчиков ориентировали нормально к стенке корпусной детали. Соединения шатунных подшипников в количественную оценку не включались. Диагностическая система включала модули акселерометров ADXL345, устройство считывания на базе Arduino UNO и персональный компьютер для обработки и представления. Для обеспечения воспроизводимости результатов фиксировали частоту вращения коленчатого вала работающего ДВС, периодичность регистрации значений диагностических и структурных параметров, длительность измерения диагностического параметра. Сопоставление состояний проводилось для трех режимов работы ДВС с частотами

¹ Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100:2008 / Joint Committee for Guides in Metrology. – 2008. DOI: 10.59161/JCGM100-2008E

² NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. – 1.3.5.3. Two-Sample t-Test for Equal Means. – URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda353.htm> (дата обращения: 09.07.2026).

³ ГОСТ Р 50779.22-2005 (ИСО 2602:1980). Статистические методы: СТАТИСТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ: Точечная оценка и доверительный интервал для среднего – М.: Стандартинформ. 2005. – 11 с.

вращения коленчатого вала 800, 1500 и 3000 об/мин. Для каждого режима предусматриваются повторные измерения Π_d продолжительностью 10–12 с.

Основная часть. Применение разрабатываемого способа диагностирования автомобильных агрегатов требует ответа на вопрос: с какой разрешающей способностью по виброакустическому сигналу может быть определено изменение структурного параметра в контролируемом соединении? Для этого вводится понятие цены деления структурного параметра при диагностическом измерении.

Цена деления структурного параметра – минимально различимая длина отрезка числовой шкалы этого параметра, установленная с помощью выбранного диагностического параметра при заданном режиме работы агрегата и принятом уровне доверительной вероятности. В отличие от цены деления традиционного измерительного прибора, данная величина зависит не только от дискретности регистрации сигнала, но и от повторяемости измерений, шумов, способа крепления датчика и качества регрессионной модели.

Цена деления структурного параметра определялась путем проверки гипотезы об отнесении двух рядом расположенных центров распределений структурного параметра, относящихся к разным выборкам, с применением t -критерия [4]:

$$t = \frac{\overline{\Pi_{C1}} - \overline{\Pi_{C2}}}{\sqrt{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (1)$$

где $\overline{\Pi_{C1}}$ и $\overline{\Pi_{C2}}$ – сравниваемые центры распределения структурного параметра (выборочные математические ожидания);

n_1 и n_2 – количество измерений в выборках;

s_1 и s_2 – дисперсии распределений случайной величины в выборках.

Рассматривались два вида трущихся соединений с поступательным и вращательным движением деталей (цилиндропоршневая группа (ЦПГ) и коренные подшипники коленчатого вала) во время использования агрегата. Различение исправного состояния, масляного голодания и износа коренного подшипника по вибрационным данным исследовано в [5]. При расчете t -критерия принимался 5%-й уровень достоверности.

Измерения структурных параметров каждого вида соединений были совмещены с началом и концом испытаний, а также с промежуточными разборками двигателя. Результаты расчетов характеристик распределений структурных параметров приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. – Статистические характеристики распределений структурного параметра (зазора в ЦПГ)

Наработка, ч	Математическое ожидание, мм	Дисперсия, мм ²
0	0,025	0,00120
20	0,089	0,00280
40	0,200	0,00070
60	0,338	0,00025

Значения t -критерия при сопоставлении двух рядом расположенных центров распределения структурного параметра (зазоров между поршнем и цилиндром) составляют: первого со вторым – 17,57; второго с третьим – 3,25; третьего с четвертым – 2,44 (при табличном значении 2,78).

Таблица 2. – Статистические характеристики распределения структурного параметра (зазора в коренных подшипниках коленчатого вала)

Наработка, ч	Математическое ожидание, мм	Дисперсия, мм ²
0	0,036	0,00070
20	0,070	0,00025
40	0,130	0,00004
60	0,214	0,00590

Аналогичные расчеты t -критерия при сопоставлении двух рядом расположенных центров распределения структурного параметра (зазоров в коренных подшипниках коленчатого вала) составляют: первого со вторым – 6,95; второго с третьим – 7,10, третьего с четвертым – 2,18 (при табличном значении 2,57).

Цена деления структурного параметра Π_d принимается равной наибольшей разности его средних значений в двух независимых выборках, обусловленной разбросом повторных измерений:

$$\Pi_{dC} = \Pi_{C1} - \Pi_{C2}, \quad (2)$$

где Π_{C1} и Π_{C2} – значения структурного параметра в двух независимых выборках.

Приведенный подход исключает завышенную оценку точности, точности показаний, когда цифровое разрешение датчика оказывается существенно меньшим реального разброса регистрируемых вибросигналов.

Отличия расчетных экспериментальных и табличных значений t -критерия друг от друга косвенно характеризуют степень различия выборочных значений. Все полученные различия значимые, следовательно,

наибольшая разница значений самого структурного параметра в первых сопоставлениях (0,064 мм для ЦПГ и 0,034 для коренных подшипников коленчатого вала) превышает цену деления структурного параметра. Меньшей ценой деления структурного параметра характеризуются трущиеся соединения с вращающимися деталями (они лучше различаются), большей – соединения с поступательно движущимися деталями. Цена деления структурного параметра изменяется на протяжении наработки агрегата. С износным увеличением структурного параметра при приближении технического состояния агрегата к предельному цена деления параметра увеличивается. Наиболее важной является та область, на которой наблюдается приближение контролируемого соединения к предельному состоянию.

Уточнение цены деления структурного параметра позволяет уменьшить отрезок его размерной шкалы за счет последовательного уменьшения разницы выборочных средних, нахождения значений структурных параметров с помощью диагностических параметров и нового сопоставления их по формуле (1). Принятые уточненные цены деления параметров (структурного и диагностического) приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Расчетная оценка эквивалентной цены деления диагностических параметров

Соединение	Параметр	$\mathcal{C}\mathcal{D}_d$	$\mathcal{C}\mathcal{D}_c$, мм	Применимость показателя
Цилиндропоршневая группа	$EnvRMS$	0,008 g	0,0016	основной
	RMS	0,015 g	0,0021	дополнительный
	Экссес K	0,12	0,0037	дополнительный
Коренной подшипник	RMS	0,008 g	0,0019	основной
	$EnvRMS$	0,010 g	0,0028	дополнительный
	Пик-фактор CF	0,10	0,0048	ограниченный

Цена деления диагностического параметра $\mathcal{C}\mathcal{D}_d$ связана с ценой деления структурного параметра через коэффициент преобразования диагностического параметра в структурный:

$$\mathcal{C}\mathcal{D}_d = k_d \mathcal{C}\mathcal{D}_c, \quad (3)$$

где k_d – коэффициент преобразования диагностического параметра в структурный (чувствительность диагностического параметра к изменению структурного параметра).

Для соединений ЦПГ наименьшую цену деления обеспечивает параметр $EnvRMS$. Для коренных подшипников коленчатого вала предпочтительным является параметр RMS . Поэтому именно эти параметры целесообразно использовать как основные при последующей оценке структурного состояния соответствующих соединений.

Таким образом, цена деления структурного параметра связывает математическую модель $P_c = f(P_d)$ с реальной разрешающей способностью измерительной системы. Достоверность оценки структурного параметра обеспечивается при одновременном выполнении трех условий: выбранный диагностический параметр имеет высокую чувствительность к изменению структурного параметра, результаты повторных измерений обладают малым разбросом, а доверительный интервал оценки структурного параметра не перекрывает границы технических состояний.

Разрешающая способность виброакустического диагностирования не уступает соответствующему параметру диагностирования других видов. В дальнейшем это позволяет использовать полученные диагностические параметры для расчета текущего значения структурного параметра и последующего прогнозирования остаточного ресурса двигателя.

Технический уровень способов диагностирования. Технический уровень рассмотрен по семи показателям (таблица 4). Для первых трех высокие баллы соответствуют большим функциональным возможностям; для остальных – меньшим затратам и требованиям. Балльные оценки 5, 4 и 3 обозначают соответственно высокий, хороший и посредственный уровень в принятой авторской шкале.

Таблица 4. – Авторская балльная оценка способов диагностирования

Способ	У	И	Р	Т	М	Э	К
Виброакустический	5	5	5	5	5	5	3
Компрессионный	3	4	–	5	5	5	5
Вакуумный	3	4	–	5	5	5	5
Газоаналитический	5	3	4	5	5	5	5
Анализ масла	5	5	4	4	3	5	4
Тепловизионный	4	4	–	5	3	5	5
Эндоскопический	4	4	3	4	5	5	3
По току стартера	3	3	–	5	5	5	5
Индикаторные диаграммы	5	5	5	3	3	5	3
По параметрам выбега	3	3	–	5	5	5	5

Обозначения: У – универсальность; И – информативность; Р – ресурсная функция; Т – трудоемкость; М – материалоемкость; Э – энергоемкость; К – требования к квалификации.

Прочерк в столбце Р таблицы 4 означает отсутствие положительной оценки ресурсной функции в данной шкале, а не принципиальную невозможность прогнозирования в комплексной системе.

Введен относительный балльный показатель Q при одинаковой значимости критериев:

$$Q = \Sigma b_j / 35. \quad (4)$$

Суммируются семь баллов b_j для расчета, а прочерку условно присвоен ноль. Такое кодирование используется только внутри данной сравнительной модели. Оно не превращает порядковую шкалу в измерение физической эффективности и не позволяет интерпретировать разность Q как процент повышения точности или надежности. На рисунке представлено ранжирование способов диагностирования на основе балльной оценки.

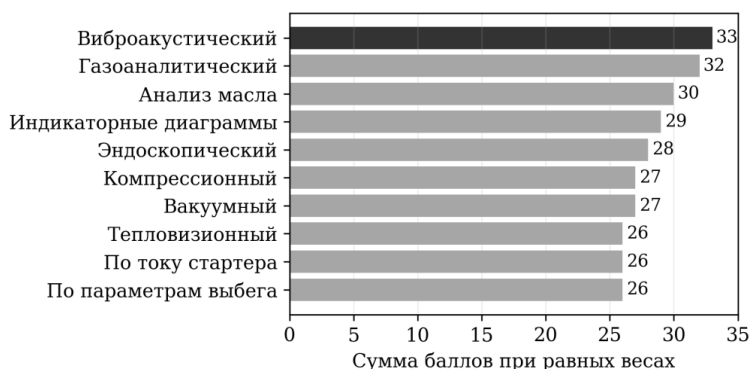


Рисунок. – Сопоставление суммарных оценок способов диагностирования

Виброакустический способ получил 33 балла, газоаналитический – 32, анализ масла – 30, анализ индикаторных диаграмм – 29. При равных весах виброакустический способ занимает первое место в принятой системе оценок. Его профиль отличается высокой принятой оценкой ресурсной функции при более высоких требованиях к подготовке диагноста. Результат зависит от весов критериев. Разность взвешенных оценок виброакустического и газоаналитического способов равна удвоенному весу информативности плюс вес ресурсной функции минус удвоенный вес требований к квалификации. При равных весах преимущество составляет один балл. Достаточное увеличение веса требований к квалификации изменяет предпочтение в пользу газоаналитического способа.

Применимость и обсуждение результатов. Для коробок передач и ведущих мостов рассматриваются зазоры зацеплений, для карданных передач – зазоры шарниров, для подшипниковых узлов – радиальные зазоры. Переносятся принципы процесса, а калибровки и границы определяются заново. Проверка должна включать повторный монтаж датчиков, размерный контроль и независимые агрегаты. Суммарный люфт кинематической цепи нельзя без дополнительной модели приписывать одному соединению.

Заключение.

1. Разработана процедура оценки разрешающей способности, связывающая эффективный шаг диагностического признака с изменением контролируемого зазора, статистической различимостью состояний и неопределенностью получаемой оценки. Разрешающую способность виброакустического диагностирования предложено оценивать через локальный коэффициент преобразования диагностического признака в зазор и эффективный шаг признака с последующей проверкой различимости состояний. Эти характеристики дополняют, но не заменяют оценку неопределенности.

2. Предварительный расчетный диапазон эквивалентной цены деления составляет 0,0016–0,0048 мм.

3. Технологический процесс ресурсного диагностирования должен включать контроль повторяемости, индивидуальную калибровку и сопоставление верхней границы оценки зазора с допустимым значением.

4. Балльное сопоставление позволяет выявлять преимущества и ограничения способов диагностирования, однако его результат зависит от весов критериев оценки. Использование процесса применительно к другим агрегатам требует отдельной калибровки и проверки достоверности ресурсных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2006. – Vol. 20, No 7. – P. 1483–1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012
2. Афанасьева О.В. Метод оценки факторов, влияющих на вибрацию судового дизеля, вызванную работой цилиндропоршневой группы // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. – 2024. – № 1. – С. 84–94. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-1-84-94

3. Зеньков В.А. Обоснование мест установки датчиков при диагностировании двигателей внутреннего сгорания виброакустическим методом // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2026. – № 2. – С. 34–39. DOI: 10.52928/2070-1616-2026-54-2-34-39
4. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, 1965. – 512 с. – (Каталог ТУСУРа).
5. Comparison of Two Classifiers; K-Nearest Neighbor and Artificial Neural Network, for Fault Diagnosis on a Main Engine Journal-Bearing / A. Moosavian, H. Ahmadi, A. Tabatabaee et al. // Shock and Vibration. – 2013. – Vol. 20, № 2. – P. 263–272. DOI: 10.3233/SAV-2012-00742

Поступила 20.07.2026

RESOLUTION AND TECHNICAL LEVEL OF VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS FOR AUTOMOTIVE UNITS

V. ZENKOV

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

A procedure is proposed for assessing the resolution of vibroacoustic diagnostics by combining diagnostic feature repeatability, local calibration sensitivity and clearance estimation uncertainty. Cylinder–piston pairs and crankshaft main bearings are considered. An effective measurement increment is distinguished from statistically confirmed discrimination between states. Preliminary numerical estimates and a comparison of ten diagnostic methods using seven criteria are presented. Conditions are specified for incorporating clearance estimates into remaining useful life assessment and adapting the procedure to other automotive units.

Keywords: automotive unit, vibroacoustic diagnostics, clearance, resolution, measurement uncertainty, remaining useful life.

УДК 620.179.1

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-69-72

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**В.А. ЗЕНЬКОВ***(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Проанализированы зависимости зазоров цилиндропоршневой группы и коренных подшипников от среднеквадратического значения ускорения RMS и среднеквадратического огибающей ускорения $EnvRMS$, полученных виброакустическим датчиком со стенки блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания. Для цилиндропоршневой группы лучшее качество аппроксимации получено по RMS , для коренных подшипников – по $EnvRMS$. Проверены монотонность и диапазоны применения моделей. Выявлен внутренний максимум зависимости зазора цилиндропоршневой группы от $EnvRMS$, ограничивающий ее использование. Обоснованы условия косвенного контроля зазоров и последующего перехода к оценке ресурса.

Ключевые слова: автомобильный двигатель, зазор, виброакустическое диагностирование, RMS , $EnvRMS$, регрессия, цилиндропоршневая группа, коренные подшипники, диагностический параметр, структурный параметр.

Введение. Количественный контроль изнашивания автомобильного двигателя требует оценки зазоров соединений, определяющих его работоспособность. Непосредственные измерения связаны с его разборкой. Виброакустическое диагностирование позволяет оценивать структурные параметры по колебаниям наружной стенки блока цилиндров. Практическая ценность подхода зависит от устойчивости связи диагностического признака с зазором. В работах по вибрационному диагностированию подчеркивается необходимость различать источники и уровни вибросигналов – от отдельного подшипника до агрегата [1]. В двигателе одновременно наблюдаются колебания и волны от сгорания рабочей смеси, движения поршней, вращения валов и деталей газораспределительного механизма. Для определения зазоров необходима калибровочная зависимость, учитывающая особенность группы трения. Для модели принята квадратичная регрессия, параметры которой определяются методом наименьших квадратов [2]. Для подтверждения пригодности модели для новых наблюдений необходимо провести анализ остатков и установить область применимости модели [2]. Для сохранения качества общей зависимости и предпочтительности диагностического признака исследование проводилось отдельно по каждому виду соединений.

Неинвазивная диагностика ДВС по вибрации головки цилиндров описана в [3]. Вибрации сгорания и ударов поршня накладываются; их разделение исследовано в [4]. Влияние зазора между поршнем и гильзой на вибрацию судового дизеля показано в [5], а выявление износа коренных подшипников ДВС по вибрации – в [6]. В [7] изучено влияние частоты вращения, нагрузки и зазора на проявления ударов поршня.

Цель работы – подтвердить обоснованность выбранных диагностических параметра и условия применения регрессионных зависимостей для оценки зазоров цилиндропоршневой группы и коренных подшипников. Для достижения цели сопоставлены показатели аппроксимации четырех моделей, исследована их монотонность и определены ограничения использования результатов при контроле технического состояния двигателя.

Объект исследования и исходные материалы. Объектом являются соединения «поршень–цилиндр» в цилиндропоршневой группе (ЦПГ), и «коленчатый вал–коренной подшипник» (КП). Структурный параметр P_c характеризует зазор в соответствующем соединении. Диагностическими параметрами выступают среднеквадратическое значение ускорения RMS и среднеквадратическое огибающей ускорения $EnvRMS$, выраженные в единицах ускорения свободного падения g . RMS характеризует общий среднеквадратический уровень виброускорения, $EnvRMS$ – среднеквадратический уровень огибающей сигнала после процедуры обработки. Количественный анализ выполнен для режима работы ДВС при частоте вращения коленчатого вала 3000 об/мин. Для ЦПГ каждая модель объединяет 40 наблюдений четырех точек контроля, для КП – 50 наблюдений пяти точек. Колебания регистрируются на наружной поверхности блока цилиндров в информативно чувствительных зонах контролируемых соединений. Сопоставимость измерений требовала сохранения точки установки, направления оси, крепления датчика и режима двигателя. В качестве базовой формы принята однофакторная квадратичная зависимость

$$\hat{P}_c = a_0 + a_1x + a_2x^2, \quad (1)$$

где $\hat{P}_c$ – расчетный зазор, мм; x – RMS , g , либо $EnvRMS$, g ; a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты.

Коэффициент детерминации R^2 характеризует вариацию зазора относительно среднего. Величина $RMSE$ – аппроксимацию исходной выборки b и равна квадратному корню из суммы квадратов остатков с делением на число наблюдений. Признаки сравнивались внутри каждой группы по R^2 , $RMSE$ и форме зависимости. Монотонность проверяется по производной функции.

Основная часть. Выражение для ЦПГ по RMS имеет вид:

$$\hat{P}_C = -0,074029 + 0,339099RMS - 0,064422RMS^2. \quad (2)$$

Диапазон RMS составляет 0,2700–2,0217 г. Из исходной выборки получены $R^2 = 0,9284$ и $RMSE = 0,02792$ мм. Положительный линейный и отрицательный квадратичный коэффициенты формируют возрастающую кривую с постепенно уменьшающимся наклоном. Максимум расположен при $RMS \approx 2,6319$ г за правой границей исходного диапазона, следовательно, внутри него направление связи сохраняется.

Уравнение для того же соединения по $EnvRMS$ записывается следующим образом:

$$\hat{P}_C = -0,016615 + 0,146143EnvRMS - 0,015160EnvRMS^2. \quad (3)$$

Диапазон $EnvRMS$ равен 0,3618–6,2132 г; $R^2 = 0,6919$, $RMSE = 0,05793$ мм. Максимум достигается при $EnvRMS \approx 4,8200$ г и расчетном зазоре около 0,3356 мм. После этой точки функция убывает, хотя диагностический признак продолжает увеличиваться. На верхней границе диапазона расчетный зазор составляет около 0,3062 мм, т.е. меньше значения в вершине.

Рисунок 1 показывает зависимости зазора в ЦПГ от RMS и $EnvRMS$ в пределах диапазонов, приведенных в описании регрессий. Кривая RMS возрастает на всем рассматриваемом участке, тогда как зависимость $EnvRMS$ имеет внутренний максимум, а ее нисходящая ветвь выделена штриховой линией. Разные масштабы горизонтальных осей обусловлены различием диапазонов признаков и не позволяют сравнивать их чувствительность только по визуальному наклону. Линии построены по уравнениям (2) и (3).

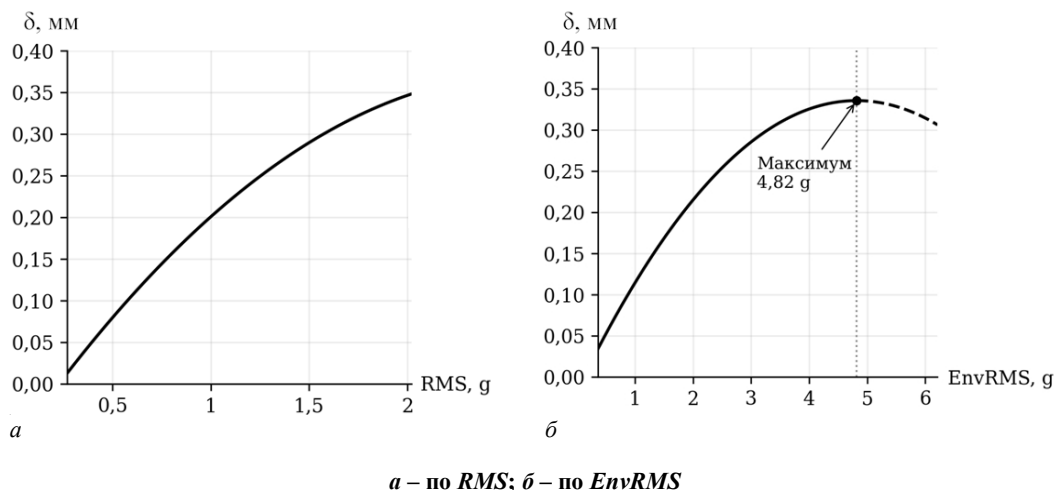


Рисунок 1. – Расчетные зависимости зазора ЦПГ при 3000 об/мин

Для ЦПГ использование RMS уменьшает $RMSE$ относительно $EnvRMS$ на 51,8%, а R^2 увеличивается на 0,2365. Это обосновывает предварительное предпочтение RMS для объединенных данных в рамках квадратичной модели. Недостаточное качество зависимости $EnvRMS$ может быть связано с неоднородностью точек, формой функции или обработкой сигнала; сводные данные не позволяют разделить эти причины.

Зависимость зазора в коренных подшипниках коленчатого вала от RMS имеет вид:

$$\hat{P}_C = -0,91904 + 0,345850RMS - 0,018727RMS^2. \quad (4)$$

Выражение относится к диапазону RMS 0,3508–0,9718 г; показатели аппроксимации составляют $R^2 = 0,8773$ и $RMSE = 0,02088$ мм. Небольшой по модулю квадратичный член задает слабую кривизну, поэтому на исследованном участке зависимость близка к линейной. Расчетная вершина находится при $RMS \approx 9,2340$ г существенно за пределами исходного диапазона и не имеет здесь самостоятельной диагностической интерпретации.

Для признака $EnvRMS$ получена зависимость

$$\hat{P}_C = -0,080002 + 0,229674EnvRMS - 0,009292EnvRMS^2. \quad (5)$$

Диапазон $EnvRMS$ составляет 0,4801–1,4488 г; $R^2 = 0,9071$, $RMSE = 0,01817$ мм. Кривая также возрастает на всем исходном участке, а ее максимум расположен при $EnvRMS \approx 12,3587$ г. По сравнению с RMS ошибка аппроксимации уменьшается на 13,0%, коэффициент детерминации увеличивается на 0,0298. Поэтому для исследования коренного подшипника (КП) при данном режиме предварительно предпочтителен $EnvRMS$.

На рисунке 2 представлены расчетные зависимости зазора КП от двух диагностических параметров. Обе кривые монотонно возрастают и имеют небольшой изгиб вниз, соответствующий отрицательному коэффициенту при квадрате признака. Значения на концах линий получены подстановкой границ диапазонов в уравнения и не должны трактоваться как измеренные минимальный и максимальный зазоры. Близкая форма кривых показывает, что выбор между ними определяется, прежде всего, качеством аппроксимации и результатами последующей проверки, а не наличием визуально выраженной нелинейности.

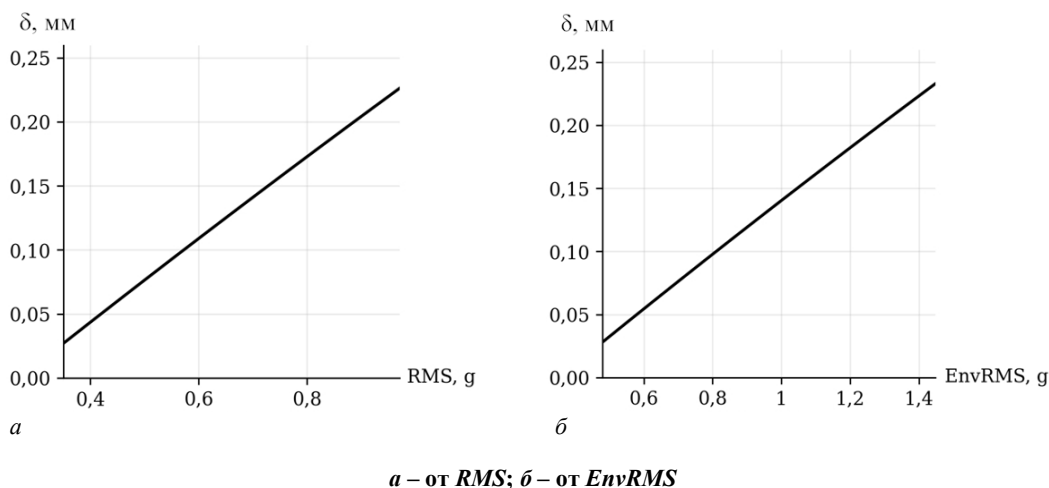


Рисунок 2. – Расчетные зависимости зазора КП δ при 3000 об/мин

Предпочтение *EnvRMS* для КП отличается от раннего вывода главы по индивидуальным линейным моделям. Здесь изменены форма зависимости и способ объединения наблюдений. Среднее качество отдельных регрессий не является качеством одной общей регрессии, поэтому прежние показатели не переносятся на уравнения (2) и (5).

Сводные характеристики четырех зависимостей приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Показатели аппроксимации при 3000 об/мин

Группа	Признак	Число строк	R^2	$RMSE$, мм
ЦПГ	<i>RMS</i>	40	0,9284	0,02792
ЦПГ	<i>EnvRMS</i>	40	0,6919	0,05793
КП	<i>RMS</i>	50	0,8773	0,02088
КП	<i>EnvRMS</i>	50	0,9071	0,01817

Предпочтительный признак зависит от исследуемой группы соединений. Для ЦПГ *RMS* одновременно обеспечивает большее R^2 и меньшее $RMSE$, а для КП такое сочетание получено по *EnvRMS*. Более широкий диапазон *EnvRMS* в ЦПГ не сопровождается лучшей точностью общей зависимости. Все ошибки относятся к аппроксимации исходных данных и не характеризуют достоверность прогноза ресурса.

Для количественной оценки формы кривых вычислен коэффициент преобразования диагностического параметра в структурный:

$$C(x) = a_1 + 2a_2x, \quad (6)$$

где $C(x)$ – производная расчетного зазора по диагностическому признаку, мм/г.

Зависимость показывает локальное изменение расчетного структурного параметра соответствует малому изменению диагностического параметра. Положительный знак означает возрастающую зависимость; нулевое значение соответствует вершине параболы. Отрицательный знак указывает на нисходящую ветвь. Значения коэффициента на границах исходных диапазонов и положения вершин приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Проверка монотонности регрессионных зависимостей

Модель	C в начале, мм/г	C в конце, мм/г	Вершина x^* , г
ЦПГ, <i>RMS</i>	0,30431	0,07862	2,6319
ЦПГ, <i>EnvRMS</i>	0,13517	-0,04224	4,8200
КП, <i>RMS</i>	0,33271	0,30945	9,2340
КП, <i>EnvRMS</i>	0,22075	0,20275	12,3587

В таблице 2 только модель ЦПГ по *EnvRMS* изменяет знак коэффициента преобразования внутри исходного диапазона. Для ЦПГ по *RMS* положительный наклон заметно уменьшается, а обе модели КП сохраняют сравнительно стабильный положительный наклон. Расположение вершины за пределами диапазона подтверждает монотонность на исходном участке, но не разрешает экстраполяцию до этой вершины. Значения рассчитаны по округленным коэффициентам, поэтому представляют аналитическую проверку опубликованных уравнений.

Заключение.

1. Для ЦПГ предпочтительна модель по *RMS*: $R^2 = 0,9284$ и $RMSE = 0,02792$ мм против 0,6919 и 0,05793 мм по *EnvRMS*. Для КП предпочтительна модель по *EnvRMS*: $R^2 = 0,9071$ и $RMSE = 0,01817$ мм против 0,8773 и 0,02088 мм по *RMS*. Уменьшение ошибки аппроксимации составляет соответственно 51,8 и 13,0%.

2. Модель ЦПГ по *EnvRMS* имеет максимум при 4,8200 г внутри исходного диапазона и не обеспечивает монотонного увеличения зазора на всем участке. Наличие внутреннего максимума ограничивает применение полученной квадратичной зависимости зазора ЦПГ от *EnvRMS* во всем исследованном диапазоне. Использование ее нисходящей ветви без дополнительной проверки может привести к занижению оценки зазора и ошибочной интерпретации технического состояния соединения. Это ограничение относится к полученной регрессионной модели; общий вывод о непригодности самого параметра *EnvRMS* из наличия максимума не следует. Остальные зависимости возрастают в заданных диапазонах. Проверка формы функции позволяет выявить ограничение, которое не раскрывается одним значением коэффициента детерминации.

3. Цель работы достигнута на уровне анализа представленных регрессионных результатов: обоснован выбор параметров и определены условия применения зависимостей для косвенного контроля зазоров. Использование методики требует согласования вида зазора, воспроизведения условий калибровки и независимой проверки моделей. Переход к оценке остаточного ресурса возможен после подтверждения связи изменения зазора с наработкой и учета неопределенности получаемого прогноза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. – 2012. – Гл. 3. – URL: <https://vibrocenter.ru/book2012.html> (дата обращения: 13.07.2026).
2. Френкель А.А., Адамова Е.В. Корреляционный и регрессионный анализ в экономических приложениях: учеб. пособие. – М.: МЭСИ, 1987. – 96 с.
3. Diagnosis of internal combustion engine through vibration and acoustic pressure non-intrusive measurements / L. Barelli, G. Bidini, C. Buratti et al. // Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29, № 8-9. – P. 1707–1713. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.07.025
4. Liu X., Randall R. B. Blind source separation of internal combustion engine piston slap from other measured vibration signals // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2005. – Vol. 19, № 6. – P. 1196–1208. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.08.004
5. Experimental Study Results Processing Method for the Marine Diesel Engines Vibration Activity Caused by the Cylinder-Piston Group Operations / O. Afanaseva, O. Bezyukov, D. Pervukhin et al. // Inventions. – 2023. – Vol. 8, № 3. – Art. 71. DOI: 10.3390/inventions8030071
6. Comparison of Two Classifiers; K-Nearest Neighbor and Artificial Neural Network, for Fault Diagnosis on a Main Engine Journal-Bearing / A. Moosavian, H. Ahmadi, A. Tabatabaefar et al. // Shock and Vibration. – 2013. – Vol. 20, № 2. – P. 263–272. DOI: 10.3233/SAV-2012-00742
7. Chen J., Randall R. B., Peeters B. Advanced diagnostic system for piston slap faults in IC engines, based on the non-stationary characteristics of the vibration signals // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 75. – P. 434–454. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.12.023

Поступила 20.07.2026

PATTERNS OF INTERRELATION BETWEEN DIAGNOSTIC AND STRUCTURAL PARAMETERS IN AUTOMOTIVE ENGINE DIAGNOSTICS

V. ZENKOV

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The relationships between the clearances in the cylinder–piston group and main bearings and the root-mean-square acceleration (RMS) and the root-mean-square value of the acceleration envelope (EnvRMS) were analyzed. The diagnostic parameters were obtained using a vibroacoustic sensor mounted on the wall of the cylinder block of an internal combustion engine. For the cylinder–piston group, the RMS-based model provided the best fit, whereas the EnvRMS-based model performed better for the main bearings. The monotonicity and applicability ranges of the models were assessed. An internal maximum in the relationship between cylinder–piston group clearance and EnvRMS was identified, limiting the applicability of this model. The conditions for indirect clearance monitoring and subsequent residual life assessment were substantiated.

Keywords: vehicle engine, clearance, vibroacoustic diagnostics, regression, RMS, envelope RMS, main bearing, diagnostic parameter, structural parameter.

УДК 656.13.08:004.942

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-73-79

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
В КАЧЕСТВЕ ПОДВИЖНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ**

*д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ,
канд. техн. наук, доц. С.В. БОГДАНОВИЧ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Статья посвящена методологическому анализу использования транспортных средств, оснащенных приемниками спутниковой навигации в качестве подвижных датчиков (probe vehicle data, PVD) для мониторинга параметров дорожного движения. Рассмотрены требования к репрезентативности выборки, обработке траекторных данных, реконструкции макроскопических характеристик транспортного потока и оценке объема движения при неполных данных. Предложена схема интеграции PVD с компонентами интеллектуальных транспортных систем (ИТС) применительно к условиям дорожной сети Республики Беларусь. Обоснованы подходы к валидации данных и описаны ограничения метода. Показано, что переход к распределенному мониторингу на основе транспортного потока существенно изменяет функциональные требования к стационарной дорожной инфраструктуре.

Ключевые слова: *подвижные датчики (probe vehicle data), мониторинг дорожного движения, траекторные данные, интеллектуальные транспортные системы, транспортный поток, дорожная инфраструктура, Республика Беларусь.*

Введение. Мониторинг параметров дорожного движения на протяженных участках автомобильных дорог в течение длительного времени основывался на стационарных средствах учета: индуктивных петлях, радарных и ультразвуковых датчиках, системах автоматической видеофиксации [1]. Такие устройства обеспечивают высокую точность измерений в точке установки, однако их экономическая целесообразность резко снижается при необходимости контроля разреженных загородных сетей. Стоимость установки одного комплекта стационарного детектора на республиканских дорогах Беларуси с учетом подключения к каналам связи и электрообеспечения по данным РУП «Белдорсвязь» может достигать 10–15 тыс. EUR, что делает плотное покрытие экономически проблематичным.

Альтернативным подходом является использование транспортных средств, оснащенных приемниками глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), в качестве подвижных датчиков. Концепция probe vehicle data (PVD) предполагает, что каждое транспортное средство, передающее свои координаты и временные метки, становится элементом распределенной сенсорной сети [2]. При достаточной доле оснащенных транспортных средств в общем потоке, обозначаемой как уровень проникновения (penetration rate, PR), появляется возможность оценивать макроскопические параметры потока, таких как скорость, плотность, интенсивность. Однако переход от индивидуальных треков к характеристикам потока порождает ряд методологических проблем, не имеющих однозначных решений.

Цель настоящей статьи – систематизировать методологические следствия, возникающие при использовании PVD для мониторинга дорожного движения, и оценить применимость данного подхода к условиям дорожной сети Республики Беларусь. В работе рассмотрены требования к выборке, процедуры обработки траекторных данных, методы реконструкции параметров потока, а также вопросы интеграции PVD с существующими элементами интеллектуальных транспортных систем (ИТС).

Основная часть. Традиционный подход к мониторингу предполагает разделение на объект наблюдения (транспортный поток) и средство наблюдения (стационарный детектор). PVD-подход снимает это разделение, т.к. часть транспортного потока сама становится инструментом его описания. Такое преобразование имеет значимые последствия для теории и практики транспортного мониторинга.

Стационарный детектор подсчитывает число транспортных средств, пересекающих заданный створ, и измеряет их мгновенную скорость. Данные такого типа принято обозначать как эйлеровы (Eulerian) наблюдения [3]. Напротив, подвижный датчик перемещается вместе с потоком и генерирует лагранжеву (Lagrangian) траекторию – последовательность координат с привязкой ко времени. Различие между этими двумя типами данных носит не только терминологический, но и сущностный характер, поскольку позволяют непосредственно оценивать разные переменные фундаментальной диаграммы транспортного потока.

Эйлерово измерение напрямую дает интенсивность (q , авт./ч) и точечную скорость, тогда как плотность (k , авт./км) вычисляется косвенно. Лагранжево измерение, напротив, непосредственно характеризует пространственную скорость на участке, но не позволяет без дополнительных допущений определить объем или плотность потока. В этом состоит существенное методологическое ограничение PVD: для перехода от скоростей к полному набору макроскопических параметров необходимы дополнительные модельные предположения или внешние источники данных.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема, иллюстрирующая совместное функционирование стационарных датчиков, установленных на дорожных измерительных станциях (ДИС), и подвижных датчиков в составе транспортного потока. В условиях белорусских автомобильных дорог первоочередными источниками PVD могут стать коммерческий транспорт логистических компаний, междугородные автобусы и техника дорожных служб, уже оснащенные системами спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS [4]. По нашим оценкам, доля таких транспортных средств на республиканских дорогах составляет 5–12% от общего потока в зависимости от участка и времени суток.

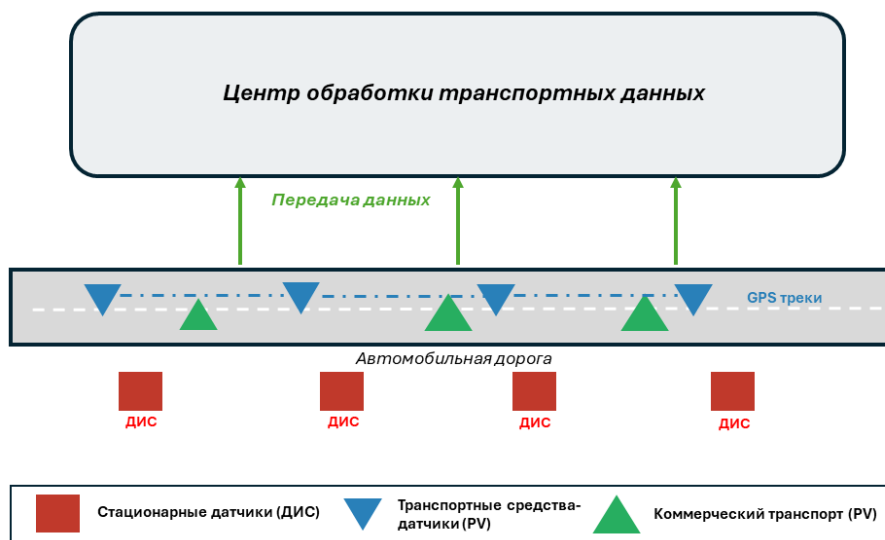


Рисунок 1. – Концептуальная схема транспортного потока как распределенной сенсорной сети

Достоверность оценок параметров потока, полученных на основе PVD, прямо зависит от уровня проникновения – доли оснащенных транспортных средств в общем потоке. Минимальный порог PR, обеспечивающий статистически приемлемое качество оценки средней пространственной скорости, по данным большинства исследований, составляет 2–5% [5]. При значениях ниже этого порога ошибка средней скорости на пятиминутном интервале агрегирования превышает 15–20%, что не подходит для задач управления в реальном времени.

Проблема усложняется тем, что распределение оснащенных транспортных средств в потоке не является равномерным. Коммерческий транспорт в основном использует определенные маршруты и временные окна. Легковые автомобили с навигационными приложениями формируют другую пространственно-временную структуру покрытия. Систематическое смещение выборки (sample bias) – фундаментальная проблема PVD-подхода. Грузовые транспортные средства движутся медленнее легкового потока, что приводит к занижению оценки средней скорости при их преобладании в выборке. Для коррекции необходима информация о структуре потока по категориям транспортных средств – данные, которые сами по себе требуют дополнительных источников [6].

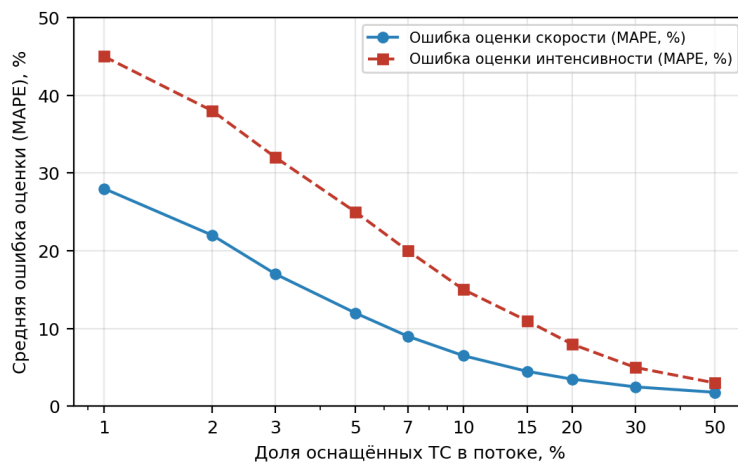


Рисунок 2. – Зависимость ошибки оценки параметров потока от уровня проникновения PVD (составлено авторами по данным [5; 6])

На рисунке 2 показана типичная иллюстративная зависимость ошибки оценки скорости и интенсивности от уровня проникновения PVD. Оценка интенсивности имеет более высокую чувствительность к PR: даже при 10% оснащенных ТС средняя ошибка остается в пределах 15%. Для скорости аналогичный уровень точности достигается уже при PR = 3–5%. Данная закономерность обусловлена тем, что интенсивность является производной от плотности и скорости, а обе переменные оцениваются с собственной погрешностью, которая увеличивается при переходе к производным параметрам.

В таблице 1 систематизированы характеристики четырех основных источников данных о транспортном потоке. PVD принципиально отличается от стационарных детекторов по типу наблюдения, охвату и набору непосредственно измеряемых параметров. Основным преимуществом PVD является непрерывный пространственный охват при низкой удельной стоимости на километр контролируемой сети. Однако зависимость от уровня проникновения и невозможность прямого измерения интенсивности ограничивают самостоятельное применение метода.

Таблица 1. – Сравнительные характеристики источников данных о транспортном потоке

Характеристика	Индуктивные петли	Радары	Видеодетекторы	PVD
Тип наблюдения	Эйлерово	Эйлерово	Эйлерово	Лагранжево
Пространственный охват	Точечный	Зональный (до 250 м)	Зональный (до 100 м)	Непрерывный (весь маршрут)
Измеряемые параметры	q, v	q, v	q, v , класс ТС	v , время в пути, траектория
Зависимость от PR	Нет	Нет	Нет	Да ($\geq 2-5\%$)
Стоимость на 1 км покрытия	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая

Траекторные данные, поступающие от бортовых ГНСС-приемников, содержат последовательность записей вида (φ, λ, t) , где φ и λ – географические координаты, t – временная метка. Частота записи варьируется от 1 до 60 с в зависимости от настроек терминала и оператора мониторинга. Преобразование этих сырых данных в параметры транспортного потока требует нескольких последовательных этапов обработки, представленных на рисунке 3.

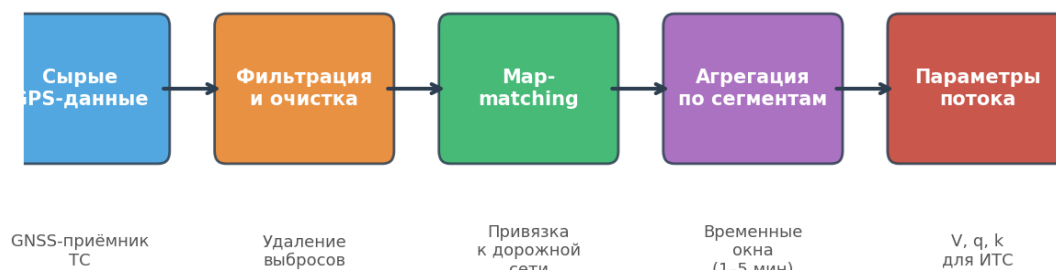


Рисунок 3. – Конвейер обработки траекторных данных для получения параметров потока

Первый этап – фильтрация и очистка данных. Навигационные данные содержат ошибки позиционирования, обусловленные многолучевым распространением сигнала в условиях городской застройки или лесных массивов, временной потерей связи со спутниками, аппаратными сбоями терминалов. Типичная процедура включает удаление записей с аномальными скачками координат (более 200 м за один интервал при частоте 1 Гц), фильтрацию по допустимому диапазону скоростей (0–200 км/ч для автомобильных дорог) и медианное сглаживание для устранения высокочастотного шума [7].

Второй этап – привязка к дорожной сети (map-matching). Координаты ГНСС-приемника не совпадают точно с осью дороги; ошибка позиционирования составляет 3–15 м для одночастотных приемников. Алгоритмы привязки проецируют каждую точку траектории на ближайший сегмент дорожного графа с учетом топологии сети, направления движения и предыстории трека. Наибольшее распространение получили вероятностные методы на основе скрытых марковских моделей (Hidden Markov Model, HMM), обеспечивающие точность привязки 95–98% на развитых дорожных сетях [8]. Для условий Беларуси, где дорожный граф на большинстве дорог существенно менее плотный, чем в западноевропейских странах, задача привязки упрощается: на загородных участках альтернативные параллельные маршруты, как правило, отсутствуют.

Третий этап – агрегация по пространственно-временным сегментам. Привязанные треки разбиваются по сегментам дорожной сети фиксированной длины (обычно 0,5–2,0 км) и временным окнам (1–5 мин). Для каждой ячейки «сегмент × интервал» рассчитываются агрегированные показатели: средняя пространственная ско-

рость (space-mean speed), дисперсия скоростей, число наблюдений. Средняя пространственная скорость определяется как

$$\bar{V}_s = L / (1/n \cdot \sum_i t_i), \quad (1)$$

где L – длина сегмента, км;

t_i – время прохождения сегмента i -м транспортным средством, ч;

n – число наблюдений в данном пространственно-временном окне.

Данная формула соответствует гармоническому среднему индивидуальных скоростей и является корректной оценкой именно пространственной, а не временной средней скорости, что имеет значение для макро-скопического описания потока [9].

Непосредственное измерение интенсивности (q) и плотности (k) по данным PVD требует дополнительных предположений. Подвижный датчик «видит» только собственную траекторию; он не подсчитывает транспортные средства, пересекающие створ. Для перехода к этим параметрам используется несколько подходов, каждый из которых основан на определенных допущениях о характере потока.

Первый подход предполагает использование фундаментального соотношения транспортного потока:

$$q = k \cdot \bar{V}_s. \quad (2)$$

Если средняя пространственная скорость $\bar{V}_s$ получена из PVD, а плотность k оценена с помощью модели (например, модели Гриншилдса $k = k_j(1 - \bar{V}_s/V_f)$, где k_j – плотность затора, V_f – скорость свободного потока), то интенсивность может быть рассчитана аналитически. Данный метод применим при наличии предварительно откалиброванной фундаментальной диаграммы для конкретного участка дороги [10].

На рисунке 4 сопоставлены модели Гриншилдса и Андервуда с точечными оценками, полученными по PVD. Рассеяние наблюдений обусловлено ограниченным числом подвижных датчиков и стохастическим характером потока. В области свободного движения ($k < 30$ авт./км) обе модели дают близкие результаты, а расхождения нарастают при переходе к насыщенным и заторовым режимам, где модель Гриншилдса систематически завышает скорость.

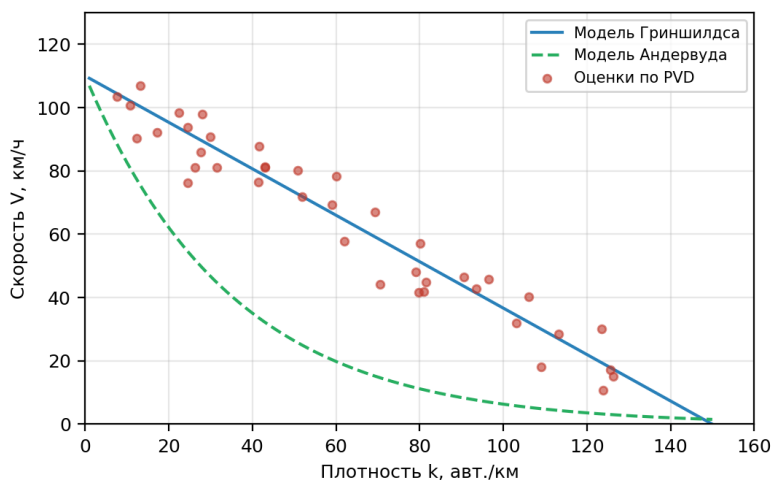


Рисунок 4. – Фундаментальная диаграмма «скорость — плотность»: модели и оценки по PVD (составлено авторами по данным [10; 12])

Второй подход основан на оценке плотности через долю времени занятости сегмента (осцирапсу), восстанавливаемую из числа подвижных датчиков, одновременно находящихся на сегменте:

$$\hat{k} = n_{obs} / (PR \cdot L), \quad (3)$$

где n_{obs} – число подвижных датчиков на сегменте длиной L в данный момент времени;

PR – уровень проникновения.

Точность данной оценки критически зависит от знания PR , которое само по себе является неизвестной и нестационарной величиной. Ряд авторов предлагает адаптивные методы оценки PR путем сопоставления PVD с данными стационарных детекторов в точках их совместного наличия [11].

Практическое применение PVD в составе ИТС требует решения задачи интеграции с существующими подсистемами: управления динамическими информационными табло (VMS), навигационными сервисами, центрами управления дорожным движением (ЦУДД). В условиях Республики Беларусь эта задача имеет свою специфику, обусловленную разреженностью стационарной инфраструктуры и преобладанием двухполосных дорог в сети республиканских автомобильных дорог.

На рисунке 5 представлена предлагаемая архитектура интеграции. Платформа обработки PVD получает данные от ГЛОНАСС-трекеров транспортных средств, дорожных метеостанций и ГИС дорожной сети. Выходные данные передаются в три канала: динамические табло VMS, навигационные сервисы через API (в форматах DATEX II или TPEG) и центр управления дорожным движением.



Рисунок 5. – Схема интеграции PVD с компонентами ИТС

Для управления VMS на загородных магистралях данные PVD используются для автоматического формирования предупреждающих сообщений. Алгоритм обнаружения аномалий сравнивает текущую среднюю скорость на сегменте с базовым профилем, описывающим нормальное поведение потока для данного времени суток, дня недели и сезона [4]. Отклонение, превышающее установленный порог (например, снижение скорости более чем на 40% от базового значения), классифицируется как аномалия и генерирует управляющее воздействие. Формально условие активации может быть записано:

$$\Delta V = (V_{base} - \bar{V}_s) / V_{base} > \theta, \quad (4)$$

где V_{base} – базовая скорость для данного пространственно-временного контекста;

θ – пороговое значение (обычно 0,3–0,5). Выбор порога определяет баланс между чувствительностью обнаружения и долей ложных срабатываний.

В таблице 2 систематизированы четыре основных сценария использования PVD для целей управления дорожным движением. Каждый сценарий предполагает сочетание PVD с данными других источников, что подтверждает тезис о том, что PVD не заменяет стационарную инфраструктуру мониторинга, а дополняет ее, формируя гибридную систему с расширенными функциональными возможностями.

Таблица 2. – Сценарии использования PVD в системе управления дорожным движением

Сценарий	Входные данные PVD	Дополнительные источники	Управляющее воздействие
Обнаружение инцидента	Снижение $\bar{V}_s$ на сегменте	Видеокамеры (верификация)	VMS: предупреждение, объезд
Прогноз гололеда	Данные ESP/ABS от подключенных ТС	Метеостанции, прогноз погоды	VMS: ограничение скорости
Оценка времени в пути	Средняя $\bar{V}_s$ по маршруту	–	Навигационный сервис (API)
Мониторинг состояния покрытия	Акселерометры ТС	PMS, ГИС	Планирование ремонтных работ

Достоверность PVD определяется совокупностью факторов: точностью навигационного позиционирования, частотой передачи данных, корректностью алгоритмов привязки и агрегации. Для систематической оценки качества данных целесообразно использовать многоуровневую модель, включающую валидацию на уровне отдельного трека (микроуровень), агрегированных параметров сегмента (мезоуровень) и показателей сети в целом (макроуровень) [12].

На микроуровне проверяется целостность и физическая правдоподобность индивидуального трека: отсутствие разрывов, соответствие скоростей допустимому диапазону, согласованность последовательных точек по направлению и расстоянию. На мезоуровне агрегированные оценки скорости и времени в пути сопоставляются

с данными стационарных детекторов в точках их наличия. Стандартная процедура предусматривает расчет средней абсолютной процентной ошибки (MAPE):

$$MAPE = (1/n) \cdot \sum_i |V_{pv,i} - V_{ref,i}| / V_{ref,i} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где $V_{pv,i}$ – оценка скорости по PVD;

$V_{ref,i}$ – эталонное значение от стационарного детектора;

n – число сопоставляемых наблюдений.

Приемлемым уровнем MAPE для скорости считается 10–15% при пятиминутном интервале агрегирования [13].

Отдельную проблему составляет стандартизация данных. В Республике Беларусь отсутствуют специализированные стандарты на формат и качество PVD. Целесообразно ориентироваться на международные стандарты ISO/TS 19468¹ (определение методов мониторинга трафика) и DATEX II² (обмен данными между системами управления) как базовые рамочные документы для формирования национальных требований.

Переход к мониторингу на основе PVD не означает полного отказа от стационарных детекторов. Однако их функция в этом случае меняется: из основного источника данных о потоке они становятся средством калибровки и валидации данных, полученных от подвижных датчиков. Стационарный детектор в такой архитектуре – не единственный источник данных, а опорная точка системы, обеспечивающая привязку «плавающих» оценок PVD к абсолютным значениям интенсивности и плотности [14].

Для условий Республики Беларусь это означает пересмотр стратегии размещения стационарных постов контроля. Вместо стремления к равномерному покрытию, нерентабельному для протяженной дорожной сети, может быть применен принцип «опорных сечений» (anchor cross-sections). Опорные сечения устанавливаются в местах с характерными изменениями параметров потока: на въездах и выездах из населенных пунктов, в зонах примыканий и развязок, на границах участков с различной пропускной способностью. Расстояние между опорными сечениями может составлять 20–50 км при условии, что уровень проникновения PVD на промежуточных участках не опускается ниже 3–5%.

Дорожные метеостанции при этом сохраняют самостоятельную роль, поскольку данные о температуре покрытия, влажности, видимости и наличии осадков не могут быть получены из PVD с достаточной точностью. Вместе с тем перспективным направлением является использование данных бортовых систем транспортных средств (срабатывание систем ABS, ESP, активация стеклоочистителей) как косвенных индикаторов дорожных условий. Такая информация, поступающая от «подключенных» транспортных средств (connected vehicles), расширяет спектр отслеживаемых параметров без увеличения числа стационарных датчиков [4].

Также чрезвычайно перспективным и более простым методом получения актуальной информации о состоянии покрытия представляется оснащение автомобилей дорожных служб мониторами состояния дороги, например таких, как RCM411 [15].

Методологические ограничения PVD-подхода целесообразно разделить на четыре группы. Первая связана с нестационарностью уровня проникновения: PR изменяется во времени и пространстве, и его текущее значение, как правило, неизвестно. Вторая группа ограничений обусловлена систематическим смещением выборки: структура подвижных датчиков (преобладание грузовых ТС, междугородних автобусов) отличается от структуры общего потока. Третья группа связана с невозможностью прямого измерения интенсивности и плотности без дополнительных модельных предположений. Четвертая – с вопросами конфиденциальности и правового регулирования сбора и передачи геолокационных данных транспортных средств.

Среди перспективных направлений исследований для условий Республики Беларусь выделим оценку фактического уровня проникновения PVD на основных маршрутах республиканской дорожной сети; разработку алгоритмов коррекции смещения выборки с учетом структуры потока на двухполосных дорогах; создание методики размещения опорных сечений, оптимизирующей суммарную точность оценки параметров потока при заданном бюджете на стационарную инфраструктуру; интеграцию PVD с данными системы взимания платы за проезд (BelToll), уже обеспечивающей пространственный охват основных республиканских магистралей³.

Заключение. Использование транспортных средств в качестве подвижных датчиков порождает комплекс методологических следствий, затрагивающих все этапы транспортного мониторинга – от сбора данных

¹ ISO/TS 19468:2019 Intelligent transport systems – Data interfaces between centres for transport information and control systems – Platform-independent model specifications for data exchange protocols for transport information and control systems. – Geneva: ISO, 2019. – 120 p.

² EN 16157-1:2018. Intelligent transport systems – DATEX II data exchange specifications for traffic management and information – Part 1: Context and framework = Интеллектуальные транспортные системы. Спецификации обмена данными DATEX II для управления дорожным движением и информирования. Часть 1. Контекст и общая структура. – Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2018. – 50 p.

³ О некоторых вопросах функционирования электронной системы сбора платы за проезд транспортных средств по отдельным автомобильным дорогам Республики Беларусь: Указ Президента Республики Беларусь, 27 сент. 2012 г., № 426 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2012. – 1/13874.

до принятия управленческих решений. Лагранжев характер PVD-измерений обеспечивает непрерывный пространственный охват при низких затратах, но одновременно ограничивает перечень непосредственно измеряемых параметров, исключая прямую оценку интенсивности и плотности потока.

Для условий Республики Беларусь переход к распределенному мониторингу на основе PVD представляется обоснованным в силу значительной протяженности и разреженности дорожной сети, наличия массива коммерческого транспорта, оснащенного системами ГЛОНАСС/GPS, и высокой стоимости развертывания стационарных детекторов. При этом PVD не может рассматриваться как полная замена стационарной инфраструктуры; оптимальным является гибридный подход, при котором стационарные посты выполняют функцию опорных калибровочных сечений, а PVD обеспечивает пространственную интерполяцию параметров потока между ними.

Внедрение PVD в практику управления дорожным движением требует решения ряда нормативно-методических задач: утверждения требований к качеству и формату данных, разработки процедур валидации, определения минимально допустимого уровня проникновения для различных типов дорог и сценариев управления. Формирование такой нормативной базы на национальном уровне с учетом международных стандартов ISO и DATEX II является необходимым условием для масштабного практического применения рассмотренного подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Martin P. T., Feng Y., Wang X. Detector technology evaluation. – Utah: University of Utah, 2003. – 132 p.
2. Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: the Mobile Century field experiment / J. C. Herrera, D. B. Work, R. Herring et al. // Transportation Research Part C. – 2010. – Vol. 18, No. 4. – P. 568–583.
3. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. – 1952. – Vol. 1, No. 3. – P. 325–362.
4. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
5. Srinivasan K.K., Jovanis P.P. Determination of number of probe vehicles required for reliable travel time measurement in urban network // Transportation Research Record. – 1996. – No. 1537. – P. 15–22. DOI: 10.3141/1537-03
6. Jenelius E., Koutsopoulos H. N. Probe vehicle data sampled by time or space: consistent travel time allocation and estimation // Transportation Research Part B. – 2015. – Vol. 71. – P. 120–137. DOI: 10.1016/j.trb.2014.10.008
7. Qudus M. A., Ochieng W. Y., Noland R. B. Current map-matching algorithms for transport applications: state-of-the art and future research directions // Transportation Research Part C. – 2007. – Vol. 15, No. 5. – P. 312–328. DOI: 10.1016/j.trc.2007.05.002
8. Newson P., Krumm J. Hidden Markov map matching through noise and sparseness // Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL. – 2009. – P. 336–343. DOI: 10.1145/1653771.1653818
9. Edie L. C. Discussion of traffic stream measurements and definitions // Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow / London (25–27 June 1963). – P. 139–154.
10. Greenshields B. D. A study of traffic capacity // Proceedings of the Highway Research Board. – 1935. – Vol. 14. – P. 448–477.
11. Floating car data adaptive traffic signals: a description of the first real-time experiment with «connected» vehicles / V. Astarita, V. P. Giofre, D. C. Festa et al. // Electronics. – 2020. – Vol. 9, No. 1. – Art. 114. DOI: 10.3390/electronics9010114
12. A traffic model for velocity data assimilation / D. B. Work, S. Blandina, O.-P. Tossavainen et al. // Applied Mathematics Research eXpress. – 2010. – No. 1. – P. 1–35. DOI: 10.1093/amrx/abq002
13. Zheng F., Zuylen H. Van. Urban link travel time estimation based on sparse probe vehicle data // Transportation Research, Part C. – 2013. – Vol. 31. – P. 145–157. DOI: 10.1016/j.trc.2012.04.007
14. Leduc G. Road traffic data: collection methods and applications // JRC Technical Notes. – Luxembourg: European Commission, 2008. – 55 p.
15. Brustad T. F., Pedersen A., Bang B. A field study of sensors for winter road assessment // Transportation Research. Interdisciplinary Perspectives. – 2020. – Vol. 7(6). – 100206. DOI: 10.1016/j.trip.2020.100206

Поступила 05.07.2026

METHODOLOGICAL IMPLICATIONS OF USING VEHICLES AS MOBILE SENSORS FOR TRAFFIC MONITORING

D. KAPSKI, S. BOGDANOVICH
(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article provides a methodological analysis of using vehicles equipped with satellite navigation receivers as mobile sensors (probe vehicle data, PVD) for traffic monitoring. Requirements for sample representativeness, trajectory data processing, macroscopic traffic flow reconstruction, and volume estimation under incomplete data are examined. A PVD integration framework with intelligent transportation system (ITS) components adapted to the road network of the Republic of Belarus is proposed. Approaches to data validation are substantiated and method limitations are described. It is shown that the transition to distributed monitoring based on traffic flow fundamentally alters functional requirements for stationary road infrastructure.

Keywords: probe vehicles, probe vehicle data, traffic monitoring, trajectory data, intelligent transportation systems, traffic flow, road infrastructure, Republic of Belarus.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

канд. техн. наук, доц. А.С. ГУРСКИЙ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрены аппаратные и программные способы повышения точности получения результатов дистанционной диагностики (ДД) аккумуляторов ВНЭЭ ЭАТС. Это в перспективе повысит качество технической эксплуатации путем оперативного выявления проблемных ячеек, планирования выполнения текущего ремонта, корректирования нормативов технического обслуживания, а также прогнозирования состояния ВНЭЭ для приближения ее к идеальному ресурсу. Основное направление – это получение данных без искажений от воздействия электромагнитных помех на борту ЭАТС. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании применяемых систем, а также при конструировании новых. Результаты дистанционной диагностики отдельных ячеек и ВНЭЭ в целом могут быть использованы для корректирования режимов работы на маршруте и выбору маршрутов по фактическому состоянию для отработки максимально-возможного количества циклов заряд-разряд, повышения культуры водителей, а в перспективе стать основой для применения в беспилотном управлении.

Работа включает анализ алгоритмов чтения данных, способам контроля достоверности параметров в пакете данных для исключения погрешности при выполнении расчетов как на борту ЭАТС, так и на удаленной системе контроля.

Ключевые слова: высоковольтный накопитель электрической энергии, ячейка, параметры, шины данных, дистанционная диагностика, контрольная сумма.

Введение. В Республике Беларусь огромное значение придается электрическому транспорту, особенно в крупных населенных пунктах, для обеспечения экологической безопасности. На улицах городов можно видеть разнообразные электрические автотранспортные средства (ЭАТС) как личного, так и общественного пользования [1]. Особый интерес представляют электробусы и троллейбусы с автономным ходом. Они обладают замечательными эксплуатационными свойствами, однако на данном этапе развития имеют уязвимый компонент, от которого зависит надежность всего ЭАТС, – это высоковольтный накопитель электрической энергии (ВНЭЭ). ВНЭЭ широко применяются как на мобильных, так и на стационарных устройствах для хранения электрической энергии. В мобильных устройствах, например, ЭАТС, критически важным является удельная энергоемкость по массе¹:

$$W_m = \frac{E}{m}, \text{ кВтч/кг}, \quad (1)$$

где E – энергоемкость, кВтч; m – масса накопителя (ячейки).

ВНЭЭ электротранспортных средств требуется заменить, когда остаточная емкость снижается до 70–80% от первоначальной, т.к. они больше не могут обеспечивать нужный запас хода [2]. Предлагается вторичное использование ВНЭЭ в стационарных устройствах в рамках концепции «Second Life» [2]. Батареи «Second Life» обходятся на 30–50% дешевле новых стационарных накопителей [3]. В низконагруженных режимах по величине силы тока и стабильной температуре батарея предсказуемо и безопасно сможет работать до достижения 60% от номинальной емкости².

Предлагаемая работа позволяет поднять точность получения результатов дистанционной диагностики аккумуляторов ВНЭЭ ЭАТС, что в перспективе повысит качество технической эксплуатации путем оперативного выявления проблемных аккумуляторов, планирования выполнения текущего ремонта, корректирования нормативов технического обслуживания, а также прогнозирования состояния ВАКБ для приближения ее ресурса к идеальному [4; 5].

Ранее, при исследованиях с высоковольтными накопителями, применяли простейшую систему считывания данных преобразователем COM – USB. Чтение данных выполнялось в соответствии с разработанным алгоритмом [6]. Цель настоящей работы – анализ причин возникновения помех в цепях ВНЭЭ и путей их снижения для повышения точности и достоверности данных на этапе получения.

¹ ГОСТ Р 58092.1-2018 (МЭК 62933-1:2016). Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Часть 1. Терминология. – Введ. 12.04.18. – М.: Стандартинформ, 2018. – 19 с.

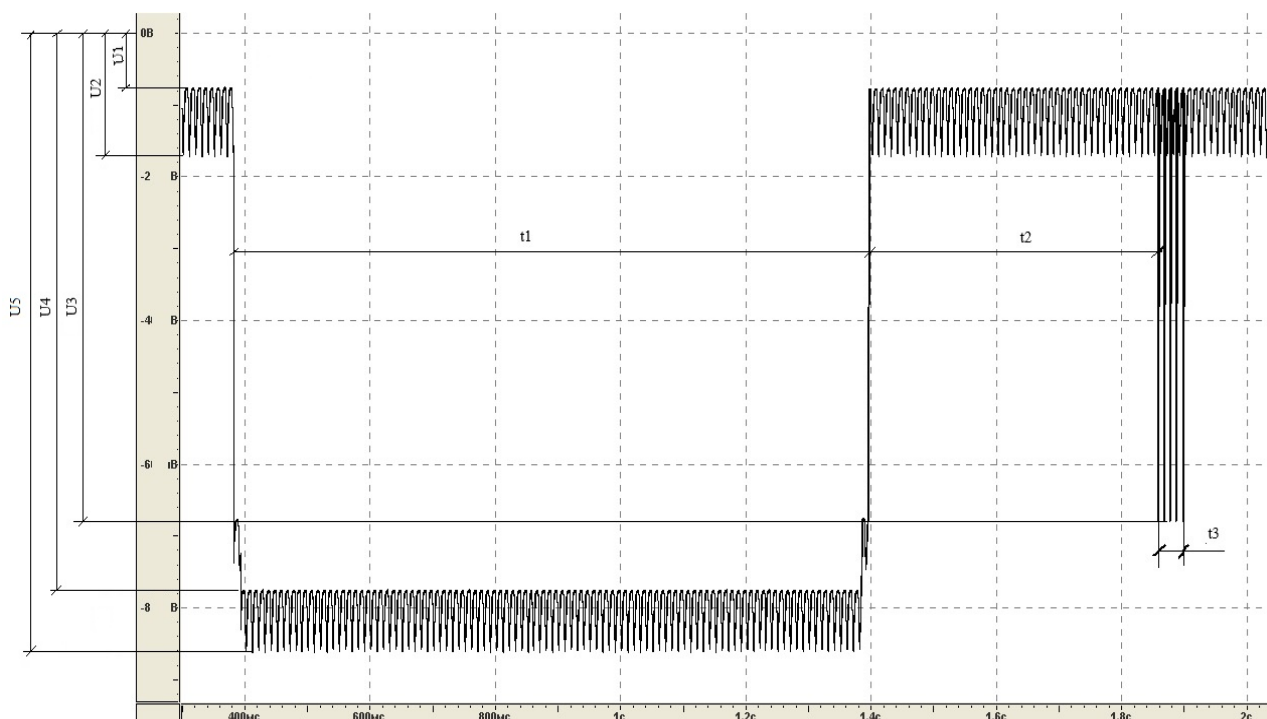
² ISO 12405-4:2018. Electrically propelled road vehicles – Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 4: Performance testing. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018. – 59 p.

Основная часть. В предыдущей работе был рассмотрен и применен протокол обмена данными RS-232, использующий стандарт физического уровня для асинхронной последовательной передачи данных между двумя устройствами, по причине своей простоты позволяющий работать с классическим COM – портом [7]. Фрагмент потока данных, считанных с информационной шины ЭАТС таким образом, приведен на рисунке 1.

```
09:58:38.658 -> 170 85 160 46 100 89 179 10
09:58:38.658 -> 170 85 160 47 100 88 179 10
09:58:38.705 -> 170 85 160 48 96 91 171 10
09:58:38.705 -> 170 85 160 49 101 91 175 10
09:58:38.705 -> 170 85 160 50 101 91 172 10
09:58:38.705 -> 170 85 160 51 100 91 172 10
09:58:38.705 -> 170 85 160 52 101 92 173 10
```

Рисунок 1. – Фрагмент потока данных информационной шины

Недостатком реализации активной балансировки, применяемой ВНЭЭ МА3-203Т70, является передача управляющего сигнала на балансировку в общую шину цифровых данных. Данный сигнал включается на определенное время с длительностью, пропорциональной дисбалансу ячеек, в соответствии с осциллограммой, представленной на рисунке 2.



U1 – наименьшее значение напряжения уровня рецессивного состояния шины данных, В; U2 – наибольшее значение напряжения уровня рецессивного состояния шины данных, В; U3 – амплитуда колебаний цифрового информационного сигнала в доминантном состоянии, В; U4 – наименьшее значение сигнала включения активной балансировки, В; U5 – наибольшее значение сигнала включения активной балансировки, В; t1 – длительность включения активной балансировки, с; t2 – длительность паузы между отключением активной балансировки и цифровым информационным сигналом, с; t3 – длительность информационного сигнала, с.

В примере: U1 = -0,8 В; U2 = -1,7 В; U3 = -6,8 В; U4 = -7,7 В; U5 = -8,6 В; t1 = 1,02 с; t2 = 0,46 с; t3 = 0,02 с

Рисунок 2. – Осциллограмма сигнала в шине данных в режиме активации системы балансировки высоковольтного накопителя электрической энергии

Даже без выполнения расчетов из осциллограммы видно, что амплитуда U5 и длительность t1 сигнала включения балансировки в цифровой шине больше максимального размаха цифрового информационного сигнала U3 с длительностью t3. Одновременно с этим наблюдается отсутствие четких уровней сигналов в шине данных за счет появления электромагнитных помех. Определим амплитуды помех и их влияние в абсолютном и относительном виде на информационный сигнал. Все отрицательные значения на графике связаны с тем, что в штатном режиме передача осуществляется по отношению к положительному сигнальному проводу.

Амплитуда уровня помехи напряжения рецессивного состояния шины данных $\Delta U_{п1}$ определяется по формуле

$$\begin{aligned}\Delta U_{п1} &= U2 - U1, \text{ В.} \\ \Delta U_{п1} &= -1,7 - (-0,8) = -0,9 \text{ В.}\end{aligned}\quad (2)$$

Действующее значение уровня напряжения рецессивного состояния шины данных U_d определяется как

$$U_d = U1 + \frac{\Delta U_{п1}}{2}, \text{ В.} \quad (3)$$

Действующее значение уровня напряжения рецессивного состояния шины данных:

$$U_d = -0,8 + (-0,9) = -1,7 \text{ В.}$$

Относительно уровня действующего напряжения определяются значения других уровней напряжений.

Подобным образом проводится расчет амплитуды уровня помех сигнала включения активной балансировки ΔU_b :

$$\begin{aligned}\Delta U_b &= U5 - U4, \text{ В.} \\ \Delta U_b &= -8,6 - (-7,7) = -0,9 \text{ В.}\end{aligned}\quad (2)$$

Как видно по результатам расчета, электромагнитная помеха при включенном режиме активной балансировки такая же, как и в рецессивном режиме. Действующее значения сигнала включения активной балансировки определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}U_{db} &= U4 + \frac{\Delta U_b}{2}, \text{ В.} \\ U_{db} &= -7,7 + \frac{-0,9}{2} = -8,15 \text{ В.}\end{aligned}\quad (3)$$

Определяется напряжение включенного состояния активной балансировки:

$$\begin{aligned}U_b &= U_{db} - U_d, \text{ В.} \\ U_b &= -8,15 - (-1,7) = -6,45 \text{ В.}\end{aligned}\quad (2)$$

Амплитуда цифрового информационного сигнала в шине данных:

$$\begin{aligned}\Delta U_i &= U3 - U_d, \text{ В.} \\ \Delta U_i &= -6,8 - (-1,7) = -5,1 \text{ В.}\end{aligned}\quad (3)$$

Из приведенного расчета видно, что U_b больше ΔU_i . Это подтверждает, что напряжение включенного состояния активной балансировки больше амплитуды цифрового информационного сигнала в шине данных, и доказывает факт наличия помехи приему полезных данных из шины в указанном транспортном средстве. Данный эффект наблюдается в большей мере в режиме рекуперации и заряда. Верхние и нижние уровни действующего напряжения также имеют достаточно высокие размахи колебаний, составляющие 0,9 В. Уровень помехи δ в относительном выражении составит:

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{\Delta U_{п1}}{\Delta U_i} * 100, \% \\ \delta &= \frac{-0,9}{-5,1} * 100 = 17,6 \%\end{aligned}\quad (4)$$

Полученное значение в относительном виде показывает, что уровень помех большой, и следует принимать меры по обеспечению качества передачи информации.

В результате при передаче такого сигнала входные буферы микропроцессоров переполняются, и зачастую происходит обработка данного сигнала, что значительно замедляет обработку полезной информации и выдача сформированного сигнала происходит с отставанием от реального времени.

Выбор способа проверки целостности передаваемых данных. Рассмотрим пример одного сообщения из пакета сообщений, полученного из шины данных ВНЭЭ исследуемого ЭАТС в момент времени, указанного вначале:

09:58:38.705 -> 170 85 160 51 100 91 172 10

Перед проверкой целостности данных необходимо определить, какой именно алгоритм заложен в систему обмена данными. В протоколах обмена данными в системе управления батареей (BMS – Battery Management System) через последовательный порт RS485 число 10 в качестве конечного байта означает символ перевода строки LF (Line Feed) [9].

Рассмотрим три самых распространенных метода определения контрольной суммы и подберем наиболее приемлемый.

Метод аддитивной контрольной суммы представляет простую сумму всех байтов или сложение по модулю. Этот вариант часто используется в простых протоколах, где контрольная сумма – просто остаток от деления суммы всех байтов на 256. Проведем проверку данного предположения для приведенного примера. Результатом деления на 256 должно стать число 172. Выполним пошаговое сложение в соответствии с таблицей 1 и сравним полученные суммы с предполагаемым результатом на каждом шаге.

Таблица 1. – Результаты пошагового сложения методом аддитивной контрольной суммы

Шаг	Операция	Промежуточный результат в десятичном виде (Dec)	Промежуточный результат в шестнадцатеричном виде (Hex)
1 (сложение двух первых значений)	170 + 85	255	0xFF
2 (сложение со следующим значением)	255 + 160	415	0x019F
3 (сложение со следующим значением)	415 + 51	466	0x01D2
4 (сложение со следующим значением)	466 + 100	566	0x0236
5 (получение абсолютной суммы)	566 + 91	657	0x0291
6 (остаток после выделения целых)	657 – (256*2)	145	0x0091
7 (инверсивное значение)	256 – 145	111	0x006F

Если используется классический алгоритм Checksum, то контрольная сумма обычно занимает 1 байт, старший разряд отбрасывается. В нашем случае выделяется полное число байтов, здесь оно составляет 2. В результате остается 145 (0x91). В некоторых случаях в качестве контрольной суммы может быть применено инвертирование значения или дополнение до нуля, где сумма всех байтов вместе с контрольной суммой должна быть кратна 256 (0xFF). Обратите внимание, что сложение двух первых байтов дает число 256 (0xFF), что практически не влияет на результат расчета контрольной суммы. После проведения исключения старших разрядов остаток – число 111 (0x6F). Как видно из результатов, ни одно из значений не соответствует указанному значению в примере. Следовательно, данный метод не подходит для расчета контрольной суммы применяемого устройства.

Метод продольной избыточной проверки LRC (Longitudinal Redundancy Check). Продольная избыточная проверка известна как двумерная проверка четности. В этом методе данные, которые необходимо отправить, организуются в таблицы строк и столбцов. Блок битов делится на таблицу или матрицу строк и столбцов. Для обнаружения ошибки ко всему блоку добавляется избыточный бит, и блок передается приемнику. Приемник использует эту избыточную строку для обнаружения ошибки. После проверки данных на ошибки приемник принимает данные и отбрасывает избыточную строку битов.

Одной из разновидностей метода LRC является вертикальный контроль четности VRC (Vertical Redundancy Check), т.к. он дополняет контроль четности отдельных символов, создавая двухмерную схему обнаружения ошибок. Алгоритм контроля целостности данных, применяемый в методе продольной избыточной проверки, может быть применен в упрощенном виде как метод «побитовое исключающее ИЛИ» или XOR (eXclusive OR).

Метод «побитовое исключающее ИЛИ» имеет высокую популярность, т.к. относительно легко реализуется аппаратными устройствами. Следует отметить, что при данном методе необходимо учитывать, что в 90% инженерных протоколов стартовые маркеры (в нашем случае это AA 55) исключаются из расчета контрольной суммы. Это классическое правило построения промышленных протоколов: служебные байты начала пакета не участвуют в расчете помехоустойчивого кода – они всегда одинаковы. Контрольная сумма считается только для «полезных данных», которые идут следом (начиная с байта 160 (0x A0) и далее). Но если учесть эти данные, используя операцию «исключающее ИЛИ», заметим, что результатом является число 256 (0xFF), как и в случае с расчетом аддитивной контрольной суммы. Это не изменяет промежуточный результат, однако может привести к инверсии окончательного. Переведем байты в двоичный вид и применим «побитовое исключающее ИЛИ» последовательно:

AA = 10101010

55 = 01010101

Результат: AA XOR 55 = 11111111 (0XFF)

Проведем расчет контрольной суммы методом «побитовое исключающее ИЛИ». Перед выполнением расчетов исключаются стартовые маркеры и используются только полезные байты: 160, 51, 100, 91. К этим числам последовательно применяется операция «побитовое исключающее ИЛИ». Результаты расчетов методом «побитовое исключающее ИЛИ» приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, результат совпал с предпоследним значением, что указывает на правильность примененного метода. Использование контрольной суммы при построении базы данных по результатам считывания позволит с высокой точностью проводить дальнейшие расчеты, что в свою очередь снизит вероятность ошибки при расчете остаточной емкости и прогнозировании работоспособности высоковольтных накопителей энергии.

Таблица 2. – Результаты расчета методом «побитовое исключающее ИЛИ»

Шаг	Операция (XOR)	Промежуточный результат	
		в десятичном виде (Dec)	в двоичном виде (Bin)
1	1010 0000 0011 0011	147	1001 0011
2	1001 0011 0110 0100	247	1111 0111
3	1111 0111 0110 0100	172	1010 1100

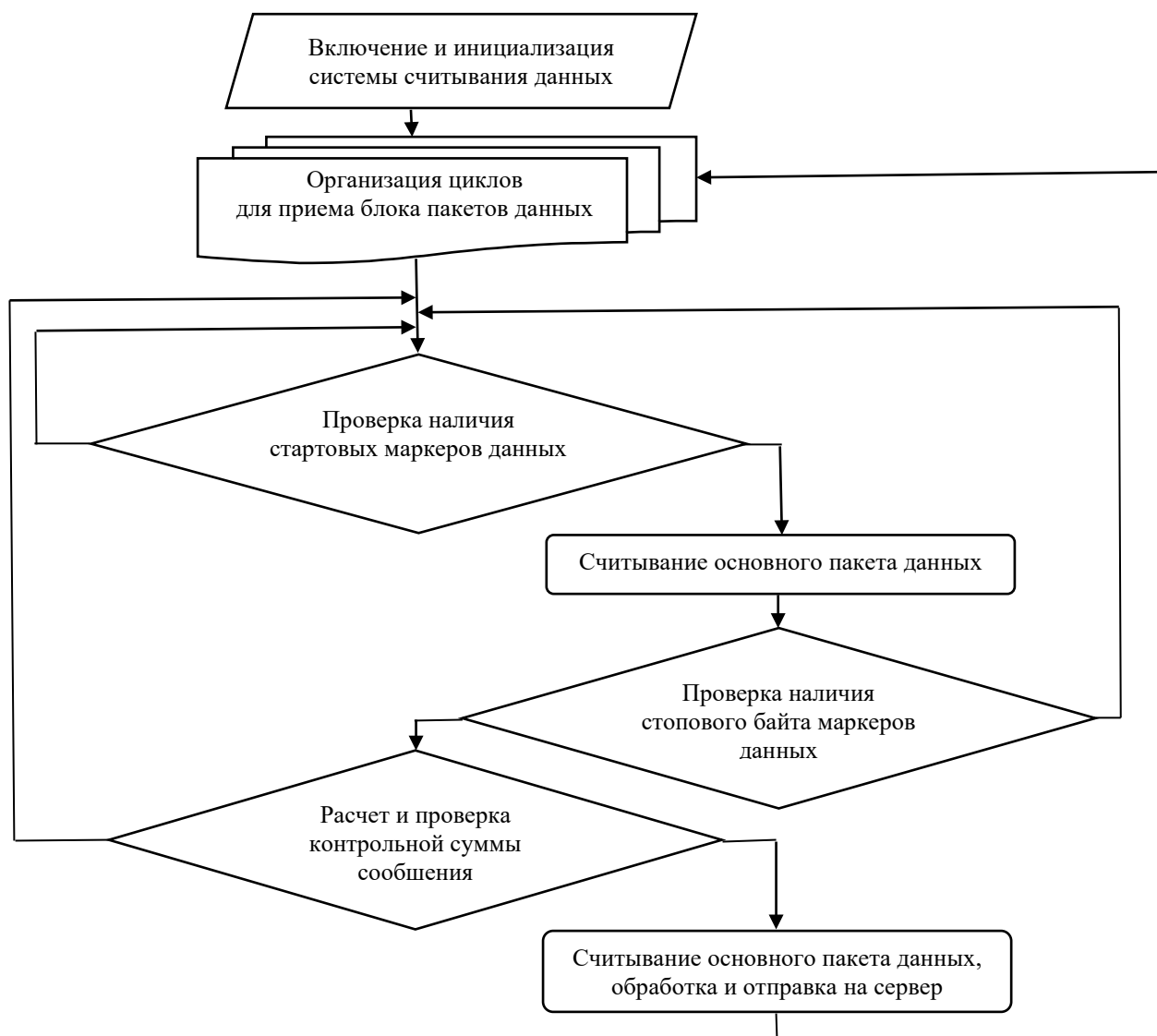


Рисунок 3. – Алгоритм считывания данных с использованием проверки контрольной суммы

Построение алгоритма считывания данных с использованием проверки контрольной суммы производится в соответствии с блок-схемой (см. рисунок 3). Изменение в программном обеспечении с использованием алгоритма позволит полностью исключить ошибки получаемой информации.

Анализ аппаратной части. После проведения испытаний с ВНЭЭ ЭАТС было установлено, что применяется однопроводная система передачи данных между отдельными ведомыми платами BMS и ведущей платой вместо двухпроводной с использованием стандарта Modbus RTU, который предназначен преимущественно для двухпроводной типа RS-485.

Особенностью топологической схемы на опытном троллейбусе является деление 160 ячеек на 4 модуля, в каждом из которых имеется 40 ячеек (аккумуляторов). На каждом аккумуляторе установлена ведомая Slave-плата, которая контролирует напряжение, температуру и степень заряда и отправляет информацию о состоянии в контроллер. Все платы соединяются параллельно в общую шину Modbus. Эта же плата может автоматически присваивать себе динамический идентификационный номер (ID). Механизм автоназначения идентификационных номеров может быть причиной неправильной идентификации в режиме эксплуатации, что в свою очередь приводит к повышению времени выявления дефектных ячеек. Принудительное присвоение идентификатора каждому модулю перед сборкой решает данную проблему, однако это увеличивает объем работ при сборке на этапе изготовления и при замене отдельных ячеек на этапе эксплуатации. Такой способ позволяет безошибочно выявлять неисправные аккумуляторы в процессе эксплуатации, а также вести учет состояния каждого аккумулятора на протяжении всего жизненного цикла, что особенно актуально для включения в систему «Умный автопарк» и вторичного использования в стационарных накопителях.

Гальваническая развязка. 160 ячеек в последовательном соединении дают напряжение в диапазоне от 432 В до 640 В [8]. Если использовать однопроводную схему без изоляции, то потенциал 160-й ячейки относительно 1-й мгновенно выведет контроллер из строя. Проще и дешевле развязать гальванически, изолировать одну линию связи, чем дифференциальную пару типа RS-485. Если делать на Modbus, то следует применять RS-485 или CAN вместо однопроводной схемы. Разница в один провод невелика, но дифференциальный сигнал RS-485 гораздо устойчивее к помехам, которые неизбежны в системе на 160 ячеек, особенно в экстремальных условиях.

Для исключения влияния требуется изменения режима балансировки путем изменения программного обеспечения ЭАТС. Другим способом следует исключить из работы аккумуляторы, имеющие сниженную емкость и повышенное внутреннее сопротивление. Достоверная информация по каждой ячейке позволяет спрогнозировать реальную емкость, что в свою очередь позволяет переупаковывать модули с одинаковыми параметрами. После выработки 20% ресурса требуется замена на новые ячейки [10]. А ячейки остаточными параметрами ниже 80% остаточной емкости использовать в стационарных системах накопления энергии.

Заключение. Таким образом, применение дистанционной диагностики ВНЭЭ позволяет оперативно предупреждать возникновение нештатных ситуаций с отключением систем автономного хода, выполнять своевременные техническое обслуживание и ремонт накопителей для сохранения в рабочем диапазоне, прогнозировать изменение ресурса в процессе эксплуатации, планировать выполнение капитального ремонта накопителей с использованием дефектовки и селективного группирования по фактическим параметрам работы отдельных ячеек, перевод накопителей или отдельных модулей в щадящие условия стационарных накопителей при достижении критических значений при эксплуатации в активном режиме с сохранением истории на протяжении всего жизненного цикла.

Разработанный алгоритм считывания данных с использованием проверки контрольной суммы позволяет не только достоверно получать данные, но и выявлять нарушения в работе шины данных и может быть применен при диагностировании и ремонте шины передачи данных.

По результатам выполненной работы разработаны предложения по изменению конструкции системы обмена информации со снижением помех при передаче данных, а также по изменению схемы управления активными балансирами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурский А.С., Савич Е.Л., Капустин В.В. Автотранспортные средства с электродвигателем: учеб. пособие. – Минск: Выш. шк., 2023. – 256 с.: ил.
2. Bergqvist N., Talakoob B. Comparative Life Cycle Assessment of Second Life NMC Battery and New LFP Battery for BESS Applications: master's thesis / Chalmers University of Technology. – Gothenburg, 2022. – 118 p. – URL: <https://odr.chalmers.se/items/fd064b63-2e0d-49c2-bd0d-f556953eda46> (date of access: 15.07.2026).
3. Engel H., Hertzke P., Siccario G. Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage: Report / McKinsey & Company. – New York: McKinsey, 2019. – 28 p. – URL: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/second-life-ev-batteries-the-newest-value-pool-in-energy-storage> (date of access: 15.07.2026).
4. Гурский А.С. Система удаленного мониторинга и дистанционной диагностики высоковольтных накопителей электроэнергии электрических автотранспортных средств // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С.В. Харитончик (гл. ред.) и др. – Минск: БНТУ, 2023. – Вып. 5. – С. 109–115.

5. Гурский А.С. Способы учета условий эксплуатации электрических автотранспортных средств при определении корректирующих коэффициентов периодичности и трудоемкости технического обслуживания и текущего ремонта // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С.В. Харитончик (гл. ред.) и др. – Минск: БНТУ, 2024. – Вып. 6. – С. 80–88.
6. Гурский А.С. Совершенствование дистанционной диагностики ячеек высоковольтной аккумуляторной батареи // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 1(49). – С. 79–88. DOI: 10.52928/2070-1616-2024-49-1-79-88
7. Гурский А.С., Седяко П.В. Анализ шины K-line, как первоисточника параметров для общего и поэлементного диагностирования = Analysis of the K-line bus as the primary source of parameters for general and element-by-element diagnostics // XI Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства: сб. материалов / Минск (12–16 дек. 2022 г.) / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 133–136.
8. Гурский А.С., Савич Е.Л. Параметры компонентов высоковольтной сети электромобилей и их расчет // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – № 2(48). – С. 50–59. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-48-2-50-59
9. Гурский А.С., Седяко П.В. Реверс-инжиниринг протоколов обмена шин данных электронных блоков управления = Reverse engineering of exchange protocols data bus of electronic control units // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С.В. Харитончик (гл. ред.) и др. – Минск: БНТУ, 2022. – Вып. 4. – С. 36–44.
10. Гурский А.С. Система удаленного мониторинга и дистанционной диагностики высоковольтных накопителей электроэнергии электрических автотранспортных средств // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С.В. Харитончик (гл. ред.) и др. – Минск: БНТУ, 2023. – Вып. 5. – С. 109–115.

Поступила 22.07.2026

IMPROVING THE ACCURACY OF REMOTE DIAGNOSTICS OF A HIGH-VOLTAGE BATTERY

A. GURSKY

(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article discusses hardware and software methods for increasing the accuracy of obtaining remote diagnostics (RD) results for high-voltage energy storage (HVES) batteries of electric vehicles (EV). This will ultimately improve the quality of technical operation by promptly identifying problematic cells, planning routine repairs, adjusting maintenance norm, and forecasting the condition of high-voltage energy storage devices to bring them closer to their ideal lifespan. The main focus is on obtaining data without distortion from the effects of electromagnetic interference on board the EV.

However, the obtained results can be used to improve the existing systems, as well as to design new ones. The results of remote diagnostics of individual cells and the entire high-voltage battery can be used to adjust operating modes along the route and select routes based on the actual condition to practice the maximum possible number of charge-discharge cycles, improving the culture of drivers, and, in the future, become the basis for application in unmanned control.

The work includes an analysis of data reading algorithms and methods for parameter reliability controlling a data packet to eliminate errors when performing calculations both on board the EATS and on a remote control system.

Keywords: high-voltage electric energy storage device, cell, parameters, data buses, remote diagnostics, checksum.

УДК 621.793

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-87-90

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФРИКЦИОННОГО НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ
ПЕРЕД ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ ПОКРЫТИЯ**

*канд. техн. наук, доц. В.М. ИЗОИТКО, канд. техн. наук, доц. К.В. БУЙКУС
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Разработана концепция технологии локального фрикционного нагрева поверхности деталей перед газотермическим напылением, основанная на преобразовании механической энергии трения в тепловую непосредственно в зоне последующего формирования покрытия. Метод разогревает только зону напыления, не перегревая всю деталь, что минимизирует термические деформации и изменения структуры основного металла. Метод обеспечивает термическую активацию поверхности, так нагрев способствует десорбции газов и влаги, а также ускоряет диффузионные процессы при контакте напыляемых частиц с подложкой. В результате фрикционной обработки создается необходимая шероховатость для механического сцепления частиц покрытия с основой. Фрикционный нагрев обеспечивает локальный нагрев до 500 °С за 8–12 с, что в 5 раз быстрее традиционных методов. Адгезионная прочность увеличивается на 30% благодаря формированию ювенильных поверхностей и термической активации. Анализ результатов исследований показал, что наибольшее влияние на температуру поверхности оказывают частота вращения ролика и сила прижатия, тогда как подача может использоваться как эффективный инструмент оперативного регулирования теплового режима. Предложены рекомендации по выбору технологических параметров процесса и последовательности выполнения операций подготовки поверхности перед газотермическим напылением.

Ключевые слова: газотермическое напыление, фрикционный нагрев, предварительный нагрев поверхности, адгезия покрытия, восстановление деталей, тепловые процессы, износостойкие покрытия.

Введение. Газотермические покрытия широко используются при восстановлении и упрочнении рабочих поверхностей деталей машин [1–4]. Несмотря на постоянное совершенствование технологий напыления, одной из основных причин разрушения покрытий остается недостаточная прочность сцепления с основным металлом [5; 6]. Анализ многочисленных исследований показывает, что качество соединения покрытия с подложкой определяется несколькими факторами: шероховатостью поверхности; степенью очистки; температурой детали перед напылением; остаточными напряжениями; наличием оксидных пленок; скоростью охлаждения покрытия [7–9].

Предварительный нагрев детали уменьшает температурный градиент между частицами расплава и поверхностью металла, способствует испарению влаги и адсорбированных газов, снижает вероятность образования трещин и улучшает пластическую деформацию частиц при ударе.

В настоящее время наиболее распространены следующие методы нагрева: газопламенный; индукционный; электрический; инфракрасный; нагрев в печах. Каждый из перечисленных способов имеет существенные недостатки. Газовые горелки требуют постоянного контроля пламени и характеризуются невысокой точностью регулирования температуры. Индукционные установки отличаются высокой стоимостью и сложностью настройки при обработке деталей различной формы. Электрические нагреватели обладают значительной инерционностью, а печной нагрев практически исключает возможность интеграции в поточную технологию восстановления.

Перегрев всей детали ведет к короблению, а недостаточный нагрев — к хрупкому отслоению покрытия из-за высоких термических напряжений.

Одним из перспективных направлений является использование тепловой энергии, выделяемой при трении. Фрикционный нагрев обеспечивает локальный подвод теплоты непосредственно в зону последующего напыления, не требует дополнительных источников высокотемпературной энергии и отличается высокой энергетической эффективностью. Однако вопросы выбора рациональных режимов нагрева, оценки распределения температуры и влияния параметров процесса на качество покрытия исследованы недостаточно.

В связи с этим актуальной задачей является разработка технологии предварительного фрикционного нагрева поверхности детали, обеспечивающей повышение эксплуатационных характеристик газотермических покрытий при минимальных энергетических затратах.

Основная часть. Технология фрикционного нагрева. Исследования показывают, что прочность сцепления покрытия определяется не только механическим зацеплением расплавленных частиц за микронеровности поверхности, но и термическими, диффузионными и металлургическими механизмами формирования межфазной границы.

Особое внимание в современных работах уделяется температурному состоянию поверхности детали непосредственно перед напылением. Предварительный нагрев способствует: уменьшению температурного перепада между расплавленной частицей и основой; снижению скорости мгновенного охлаждения; уменьшению остаточных напряжений; удалению влаги и адсорбированных загрязнений; улучшению растекания частиц по поверхности.

Цель исследования – разработка энергоэффективной технологии локального фрикционного нагрева поверхности детали перед газотермическим напылением покрытия, обеспечивающей повышение прочности сцепления покрытия с основным металлом.

Предлагаемый способ основан на преобразовании механической энергии вращения инструмента в тепловую энергию, возникающую вследствие сил сухого трения.

Дополнительным преимуществом технологии является возможность объединения операций механической подготовки поверхности и предварительного нагрева в едином технологическом цикле, что позволяет уменьшить длительность восстановительного процесса.

Схема процесса включает: вращающийся стальной ролик; механизм регулирования усилия прижатия; привод вращения; газотермический аппарат, расположенный за зоной нагрева.

Методика экспериментальных исследований. Экспериментальная установка включает следующие основные узлы: станину; электропривод вращения ролика; шпиндель; фрикционный ролик; механизм регулирования усилия прижатия; систему линейной подачи детали; лазерный пирометр; тепловизор; тензодатчик силы; систему регистрации данных; блок управления.

В качестве источника нагрева используется цилиндрический ролик из закаленной инструментальной стали HRC 58–60. Диаметр ролика принимается 60 мм. Ширина рабочей поверхности – 20 мм. Для исследования используются цилиндрические образцы диаметром 50 мм из Стали 45. Для напыления использовали проволоку Нп-40Х13. Толщина покрытия 0,6–0,8 мм.

Напыление осуществляли активированной дуговой металлизацией сразу после прохождения зоны фрикционного нагрева. Расстояние между роликом и распылителем принимается 40–60 мм. Это обеспечивает минимальные потери температуры поверхности.

Температура определяется двумя независимыми методами. Первый – лазерный пирометр. Второй – тепловизионная съемка. Погрешность измерений не превышает ± 2 °С.

Определение адгезионной прочности покрытия проводили в соответствии с международным стандартом ASTM C633.

Результаты исследования влияния частоты вращения ролика на температуру поверхности приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Влияние частоты вращения ролика на температуру поверхности

Частота вращения, мин ⁻¹	Температура поверхности, °С
600	108
800	142
1000	174
1200	206
1400	236
1600	267

Из таблицы 1 видно, что в диапазоне до 1400 мин⁻¹ температура возрастает практически пропорционально скорости вращения. При дальнейшем увеличении скорости влияние конвективного охлаждения и изменение условий трения могут привести к отклонению зависимости от линейной. Повышение частоты вращения более 1400 мин⁻¹ способно вызвать локальный перегрев поверхности, особенно при обработке тонкостенных деталей.

Результаты исследования влияния усилия прижатия на температуру поверхности приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Влияние усилия прижатия на температуру поверхности

Усилие прижатия, Н	Максимальная температура, °С
400	96
600	138
800	177
1000	214
1200	247

Увеличение силы прижатия приводит к росту мощности трения и, как следствие, к повышению максимальной температуры поверхности. Полученная зависимость близка к линейной в рассматриваемом диапазоне режимов. При дальнейшем увеличении усилия прижатия следует учитывать возможность изменения коэффициента трения и возникновения локальной пластической деформации поверхности, что требует более сложной контактной модели.

Продольная подача определяет продолжительность контакта ролика с отдельным участком поверхности и существенно влияет на величину накопленной тепловой энергии (таблица 3).

Повышение подачи приводит к уменьшению времени теплового воздействия. Следовательно, скорость подачи может использоваться как эффективный параметр регулирования процесса нагрева.

Таблица 3. – Расчетная температура поверхности при различной подаче

Подача, мм/мин	Температура, °C
50	254
100	223
150	196
200	171
250	148

Испытания на адгезионную прочность покрытия показали следующие результаты:

- без нагрева: 35 МПа;
- нагрев горелкой (250 °C): 48 МПа;
- фрикционный нагрев (250 °C): 62 МПа.

Обсуждение результатов. Локальный фрикционный нагрев формирует устойчивую зону с повышенной температурой непосредственно перед нанесением газотермического покрытия. Предлагаемая технология обеспечивает нагрев только поверхностного слоя, участвующего в формировании соединения покрытия с основным металлом.

Результаты экспериментов показывают, что при оптимальных параметрах режима (силы прижатия, скорости вращения ролика и подачи) температура поверхности достигает 180–250 °C, при этом обеспечивается снижение температурного градиента между расплавленными частицами и подложкой.

Увеличение силы прижатия приводит к росту температуры в зоне контактного воздействия и в рассматриваемом диапазоне зависимость близка к линейной. Однако дальнейшее увеличение усилия вызывает локальную пластическую деформацию поверхности и ускоренный износ ролика.

Частота вращения ролика оказывает наибольшее влияние на интенсивность нагрева поверхности детали. При высокой частоте вращения возрастают тепловые потери за счет конвекции и изменяются условия трения.

Увеличение подачи ведет к уменьшению времени контакта ролика с отдельным участком поверхности, в результате чего уменьшается накопленная тепловая энергия. Именно подачей можно оперативно управлять температурой нагрева без изменения конструкции оборудования.

Основным критерием выбора режима является обеспечение температуры поверхности в диапазоне 180–250 °C, достаточной для удаления адсорбированной влаги, уменьшения температурного градиента между расплавленными частицами и основным металлом и снижения уровня остаточных напряжений при формировании покрытия.

Выбор режима рекомендуется осуществлять в следующей последовательности:

- определить материал детали;
- определить теплофизические свойства материала;
- выбрать материал ролика;
- определить допустимую температуру предварительного нагрева;
- рассчитать необходимую мощность фрикционного нагрева;
- определить усилие прижатия;
- выбрать скорость вращения ролика;
- определить скорость подачи;
- выполнить проверочный тепловой расчет;
- провести корректировку режима по результатам измерения температуры поверхности.

По результатам расчетов рекомендуемый диапазон технологических параметров приведен в таблице 4.

Таблица 4. – Рекомендуемые режимы фрикционного нагрева

Параметр	Рекомендуемое значение
Диаметр ролика, мм	50–70
Материал ролика	инструментальная сталь HRC 58–62
Усилие прижатия, Н	700–1100
Частота вращения, мин ⁻¹	1000–1400
Скорость подачи, мм/мин	80–180
Ширина ролика, мм	15–25
Температура поверхности, °C	180–250

Данный диапазон может корректироваться в зависимости от материала детали, ее геометрии и выбранного способа газотермического напыления. Фрикционный нагрев перед напылением улучшает адгезионную прочность покрытий, разрушая оксидные пленки, вызывая диффузию элементов на 3–5 мкм и снижая пористость приграничного слоя.

Заключение. Разработана концепция технологии локального фрикционного нагрева поверхности деталей перед газотермическим напылением, основанная на преобразовании механической энергии трения в тепловую непосредственно в зоне последующего формирования покрытия.

Метод разогревает только зону напыления, не перегревая всю деталь, что минимизирует термические деформации и изменения структуры основного металла. Метод обеспечивает термическую активацию поверхности, так нагрев способствует десорбции газов и влаги, а также ускоряет диффузионные процессы при контакте напыляемых частиц с подложкой.

В результате фрикционной обработки создается необходимая шероховатость для механического сцепления частиц покрытия с основой. Фрикционный нагрев обеспечивает локальный нагрев до 500 °С за 8–12 с, что в 5 раз быстрее традиционных методов. Адгезионная прочность увеличивается на 30% благодаря формированию ювенильных поверхностей и термической активации.

Анализ результатов исследований показал, что наибольшее влияние на температуру поверхности оказывают частота вращения ролика и сила прижатия, тогда как подача может использоваться как эффективный инструмент оперативного регулирования теплового режима. Предложены рекомендации по выбору технологических параметров процесса и последовательности выполнения операций подготовки поверхности перед газотермическим напылением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдаев Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. – М.: КХТ, 2004. – 134 с.
2. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.
3. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование: учеб. для вузов. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
4. Газотермическое напыление / Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов, В.А. Вахалин и др.; общ. ред. Л.Х. Балдаев. – М.: Маркет ДС Корпорейшн, 2007. – 342 с.
5. Павлов А.Ю., Овчинников В.В., Шляпин А.Д. Основы газотермического напыления защитных покрытий: учеб. пособие. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 300 с.
6. Ивашко В.С., Изоитко В.М., Буйкус К.В. Технологические рекомендации по восстановлению деталей горношахтного оборудования газотермическим напылением // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Автомобиле- и тракторостроение» / Минск (25–28 мая 2021 г.). В 2 т. – Минск: БНТУ, 2021. – Т. 2. – С. 37–40.
7. Буйкус К.В., Изоитко В.М. Исследование триботехнических свойств материалов для газотермического напыления покрытий на шейки коленчатых валов // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в автомобилестроении» / Минск (04–07 июня 2025 г.). В 2 т. – Минск: БНТУ, 2025. – Т. 2. – С. 8–12.
8. Коробов Ю.С. Анализ свойств газотермических покрытий: учеб. пособие. В 2 ч. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – Ч. 2: Оценка параметров покрытий. – 92 с.
9. Буйкус К.В., Изоитко В.М. Исследование свойств покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением с механической активацией слоев // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в автомобилестроении» / Минск (04–07 июня 2025 г.). В 2 т. – Минск: БНТУ, 2025. – Т. 2. – С. 16–21.

Поступила 11.07.2026

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR FRICTIONAL HEATING OF THE SURFACE OF A PART BEFORE THERMAL SPRAYING OF A COATING

V. IZOITKO, K. BUIKUS

(Belarusian National Technical University, Minsk)

This concept is based on the conversion of mechanical frictional energy into thermal energy directly in the area where the coating will subsequently form. This method heats only the spray zone without overheating the entire part, minimizing thermal deformation and structural changes in the base metal. This method provides thermal activation of the surface, as heating promotes the desorption of gases and moisture and accelerates diffusion processes during contact between the sprayed particles and the substrate. Friction treatment creates the necessary roughness for mechanical adhesion of coating particles to the substrate. Friction heating provides localized heating up to 500 °C in 8–12 seconds, which is 5 times faster than traditional methods. Adhesive strength increases by 30% due to the formation of juvenile surfaces and thermal activation. Analysis of the research results showed that roller speed and contact force have the greatest impact on surface temperature, while feed can be used as an effective tool for quickly regulating the thermal regime. Recommendations are provided for selecting process parameters and the sequence of surface preparation operations prior to thermal spraying.

Keywords: thermal spraying, friction heating, surface preheating, coating adhesion, restoration of parts, thermal processes, wear-resistant coatings.

УДК 656.13.05

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-91-94

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ УСТРОЙСТВА ВЫДЕЛЕННЫХ ПОЛОС ДЛЯ МАРШРУТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

ЛЮ ЮЙВЭЙ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Предложено развитие методики обоснования выделенных полос для маршрутных пассажирских транспортных средств (МПТС), учитывающее неоднородность транспортного потока – проникновение на приоритетную полосу немаршрутных автомобилей, прежде всего электромобилей. Введен коэффициент неоднородности $\eta(r)$, уточнена четырехступенчатая классификация полос, а базовая граница пассажиропотока обоснована независимой экономической моделью. При доле посторонних транспортных средств $p = 5\text{--}12\%$ минимально необходимый пассажиропоток возрастает на $10\text{--}28\%$ относительно классического критерия; зависимость подтверждена натурными данными ($r = -0,89$; $RMSE = 4,79\%$).

Ключевые слова: маршрутные пассажирские транспортные средства, выделенные полосы, неоднородность транспортного потока, коэффициент неоднородности, провозная способность, пассажиропоток, электромобили, ступенчатая классификация, транспортное моделирование.

Введение. Привлекательность маршрутного транспорта – необходимое условие перехода города к устойчивой мобильности [1; 2]. На перегонах магистральных улиц приоритет МПТС чаще всего обеспечивается выделенной полосой, однако единого физически обоснованного критерия ее устройства нет: минимальный пассажиропоток, принятый за порог в разных странах, различается более чем на 9000 пасс./ч^{1,2,3,4} [3–6].

Р.М. Зубачик показал, что порогом целесообразности должна служить не интенсивность движения МПТС, а минимальный пассажиропоток, и предложил соответствующую эмпирическую формулу¹. Однако его методика построена и проверена для однородного потока безрельсового МПТС и не учитывает неоднородность реального движения – прежде всего выезд на выделенную полосу личных электромобилей и других немаршрутных средств, доля которых в городах Беларуси и Китая устойчиво растет.

Цель работы – научно обосновать и количественно формализовать влияние неоднородности потока на целесообразность и параметры выделенной полосы, развив методику, предложенную Р.М. Зубачиком¹.

Задача актуальна потому, что рост парка личных электромобилей (к 2030 г. – до 10–15% в отдельных городах) сопровождается их допуском на полосы со знаком 5.9.1 в экспериментальных зонах. Это противоречит идее приоритета: даже кратковременное присутствие постороннего автомобиля перед стоп-линией искажает данные адаптивного управления и снижает регулярность МПТС, подрывая доверие к нему как к альтернативе личному автомобилю.

Основная часть. Сопоставление зарубежных норм (таблица 1) обнаруживает значительный разброс критериев – прямое свидетельство того, что единой методики, пригодной сразу для Беларуси и Китая, не существует.

Таблица 1. – Минимальный пассажиропоток как критерий внедрения выделенных полос по данным разных стран

Источник	Мин. пассажиропоток, пасс./ч	Дополнительные условия
Южная Корея	1800–4500	60–150 ед./ч МПТС; 3–4 полосы
США, Великобритания	2000	интенсивность МПТС 50–200 ед./ч
Китай, GA/T 507-2004	2000 / 5000	насыщенность 0,5–0,8; ≥ 3 полосы
Беларусь, СН 3.03.06-2022	не используется	частота МПТС ≥ 30 ед./ч
Р.М. Зубачик, 2015	2050–2740	непрерывное/регулируемое движение

¹ Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. трансп. ун-т. – Київ, 2015. – 20 с.

² Highway Capacity Manual: HCM 2010 / Transportation Research Board. – Washington, DC: National Research Council, 2010. – 1650 p.

³ Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. – Köln, 2015. – 320 S.

⁴ National Association of City Transportation Officials (NACTO). Transit Street Design Guide. – Washington, DC: Island Press, 2016. – 328 p.

За основу принят критерий⁵ $Q_{Пjk} \geq Q_{Нjk}$ (где $Q_{Пjk}$ – пассажиропоток на приоритетной полосе j -го перегона в k -м направлении, $Q_{Нjk}$ – на неприоритетных полосах, пасс./ч). Он обобщен на смешанный состав МПТС через эффективную провозную способность полосы:

$$Q_{эфф,jk} = \eta(p) \cdot \sum q_{i,jk} \cdot U_i, \quad (1)$$

где $q_{i,jk}$ – интенсивность движения МПТС типа i , ед./ч; U_i – вместимость подвижной единицы, пасс.; m – число типов МПТС на маршруте (автобус, троллейбус, трамвай, электробус); $\eta(p)$ – коэффициент неоднородности потока.

Посторонний автомобиль, стоящий в очереди у стоп-линии, физически и алгоритмически перекрывает МПТС доступ к зоне детектирования систем адаптивного управления. Пока эта зона занята немаршрутным средством, система не распознает приближение МПТС и не инициирует продление разрешающего сигнала, поэтому влияние такого автомобиля на провозную способность непропорционально велико по сравнению с его долей в потоке: теряется не одна условная «единица» пропускной способности, а целый цикл приоритетного пропуска. Приняв поток проникновений простейшим, из теории массового обслуживания получаем вероятность занятости зоны детектирования как функцию интенсивности проникновений и времени ее удержания одним автомобилем: уже при интенсивности 30 ед./ч она достигает 39%. Отсюда эмпирически калиброванная зависимость:

$$\eta(p) = 1 - m_{бл} \cdot p, \quad m_{бл} \approx 1,8, \quad (2)$$

где p – доля посторонних транспортных средств на выделенной полосе. По выборке натурных наблюдений ($N = 18$) коэффициент корреляции Пирсона $r = -0,89$, среднеквадратическая ошибка $RMSE = 4,79\%$, что статистически подтверждает адекватность зависимости (2).

По величине пассажиропотока выделенные полосы разделены на четыре ступени (таблица 2), различающиеся не только порогом, но и способом обособления – от легкой разметки до полной физической изоляции полосы (BRT). Каждой ступени отвечает свой уровень капиталоемкости и необратимости решения, поэтому корректный выбор ступени важен экономически. Границы ступеней заданы как функция коэффициента неоднородности:

$$Q_{ст}^*(p) = Q_{ст,баз} / \eta(p). \quad (3)$$

Таблица 2. – Четырехступенчатая классификация выделенных полос

Ступень	Базовый ПП, пасс./ч	ПП при $p = 10\%$, пасс./ч	Тип обособления
1. Мягкий приоритет	до 1000	до 1220	разметка 1.23, знак 5.9.1
2. Жесткий базовый	1000–2500	1220–3049	сплошная линия 1.1
3. Пространственно-конструктивный	2500–4500	3049–5488	направляющие островки
4. Абсолютный системный (BRT)	свыше 4500	свыше 5488	физическая изоляция

Совместное влияние загрузки неприоритетных полос Z и доли посторонних средств p описывает зависимость

$$Q^*(Z, p) = Q_{баз} / [\eta(p) \cdot f(Z)], \quad f(Z) = 1 - \beta \cdot (Z/Z_{\max}). \quad (4)$$

При высокой загрузке ($Z \approx 0,75$) даже умеренная неоднородность ($p \approx 10\%$) поднимает требуемый порог выше 3300 пасс./ч (рисунок 1), перевода участок в следующую ступень раньше, чем при учете одного лишь фактора p .

Базовую границу $Q_{баз} = 2500$ пасс./ч (граница ступеней 2 и 3) мы обосновали независимо – из баланса социальных потерь времени вытесненного и приоритетного потоков:

$$Q_{баз} = C_{п} \cdot Y \cdot \Delta t / \Delta s, \quad (5)$$

где $C_{п}$ – провозная способность изымаемой полосы для индивидуального транспорта, авт./ч; Y – средняя занятость легкового автомобиля, пасс./авт.; Δt – прирост задержки вытесненного автомобиля, с; Δs – время, сэкономленное пассажиром МПТС благодаря приоритету, с.

При $C_{п} = 1200$ авт./ч, $Y = 1,4$ пасс./авт., $\Delta t = 100$ с, $\Delta s = 67$ с получаем $Q_{баз} \approx 2507$ пасс./ч. Это практически совпадает с величиной из зарубежных норм (см. таблицу 1) и говорит о ее объективности, а не о простом заимствовании.

Расчет для условий Минска показал: при текущей оценке доли посторонних средств $p = 5\%$ требуемый пассажиропоток растет на 10%, а при прогнозной на 2030 г. доле $p = 12\%$ – на 28%. По логистической модели роста доли электромобилей (рисунок 2) порог перехода к жесткому приоритету (ступень 2) может подняться

⁵ Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. транспорт. ун-т. – Київ, 2015. – 20 с.

с исходных 1000 до 1300–1400 пасс./ч к 2035 г. Практически это означает, что часть участков, сегодня формально проходящих по критерию, в среднесрочной перспективе перестанет ему соответствовать без организационных мер против проникновения немаршрутных средств; это следует учитывать при долгосрочном планировании маршрутной сети и пересмотре СН 3.03.06-2022⁶.

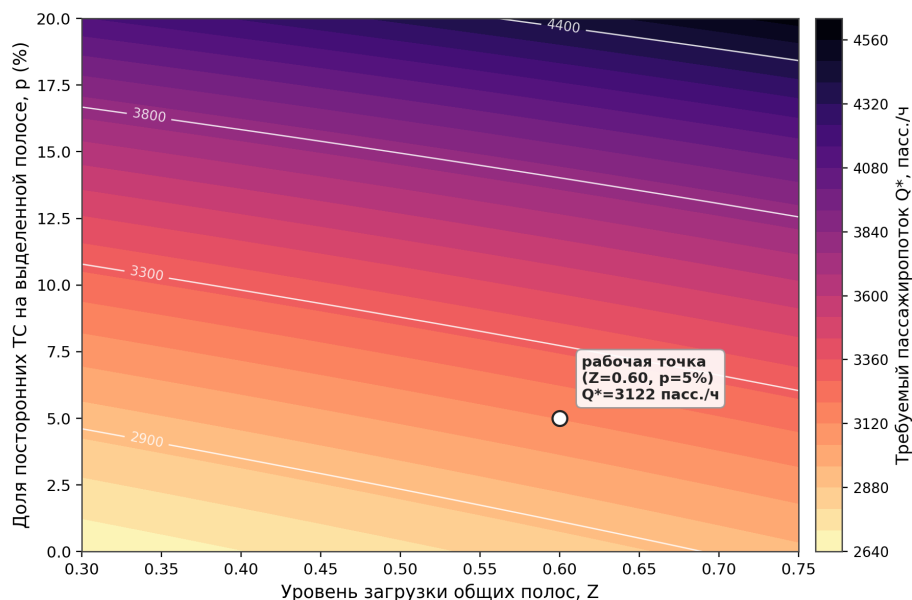


Рисунок 1. – Совместное влияние уровня загрузки Z и неоднородности потока p на требуемый пассажиропоток для границы Ступень 2 → Ступень 3

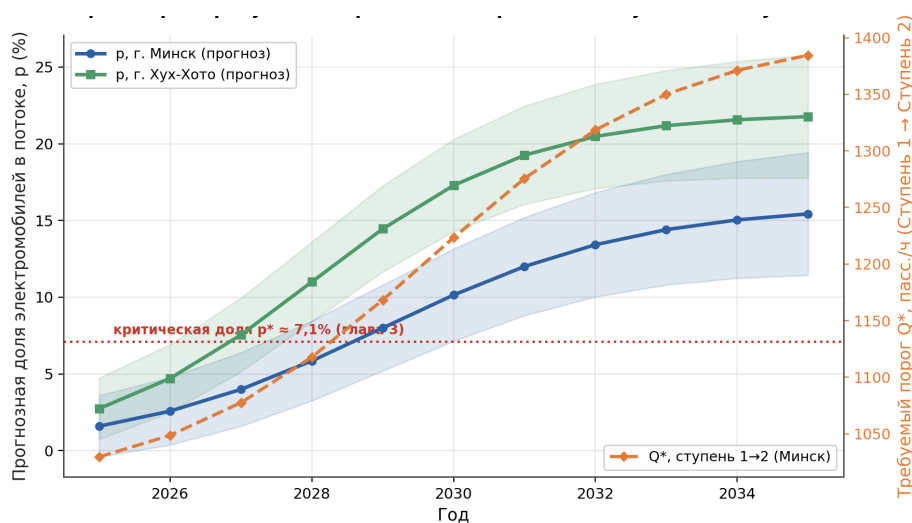


Рисунок 2. – Прогноз доли электромобилей в транспортном потоке (2025–2035) и траектория требуемого порога пассажиропотока для границы ступень 1 → ступень 2

Для применения методики без прямого обращения к формулам (1)–(5) удобна матрица выбора ступени приоритета по диапазонам Z и p , а объекты-кандидаты целесообразно ранжировать по трем показателям: фактической интенсивности движения МПТС, измеренной натурно задержке и текущей либо прогнозной доле электромобилей на участке. Такой подход делает проектные решения объективными и позволяет заранее закладывать конструктивный резерв там, где доля электромобилей в среднесрочной перспективе превысит критическую, избавляя от последующей реконструкции уже построенной инфраструктуры. Движение немаршрутных средств, включая электромобили, по выделенной полосе должно быть запрещено.

Полученные результаты согласуются с данными для смешанного состава маршрутного транспорта и с результатами имитационного моделирования регулируемых перекрестков [3; 4], что обеспечивает целост-

⁶ СН 3.03.06-2022. Улицы населенных пунктов. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2022. – 48 с.

ность подхода в рамках более широкой задачи устойчивого пространственно-временного приоритета МПТС в неоднородных потоках.

Заключение. Методика Р.М. Зубачика развита в четырех направлениях. Введен коэффициент неоднородности $\eta(p)$, обоснованный теорией массового обслуживания и проверенный натурными данными ($r = -0,89$; $RMSE = 4,79\%$). Границы четырехступенчатой классификации формализованы как функции доли посторонних средств. Установлена совместная зависимость требуемого пассажиропотока от загрузки и неоднородности потока. Базовая граница пассажиропотока получила независимое экономическое обоснование, подтвердившее ее объективность.

Практически это позволяет объективно оценивать и прогнозировать целесообразность выделенных полос при смешанном составе движения и растущей доле электромобилей – задача, особенно важная для городов Беларуси и Китая, где процесс только начинается. Методику могут применять проектные институты и подразделения ГАИ при разработке технико-экономических обоснований, а также при пересмотре СН 3.03.06-2022 – для перехода от жесткого критерия минимальной частоты МПТС к расчету эффективной провозной способности полосы с учетом фактической и прогнозной неоднородности потока.

Дальнейшая работа – уточнение коэффициентов зависимостей (2) и (4) по расширенной серии натурных наблюдений на объектах с разной долей электромобилей и распространение результатов на координированное управление потоками на смежных регулируемых перекрестках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лю Ю., Семченков С.С., Капский Д.В. Обеспечение приоритетного движения маршрутного пассажирского транспорта за счет устройства выделенных полос // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 1(51). – С. 49–52.
2. Лю Ю. Социально-ориентированный подход к выбору приоритетных мер организации движения маршрутного пассажирского транспорта // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2026. – № 1(53). – С. 70–76.
3. Лю Ю., Скирковский С.В., Капский Д.В. Типизация проблем размещения выделенных полос для маршрутного пассажирского транспорта // Транспорт и транспортные системы: сб. науч. статей. – Минск: БНТУ, 2025. – С. 194–202.
4. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения: учеб. пособие. – Минск: БНТУ, 2018. – 356 с.
5. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
6. Устойчивая городская мобильность: теория и практика развития: учеб. / А.О. Лобашов, Е.Н. Кот, Д.В. Капский и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 236 с.
7. Планирование устойчивой городской мобильности: учеб.-метод. пособие / А.О. Лобашов, С.С. Семченков, Е.Н. Кот и др. – Минск: БНТУ, 2022. – 180 с.

Поступила 20.07.2026

IMPROVING THE METHOD FOR ASSESSING THE FEASIBILITY OF DEDICATED LANES FOR PASSENGER VEHICLES, CONSIDERING TRAFFIC FLOW HETEROGENEITY

LIU YUWEI

(Belarusian National Technical University, Minsk)

This paper proposes a further development of the methodology for justifying dedicated lanes for public transport vehicles (PPVs), taking into account the heterogeneity of traffic flow – the intrusion of non-route vehicles, primarily electric vehicles, into the priority lane. The heterogeneity coefficient $\eta(p)$ is introduced, the four-stage lane classification is refined, and the basic passenger flow limit is substantiated using an independent economic model. With a share of non-route vehicles $p = 5\text{--}12\%$, the minimum required passenger flow increases by 10–28% relative to the classical criterion; The dependence is confirmed by field data ($r = -0,89$; $RMSE = 4,79\%$).

Keywords: public transport vehicles, dedicated lanes, traffic flow heterogeneity, heterogeneity coefficient, carrying capacity, passenger traffic, electric vehicles, tiered classification; transport modeling.

УДК 656.13.05

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-95-99

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ПРИОРИТЕТА МАРШРУТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ
В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА**

ЛЮ ЮЙВЭЙ*(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Целью исследования является совершенствование метода обеспечения пространственно-временного приоритета маршрутных пассажирских транспортных средств (МПТС) на регулируемых перекрестках путем разработки геометрического условия работоспособности приоритетной полосы и научного обоснования границ устойчивости метода к неоднородности транспортного потока. Методами кинематического анализа, имитационного моделирования в среде VISSIM и логистической регрессии получены аналитическое условие безблокировочного проезда шлюзового накопителя и критическая доля посторонних транспортных средств, определяющая границу практической эффективности метода. Установлено, что устройство выделенной полосы снижает максимальную задержку МПТС на 44,5% при однородном потоке, однако критическая доля посторонних транспортных средств, разрушающая данный эффект, составляет лишь $p^ \approx 7,1-7,16\%$, что значительно ниже границ устойчивости по показателям провозной способности и геометрической емкости полосы.*

Ключевые слова: маршрутные пассажирские транспортные средства, пространственно-временной приоритет, шлюзовый накопитель, регулируемый перекресток, кинематическое условие, критическая доля, логистическая модель, имитационное моделирование, надежность расписания, электромобили.

Введение. Наибольшие эксплуатационные задержки маршрутных пассажирских транспортных средств (МПТС) возникают на регулируемых перекрестках, где, как правило, автобусы и троллейбусы сталкиваются с проблемой блокировки вследствие правоповоротного движения индивидуального транспорта [1; 2]. Метод пространственно-временного приоритета, основанный на создании обособленного участка проезда МПТС непосредственно перед перекрестком, впервые разработан и научно обоснован Р.М. Зубачиком: устройство выделенной полосы в сочетании с адаптивным светофорным регулированием обеспечивает снижение максимальных задержек МПТС практически в два раза при однородном составе приоритетного потока¹.

Вместе с тем геометрическая концепция подобных решений сохраняет работоспособность только при абсолютном запрете движения личного, в т.ч. электрического, транспорта по специальным полосам, однако количественная граница устойчивости метода к неоднородности потока, равно как и аналитическое (а не только имитационное) условие геометрической работоспособности приоритетной полосы, в известных источниках не установлены^{1,2,3} [3–7]. Недостаток теоретической базы не позволяет научно обосновать геометрические параметры выделенных полос. Эта проблема стала особенно острой в Беларуси и Китае из-за быстрого роста числа личных электромобилей, которым законодательно разрешено выезжать на полосы для общественного транспорта.

Исследование направлено на совершенствование приоритета маршрутного транспорта (МПТС) на регулируемых перекрестках. Для этого: разработано кинематическое условие для свободного проезда транспорта через шлюзовую накопитель; аналитически вычислена предельно допустимую долю посторонних машин на полосе; сопоставлены полученные границы устойчивости с общими показателями эффективности работы перекрестка.

Следует отметить, что само по себе моделирование не объясняет главную причину сбоев: как именно длина и ширина полосы связаны с отказами алгоритмов адаптивных светофоров (АСУДД).

Без конкретных математических формул нельзя перенести готовое решение на другие улицы с иной планировкой. Кроме того, невозможно заранее спрогнозировать, в какой момент выделенная полоса перестанет справляться с работой из-за роста числа электромобилей. Поэтому необходим точный аналитический расчет, который позволит проверять и дополнять результаты компьютерного моделирования.

Основная часть. Систематизация транспортно-планировочных решений для обособленной инфраструктуры в зоне влияния регулируемых пересечений опирается на классификационный базис Р.М. Зубачика¹.

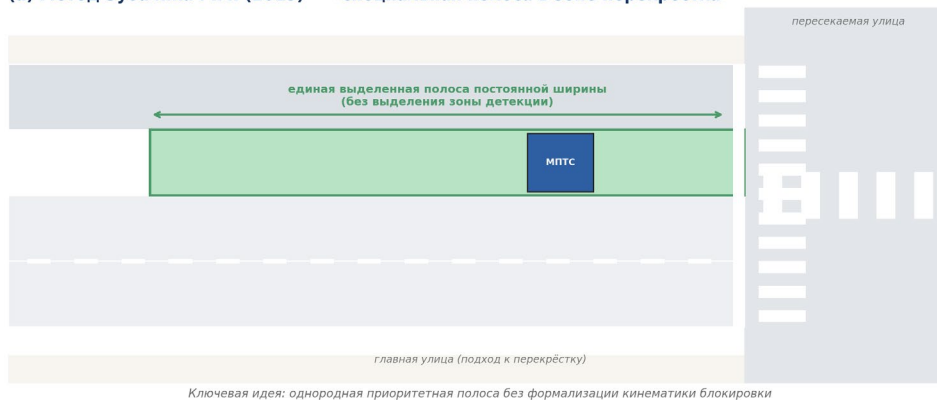
¹Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. транспорт. ун-т. – Київ, 2015. – 20 с.

² Highway Capacity Manual: HCM 2010 / Transportation Research Board. – Washington, DC: National Research Council, 2010. – 1650 p.

³ Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. – Köln, 2015. – 320 p.

В рамках данного подхода матрица приоритетных полос структурно дифференцируется на две макрогруппы (исходя из топологии размещения остановочных пунктов относительно стоп-линии) и шесть функциональных типов (сообразно разрешенным векторам движения транспортных потоков в узле) (рисунок 1, а).

(а) Метод Зубачика Р.М. (2015) — «специальная полоса в зоне перекрёстка»



(б) Метод Лю Юйвэй (наст. исследование) — «шлюзовый накопитель» с зоной детекции



а — однородная приоритетная полоса;

б — шлюзовый накопитель с выделенной зоной детекции

Рисунок 1. — Принципиальное отличие усовершенствованного метода «шлюзового накопителя» от метода Р.М. Зубачика⁴

Экстраполяция указанного классификатора на условия обслуживания смешанного (интегрирующего рельсовый и безрельсовый) состава маршрутных транспортных средств (МПТС) выявила важнейшую инженерную закономерность (таблица 1).

Таблица 1. — Применимость типов выделенной полосы для рельсового и безрельсового МПТС

Тип полосы	Автобус / троллейбус	Трамвай	Ограничение для рельсового транспорта
1.1	применим	ограниченно	требует совмещения с трамвайными путями
1.2	применим	применим	—
2.1	применим	применим	учет радиуса путевого закругления
2.2	применим	не применим	фиксированная колея не допускает поворота
2.3 / 2.4	применим	не применим	требуются отдельные трамвайные стрелки

Доказано, что реализация универсальных проектных мероприятий, способных гарантировать полноценный совмещенный пространственный приоритет в едином поперечном профиле как для трамвайного сообщения, так и для смешанного движения (трамвай, автобус, троллейбус и пр.), технически жизнеспособна исключительно для двух из шести теоретически возможных проектных конфигураций выделенных полос.

Основным развитием классического подхода⁴ является четкое геометрическое разграничение приоритетной полосы на две функциональные зоны: зону накопления очереди целевых МПТС и зону детектирования

⁴ Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. транспорт. ун-т. — Київ, 2015. — 20 с.

адаптивной системы управления протяженностью $L_{\text{дет}}$ (см. рисунок 1). Введено авторское кинематическое условие безблокировочного проезда шлюзового накопителя: чтобы адаптивная система приоритета срабатывала штатно, геометрическая длина шлюза должна превышать длину очереди посторонних транспортных средств, накопившуюся за время запрещающего сигнала:

$$L_{\text{шлюз}}(p) \geq L_{\text{дет}} + p \cdot Q_{\text{сум}} \cdot t_{\text{кр}} \cdot l_{\text{дин}} / 3600, \quad (1)$$

где $Q_{\text{сум}}$ – суммарная интенсивность потока на подходе, ед./ч; $t_{\text{кр}}$ – длительность запрещающего сигнала, с; $l_{\text{дин}}$ – динамический габарит одного постороннего транспортного средства в очереди, м.

Из условия (1) аналитически получена геометрическая граница устойчивости метода – критическая доля посторонних транспортных средств, при превышении которой физически разумная длина шлюза не способна сохранить резерв $L_{\text{дет}}$: $p^*_{\text{геом}} \approx 30\%$. Сопоставление с результатами имитационного моделирования показало, что данный геометрический механизм отказа не является лимитирующим: доминирующим оказывается вероятностно-детекторный механизм, при котором единичное постороннее транспортное средство, оказавшееся в узкой зоне детектирования в момент запрещающего сигнала, полностью блокирует алгоритм, даже если остальная часть шлюза свободна.

Практический смысл этого результата в том, что увеличивать длину шлюзового накопителя бесполезно. На первый взгляд, более длинная полоса поможет скомпенсировать помехи от посторонних машин, но на практике это почти не работает. Когда доля чужого транспорта приближается к критическому значению ($p \approx 7\%$), для сохранения геометрии полосы ее нужно удлинить совсем немного – с 60–65 м до 70–75 м. Однако к этому моменту главный плюс метода (сокращение времени в пути для общественного транспорта) уже полностью теряется.

Отсюда следует важный вывод: бороться с помехами нужно не строительными методами (расширением полос), а административными. Проблему решает только жесткий запрет на въезд постороннего транспорта на выделенные полосы.

Проверку геометрии полосы выполняли с помощью имитационного моделирования в среде VISSIM (с учетом методологии Highway Capacity Manual⁵ и модели очереди) на изолированном перекрестке. Эксперименты показали (таблица 2), что в идеальных условиях (когда на полосе нет нарушителей) выделенная полоса со шлюзовым накопителем снижает максимальную задержку маршрутного транспорта на 44,5%.

Таблица 2. – Сравнение параметров движения МПТС с выделенной полосой и без нее (по результатам 200 прогонов VISSIM)

Условие	Макс. длина очереди, авт.	Макс. время проезда МПТС, с	Макс. задержка МПТС, с
С выделенной полосой	33,07	105,63	48,82
Без выделенной полосы	62,26	67,55	87,98

Взамен физически некорректной линейной аппроксимации эффективности метода от доли посторонних транспортных средств предложена логистическая модель фазового перехода «приоритет → алгоритмический затор»:

$$D_{\text{свободн}}(p) = D_{\text{свободн}} \cdot (1 - P_{\text{отказа}}(p)) + D_{\text{затор}} \cdot P_{\text{отказа}}(p), \quad P_{\text{отказа}}(p) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(p-p_0)}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{свободн}} = 48,82$ с, $D_{\text{затор}} = 87,98$ с (см. таблицу 2) – физические асимптоты модели, корректно ограничивающие результат на всей области определения $p \in [0; 1]$ в отличие от линейной аппроксимации.

Калибровка по данным моделирования ($\alpha \approx 95,4$; $p_0 \approx 4,08\%$) дала критическую долю $p^* \approx 7,16\%$ (уровень отказа 95%), практически совпадающую с независимой оценкой по результатам имитационного моделирования VISSIM.

Сопоставление всех установленных критических порогов (рисунок 2) показало, что система теряет практический смысл по показателю задержки ($p^* \approx 7,1-7,16\%$) значительно раньше, чем формально нарушаются геометрическая емкость шлюза ($p^*_{\text{геом}} \approx 30\%$), стандарты регулярности расписания ($p \approx 11,5-27,7\%$, введенные на основе показателя надежности $\sigma_i(p) = \sigma_0 e^{(\delta p)}$, или номинальная провозная способность полосы ($p_{\text{кр}} \approx 55,6\%$). Следовательно, при проектировании систем контроля доступа на выделенные полосы ориентироваться следует именно на наиболее консервативный порог по показателю задержки, поскольку остальные критерии окажутся нарушенными существенно позже и не могут служить основанием для отсрочки защитных мероприятий.

На рисунке 3 показан вариант уширения для организации правоповоротного направления: новый шлюзовый накопитель на подходе к перекрестку (правоповоротный поток отделяется (возможно даже направляющим островком) до входа в зону детекции, не занимая исключительную часть полосы, отведенную для МПТС).

⁵ Highway Capacity Manual: HCM 2010 / Transportation Research Board. – Washington, DC: National Research Council, 2010. – 1650 p.

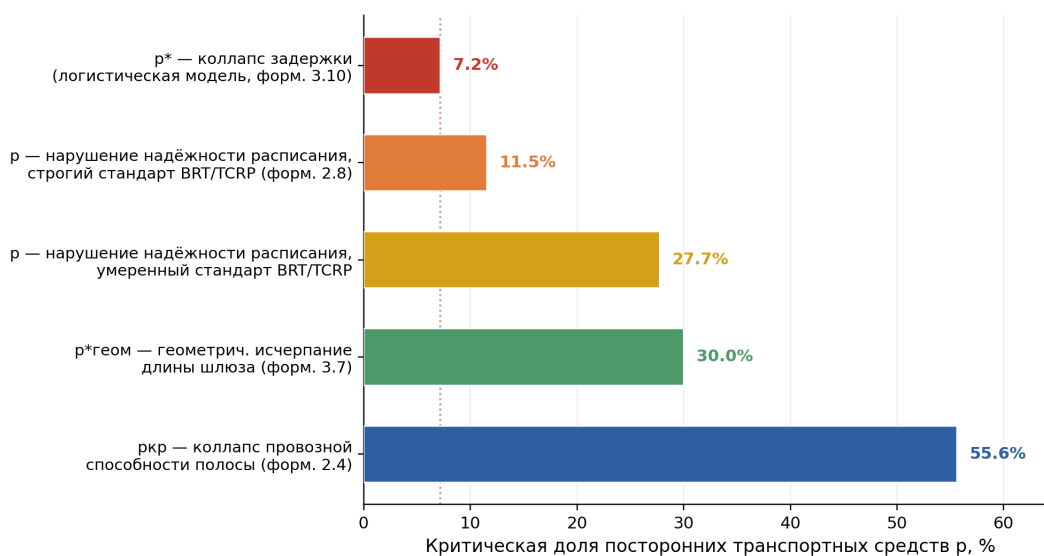


Рисунок 2. – Иерархия критических порогов устойчивости приоритета МПТС, установленных по различным критериям

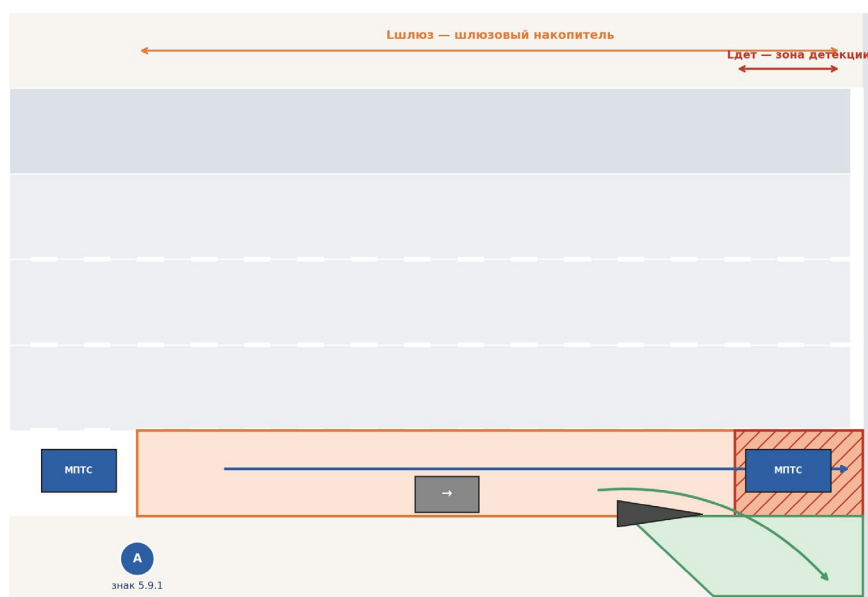


Рисунок 3. – Схема размещения шлюзового накопителя

Заключение. Развита метод пространственно-временного приоритета МПТС на регулируемых перекрестках, предложенный Р.М. Зубачиком⁶: классификация выделенных полос распространена на смешанный состав маршрутного транспорта; впервые выведено авторское кинематическое условие безблокировочного проезда шлюзового накопителя, позволившее аналитически установить геометрическую границу устойчивости метода ($p^*_{\text{геом}} \approx 30\%$); взамен линейной аппроксимации предложена логистическая модель фазового перехода, аналитически подтвердившая критическую долю посторонних транспортных средств $p^* \approx 7,1\text{--}16\%$, независимо согласующуюся с результатами имитационного моделирования в среде VISSIM.

Сопоставление всех установленных в исследовании критических порогов позволило сформулировать практический вывод о приоритетности показателя задержки как наиболее консервативного индикатора устойчивости метода при проектировании мероприятий по ограничению доступа посторонних транспортных средств на выде-

⁶ Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. транспорт. ун-т. – Київ, 2015. – 20 с.

ленные полосы. Практическая значимость результатов состоит в возможности объективного проектирования геометрических параметров и алгоритмов управления шлюзовых накопителей в условиях реального, неоднородного транспортного потока, что особенно актуально для городов с растущей долей электротранспорта.

Полученные результаты дополняют выводы⁷ в части, ранее не рассматривавшейся: если метод «специальная полоса в зоне перекрестка» был научно обоснован и верифицирован применительно к однородному потоку безрельсового МПТС, то предложенное в настоящей статье развитие метода дает количественный, аналитически обоснованный ответ на вопрос об устойчивости пространственно-временного приоритета к реальной неоднородности транспортного потока, а также распространяет область применимости метода на смешанный (рельсовый и безрельсовый) состав маршрутного транспорта, что существенно расширяет практическую значимость результатов для проектирования объединенных узлов пересадки в городах со смешанной маршрутной сетью.

Направлением дальнейших исследований является распространение предложенного кинематического условия на координированные регулируемые перекрестки и уточнение параметров логистической модели расширенной серией имитационных экспериментов на объектах с различными геометрическими и режимными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лю Ю. Совершенствование метода обеспечения пространственно-временного приоритета маршрутных пассажирских транспортных средств на регулируемых перекрестках // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2026. – № 1. – С. 77–82. DOI: 10.52928/2070-1616-2026-53-1-77-82
2. Лю Ю. Исследование условий движения маршрутного пассажирского транспорта в городе Хух-Хото, КНР // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 2. – С. 50–56. DOI: 10.52928/2070-1616-2024-50-2-50-56
3. Лю Ю., Саражинский Д.С., Капский Д.В. Разработка и применение алгоритмов гибкого регулирования для повышения качества движения МТС на регулируемых перекрестках // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 2. – С. 42–52. DOI: 10.52928/2070-1616-2025-52-2-42-52
4. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / пер. с англ. И.И. Грушко. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
5. Verhulst, P.-F. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement // Correspondance mathématique et physique. – 1838. – Vol. 10. – P. 113–121.
6. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения: учеб. пособие. – Минск: БНТУ, 2018. – 356 с.
7. Устойчивая городская мобильность: теория и практика развития: учеб. / А.О. Лобашов, Е.Н. Кот, Д.В. Капский и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 236 с.
8. Планирование устойчивой городской мобильности: учеб.-метод. пособие / А.О. Лобашов, С.С. Семченков, Е.Н. Кот и др. – Минск: БНТУ, 2022. – 180 с.

Поступила 20.07.2026

IMPROVING A METHOD FOR ENSURING SPATIAL-TEMPORAL PRIORITY FOR ROUTE PASSENGER VEHICLES AT CONTROLLED INTERSECTIONS IN HETEROGENEOUS TRAFFIC FLOW

LIU YUWEI

(Belarusian National Technical University, Minsk)

The aim of this study is to improve the method for ensuring spatial-temporal priority for route passenger vehicles (RPVs) at signalized intersections by developing a geometric condition for the operability of the priority lane and scientifically substantiating the method's robustness to traffic flow heterogeneity. Using kinematic analysis, simulation modeling in the VISSIM environment, and logistic regression, we obtained an analytical condition for unblocked passage through a lock storage area and a critical proportion of unrelated vehicles, which determines the practical effectiveness of the method. It was found that the use of a dedicated lane reduces the maximum delay of public transit vehicles by 44,5% under uniform conditions. However, the critical proportion of unrelated vehicles that disrupts this effect is only $p^ \approx 7,1-7,16\%$, which is significantly below the stability limits for the lane's carrying capacity and geometric capacity.*

Keywords: public transit vehicles, spatial-temporal priority, lock storage, signalized intersection, kinematic condition, critical proportion, logistic model, simulation modeling, schedule reliability, electric vehicles.

⁷ Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. транспорт. ун-т. – Київ, 2015. – 20 с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ПРИОРИТЕТА МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА МЕТОДАМИ АДАПТИВНОГО СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И БЕСПРОВОДНОЙ ДЕТЕКЦИИ

ЛЮ ЮЙВЭЙ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Предложен комплексный научно-практический метод повышения эффективности функционирования маршрутного пассажирского транспорта на регулируемых перекрестках на основе синергии пространственного обособления и адаптивного светофорного регулирования. Сформулирована целевая функция минимизации суммарных социальных потерь времени, а также аналитическая модель оценки влияния надежности беспроводного канала передачи данных V2X (LTE) на экономическую эффективность приоритетного пропуска. На основе имитационного моделирования в среде SUMO доказана высокая работоспособность разработанных алгоритмов и определены пределы их устойчивости к флуктуациям неоднородности потока.

Ключевые слова: адаптивное светофорное регулирование, приоритет МПТС, шлюзовой накопитель, надежность связи, V2X, имитационное моделирование, транспортная задержка, социальные потери времени.

Введение. Обеспечение приоритетных условий движения маршрутных пассажирских транспортных средств (МПТС) на регулируемых перекрестках является ключевым вектором развития интеллектуальных транспортных систем (ИТС) современных мегаполисов [1–4]. Классические градостроительные методы, такие как простое уширение проезжей части или создание выделенных полос без разделения на функциональные зоны, теряют свою эффективность в условиях высокой плотности застройки и стохастического проникновения на приоритетную инфраструктуру сторонних видов транспорта (включая личные электромобили), поэтому и необходимы иные методы [6–9].

Аналитически доказано, что при доле стороннего транспорта на полосе МПТС свыше 7,14% геометрическая емкость шлюзовых накопителей полностью исчерпывается, приводя к блокировке физических детекторов. В связи с этим возникает необходимость разработки гибких систем управления, сочетающих пространственную конфигурацию уличного пространства с временным (светофорным) адаптивным регулированием (АСФР), способным гибко реагировать на динамику гетерогенного транспортного потока [5].

Целью настоящей статьи является разработка, верификация и технико-экономическое обоснование алгоритмов АСФР, обеспечивающих проактивный бесконфликтный пропуск смешанного (рельсового и безрельсового) МПТС через регулируемые перекрестки с учетом надежности каналов связи.

Основная часть. Математическая формализация критерия оптимизации АСФР. Эффективность любого алгоритма ИТС детерминирована выбором целевой функции. Традиционные подходы, ориентированные на минимизацию задержек исключительно транспортных единиц, демонстрируют несостоятельность в концепции устойчивой городской мобильности, поскольку игнорируют пассажиронапряженность различных направлений¹. Предложена и математически формализована целевая функция минимизации суммарных социальных потерь времени $J_{\min}$, выраженных в пассажиро-часах за один час функционирования транспортного узла:

$$J_{\min} = \sum_{j=1}^K (W_{\text{мптс}} \cdot Q_{\text{мптс},j} \cdot D_{\text{мптс},j}) + \sum_{n=1}^M (W_{\text{лгк}} \cdot q_{\text{лгк},n} \cdot d_{\text{лгк},n}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $W_{\text{мптс}}, W_{\text{лгк}}$ – весовые коэффициенты среднего пассажирского наполнения для приоритетных (МПТС) и неприоритетных (легковых) транспортных средств соответственно, пасс./ед. (принято в расчетах: $W_{\text{мптс}} = 85$ пасс./ед. для автобуса/троллейбуса, $W_{\text{лгк}} = 1,4$ пасс./ед. для легкового автомобиля); $Q_{\text{мптс},j}$ – интенсивность движения МПТС по приоритетному направлению j , ед./ч; $q_{\text{лгк},n}$ – интенсивность движения легковых автомобилей по направлению n , ед./ч; $D_{\text{мптс},j}, d_{\text{лгк},n}$ – средняя задержка одной транспортной единицы на перекрестке по соответствующим направлениям, ч (при использовании выходных параметров имитационного моделирования в секундах, значения делятся на 3600).

Физический смысл уравнения (1) заключается в поиске компромисса между предоставлением безусловного приоритета высоконаполненному общественному транспорту и недопущением транспортного коллапса на смежных транзитных направлениях перекрестка.

Разработка универсального алгоритма АСФР и модели надежности детекции V2X. Для реализации критерия (1) на регулируемых перекрестках со смешанным составом МПТС (например, пересечение ул. Плеханова – ул. Тухачевского в г. Минске) разработан алгоритм гибкого регулирования по принципу «actuated control» с возможностью вызова специальной фазы и передачи неиспользованного времени.

¹ National Association of City Transportation Officials (NACTO). Transit Street Design Guide. – Washington, DC: Island Press, 2016. – 328 p.

Запрос на обслуживание МПТС формируется логическим датчиком *AdvRoWRsrv* (Advance Right of Way Reservation), интегрирующим данные от двух физических детекторов: въезда (check-in), установленного на удалении $L_{\text{дет}} = 180$ м от стоп-линии, и выезда (check-out), расположенного у стоп-линии.

В реальных условиях эксплуатации эффективность алгоритма критически зависит от своевременности передачи радиосигнала по технологии V2X (LTE) от бортового модуля МПТС к дорожному контроллеру. Вследствие радиочастотной интерференции в плотной городской застройке пакеты данных могут теряться. Автором предложена аналитическая модель оценки надежности связи.

Временной резерв $\Delta t_{\text{рез}}$, доступный для передачи и гарантированной обработки запроса контроллером до момента фактического торможения МПТС перед стоп-линией, определяется как

$$\Delta t_{\text{рез}} = \frac{L_{\text{дет}}}{v_{\text{мптс}}} - t_{\text{обр}} \quad (2)$$

где $L_{\text{дет}}$ – расстояние от точки радиозапроса до стоп-линии, м; $v_{\text{мптс}}$ – скорость МПТС на подходе, м/с; $t_{\text{обр}}$ – время, необходимое контроллеру на безопасное завершение текущей фазы (минимальные зеленые, промтакты), с (принято $t_{\text{обр}} = 1,5$ с). При $L_{\text{дет}} = 35$ м и $v_{\text{мптс}} = 50$ км/ч (13,9 м/с) полученный резерв составляет $\Delta t_{\text{рез}} \approx 1,02$ с.

Принимая задержку передачи пакетов, распределенной по экспоненциальному закону со средним значением μ (с), вероятность алгоритмического отказа приоритета $P_{\text{отказ}}(\mu)$ выражается зависимостью

$$P_{\text{отказ}}(\mu) = e^{-\frac{\Delta t_{\text{рез}}}{\mu}}. \quad (3)$$

Следовательно, фактический годовой экономический эффект внедрения ИТС ($\mathcal{E}_{\text{факт}}$) линейно убывает при снижении надежности беспроводного канала:

$$\mathcal{E}_{\text{факт}}(\mu) = \mathcal{E}_{\text{нах}} \cdot (1 - P_{\text{отказ}}(\mu)), \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_{\text{нах}}$ – теоретический максимальный экономический эффект при стабильном сигнале.

Имитационное моделирование и анализ результатов. Для оценки эффективности разработанных алгоритмических и пространственно-временных решений проведена серия экспериментов в программном комплексе имитационного микромоделирования SUMO (Simulation of Urban MObility), имеющимся на кафедре «Транспортных систем и технологий» БНТУ. Моделирование выполнялось на примере регулируемого перекрестка со смешанным составом МПТС (ул. Плеханова – ул. Тухачевского в г. Минске). Чтобы минимизировать влияние стохастических факторов симуляции и гарантировать статистическую значимость результатов, для каждого сценария было реализовано не менее 21 прогона со случайными параметрами распределения потоков (при доверительном интервале 95%). Результаты расчета суммарных транспортных задержек на узле за 1,5-часовой расчетный период моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Суммарные транспортные задержки на узле до и после внедрения АСФР

Категория ТС	Существующие условия, авт.·ч	Предлагаемый Вариант 1 (фикс. активация), авт.·ч	Предлагаемый Вариант 2 (сокращение времени), авт.·ч	Снижение задержки (Вариант 1), %
МПТС (автобусы)	0,63	0,47	0,49	25,4%
Транзитный поток	26,79	25,69	25,42	4,1%
Поворотный поток	12,99	11,75	11,80	9,5%

Анализ результатов моделирования показывает, что практическая реализация первого варианта АСФР (фиксация запроса приоритета без сокращения фазы) обеспечивает снижение суммарных задержек для МПТС на 25,4%. При использовании второго варианта регулирования (с гибким сокращением неиспользованного зеленого времени) задержки общественного транспорта сокращаются на 21,3%.

Незначительное изменение задержек транзитных легковых автомобилей (снижение составило всего 4,1%) указывает на высокую сбалансированность предложенных алгоритмов светофорного регулирования и отсутствие дестабилизирующего влияния на смежные направления движения. Сравнительные бокс-диаграммы распределения задержек транспортных средств по сценариям представлены на рисунке 1.

Для оценки влияния надежности канала V2X на экономические критерии окупаемости построена зависимость (рисунок 2), полученная в ходе интеграции уравнений (3), (4) и сметной стоимости оборудования.

При задержках пакетов в диапазоне $\mu = 1..2$ с, характерных для зон высокой интерференции, годовой экономический эффект снижается в 1,6–2,5 раза (с 20697 до 8269 у.е./год), а расчетный срок окупаемости капитальных вложений ($K_{\text{кап}} = 4641$ у.е.) возрастает с 82 до 205 дней (таблица 2, рисунок 3).

Полученные данные доказывают необходимость технического резервирования беспроводного канала V2X дублирующими физическими индуктивными петлями на подходах к перекресткам при проектировании ИТС.

Практическое применение критерия оптимизации (1) при расчетных значениях коэффициентов пассажиро-наполняемости $W_{\text{мптс}} = 85$ пасс./ед. (для автобусов и троллейбусов) и $W_{\text{лгк}} = 1,4$ пасс./ед. (для легковых автомобилей) показывает, что традиционные подходы (ориентированные исключительно на снижение локальной задержки МПТС на 25,4%) не отражают реальный социальный эффект. Внедрение предложенных решений снижает

суммарные социальные потери времени $J_{\min}$ на 15,4% (со 109,2 до 92,4 пасс.-ч). Относительно меньшая величина снижения критерия $J_{\min}$ (15,4% против 25,4% задержки ТС) объясняется тем, что в исходных условиях общественный транспорт формирует около половины (49%) совокупных пассажиро-часов потерь, составляя при этом менее 2% от общего объема транспортного потока на узле (рисунок 3).

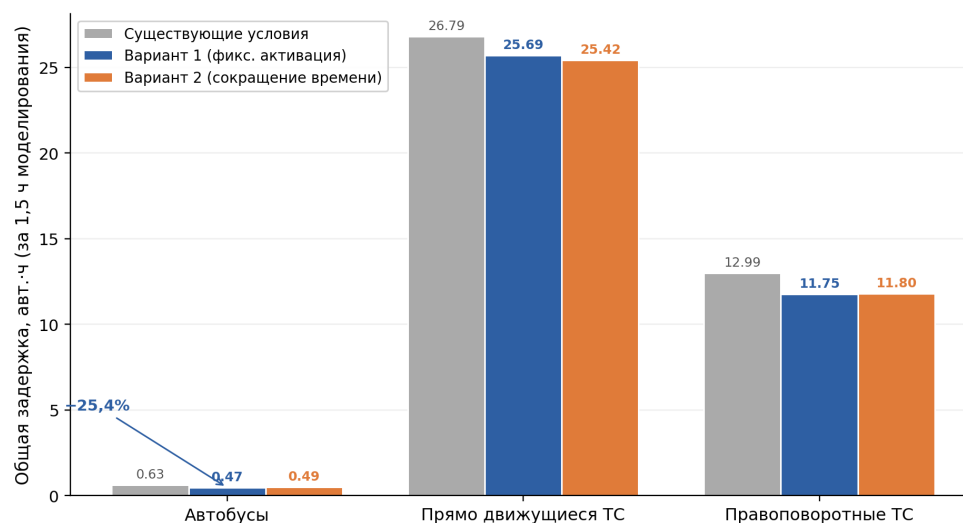


Рисунок 1. – Сравнение задержек транспортных средств по категориям до и после внедрения алгоритмов приоритета

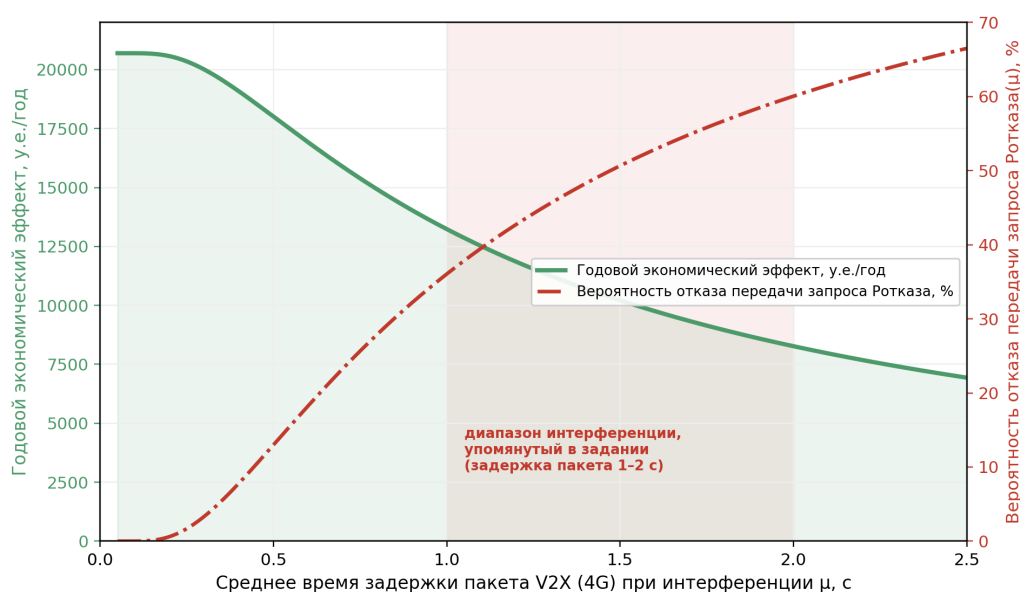


Рисунок 2. – Влияние задержки пакетов V2X на окупаемость и вероятность отказа приоритета

Таблица 2. – Срок окупаемости ИТС в зависимости от параметров задержки связи

Параметр связи μ , с	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Вероятность отказа $P_{\text{отказ}}$, %	0,0	13,0	36,1	50,7	60,0	66,5
Эффект, у.е./год	20 697	18 007	13 234	10 212	8 269	6 934
Срок окупаемости, дн.	82	94	128	166	205	244

Это подтверждает, что даже существенное сокращение задержек для малочисленной, но высоконаполненной категории МПТС оказывает лимитированное, хотя и весьма значимое влияние на общий социальный эффект. Полученный результат подчеркивает необходимость комплексного и одновременного учета условий движения индивидуального транспорта при проектировании приоритетных мероприятий ОДД. Поскольку величина средней наполняемости $W_{\text{МПТС}}$ принята в качестве модельного допущения, был проведен анализ чувствительности разработанной модели к изменению этого параметра в реалистичном диапазоне от 30 до 160 пасс./ед. (рисунок 4).

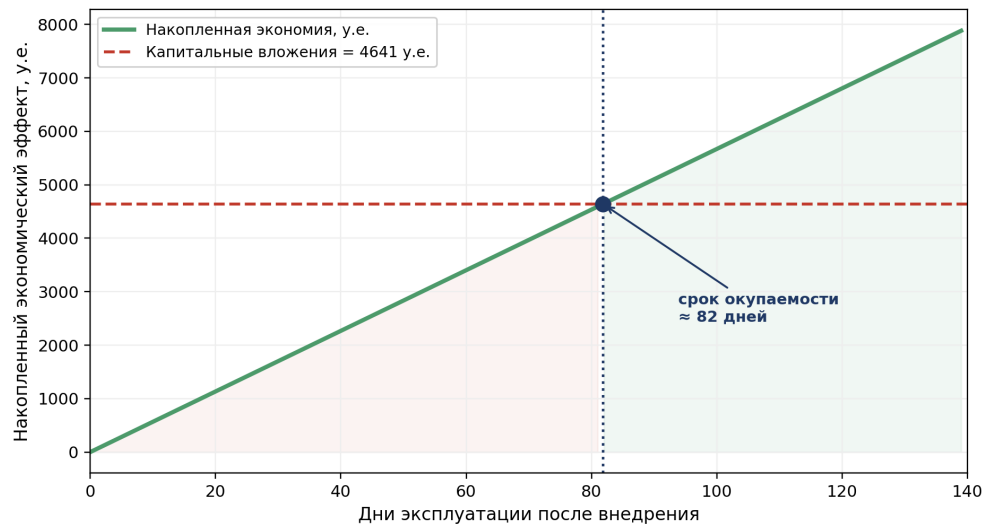
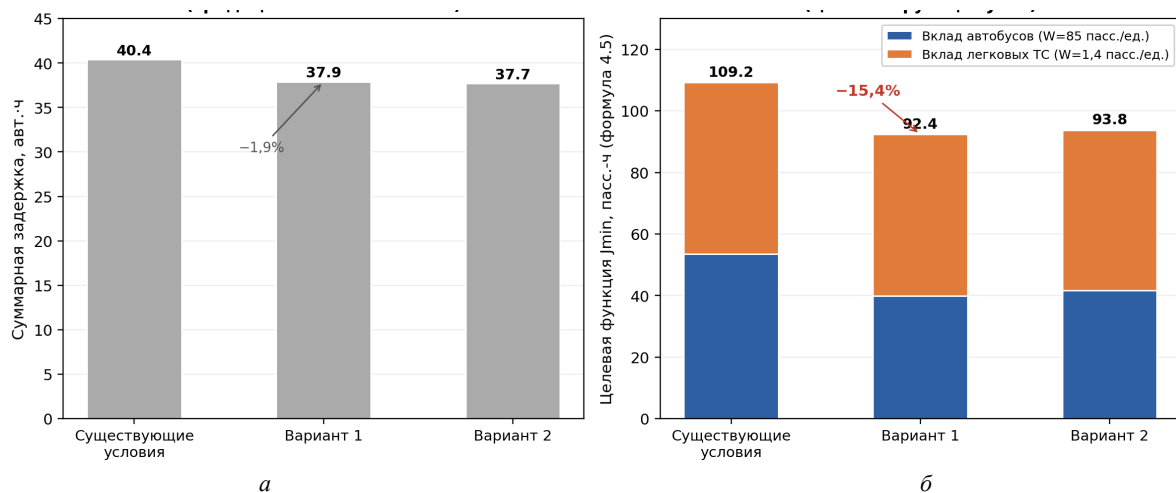
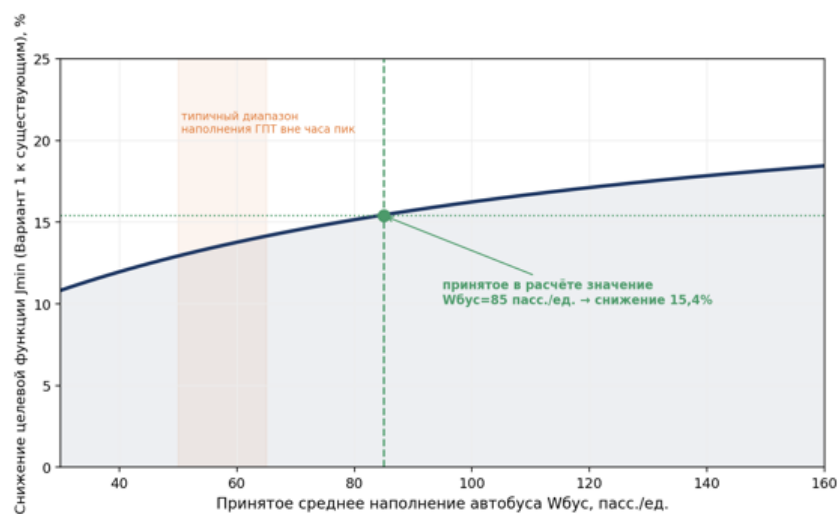


Рисунок 3. – Динамика окупаемости капитальных вложений в проектное решение



а – без учета наполнения (стандартный показатель); б – с учетом наполнения (целевая функция J_{min})

Рисунок 4. – Целевая функция минимизации социальных потерь времени J_{min} : сравнение с традиционным показателем задержки транспортных средствРисунок 5. – Устойчивость вывода о социальной эффективности к допущению о среднем пассажирском наполнении автобуса $W_{бус}$

Установлено, что эффект снижения целевой функции $J_{\min}$ монотонно возрастает с 12,9% до 18,2% при увеличении наполнения, оставаясь стабильно положительным на всем исследованном интервале. Это свидетельствует об устойчивости качественных выводов о высокой социальной эффективности предлагаемых решений независимо от вариации исходных допущений о наполнении подвижного состава (см. рисунок 5).

Заключение.

1. Разработаны универсальные алгоритмы адаптивного светофорного регулирования (АСФР), базирующиеся на целевой функции минимизации интегральных социальных потерь времени (пассажиро-часов). Алгоритмы обеспечивают бесконфликтный проезд смешанного состава МПТС за счет динамического перераспределения длительности фаз.

2. Имитационное моделирование в среде SUMO верифицировало высокую эффективность разработанного метода: задержки общественного транспорта снижаются на 21,3–25,4%, а общие экономические потери узла сокращаются на 6% при сроке окупаемости первоначальных капитальных вложений в среднем 82–94 дня.

3. Впервые аналитически формализована и доказана зависимость экономической окупаемости ИТС от надежности беспроводного канала связи V2X (LTE). Установлено, что рост средней задержки пакета до 1,5 с увеличивает срок окупаемости проекта в два раза (до 166 дней), что математически обосновывает необходимость обязательной укладки резервных индуктивных детекторов в полотно проезжей части.

4. Доказано, что бесперебойное функционирование алгоритмов АСФР возможно только при строгом обеспечении однородности приоритетного потока. Формирование очередей из личных электромобилей перед стоп-линиями в объеме более $p^* \approx 7,1\%$ полностью нивелирует работу ИТС, что требует внесения жестких изменений в нормативно-правовую базу (ПДД Республики Беларусь) в части запрета на допуск электромобилей на полосы МПТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В. Методология повышения качества дорожного движения. – Минск: БНТУ, 2018. – 372 с.
2. Vuchic V. R. Urban transit systems and Technology. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. – 150 p.
3. Капский Д.В. Транспорт в планировке городов: учеб. пособие / Белорусский национальный технический университет. – Минск: БНТУ, 2023. – 571 с.
4. Устойчивые транспортные системы городов: учеб. / Д.В. Капский, А.О. Лобашов, И.Н. Пугачев и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 128 с.
5. Garrow M., Machemehl R. Development and evaluation of transit signal priority strategies. – Austin: University of Texas, 1997. – 147 p.
6. Оценка качества алгоритмов адаптивного управления светофорными объектами методом имитационного моделирования / Ю. Лю, Д.В. Капский, С.А. Ляпин и др. // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-2(89). – С. 80–88. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-80-88
7. Лю Ю., Семченков С.С., Капский Д.В. Обеспечение приоритетного движения маршрутного пассажирского транспорта за счет устройства выделенных полос // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 1(51). – С. 49–52. DOI: 10.52928/2070-1616-2025-51-1-49-52
8. Лю Ю., Саражинский Д.С., Капский Д.В. Разработка и применение алгоритмов гибкого регулирования для повышения качества движения МТС на регулируемых перекрестках // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 2(52). – С. 42–52. DOI: 10.52928/2070-1616-2025-52-2-42-52
9. Капский Д.В. Разработка приложения для оценки экологического воздействия на транспортную систему мероприятий по ОДД // Проектирование, строительство и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры в сложных климатических и инженерно-геологических условиях: материалы междунар. науч.-практ. конф. / Москва (24–26 окт. 2024 г.). – М.: Дашков и К, 2024. – С. 102–104.

Поступила 20.07.2026

IMPROVING THE EFFICIENCY OF SPATIAL-TEMPORAL PRIORITY OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT USING ADAPTIVE TRAFFIC LIGHT CONTROL AND WIRELESS DETECTION

LIU YUWEI

(Belarusian National Technical University, Minsk)

This article proposes a comprehensive scientific and practical method for improving the efficiency of route passenger transport at signalized intersections based on the synergy of spatial separation and adaptive traffic light control. An objective function for minimizing total social time losses is formulated, along with an analytical model for assessing the impact of the reliability of the V2X (LTE) wireless data transmission channel on the economic efficiency of priority passage. Simulation modeling in the SUMO environment demonstrates the high performance of the developed algorithms, and the limits of their resilience to flow fluctuations are determined.

Keywords: adaptive traffic light control, priority of MPTS, gateway storage, communication reliability, V2X, simulation modeling, transport delay, social time losses.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 676.017:535.6:519.2

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-105-111

АНАЛИЗ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКУЛАТУРЫ МАРОК МС-1А – МС-4А
МЕТОДАМИ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

д-р хим. наук, проф. М.А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ, канд. техн. наук, доц. И.В. НИКОЛАЙЧИК
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

д-р техн. наук, проф. Н.П. МИДУКОВ
(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

Приведены результаты исследования макулатур класса А методами цветометрии. Рассмотрена система цветовых характеристик макулатуры, базирующихся на различных цветовых моделях: RGB, CMYK, HSB, Lab, в признаки было также включен показатель среднеквадратичного отклонения по серому. Цель работы – сокращение числа признаков для последующей идентификации объектов. В качестве метода обработки данных были использованы методы кластерного и факторного анализа. Показано, что агрегация признаков лишь частично совпадает с цветовой моделью, а величина среднеквадратичного отклонения по серому в большинстве случаев не агрегируется с остальными признаками.

Ключевые слова: макулатура класса А, цветовые характеристики, цветовые модели, кластерный и факторный анализ, отбор признаков.

Введение. В современной полиграфической промышленности качество макулатуры марок МС-1А – МС-4А играет ключевую роль в обеспечении стабильности цветопередачи и эффективности производственных процессов. Макулатура этих марок, широко используемая в офсетной печати, характеризуется значительной вариабельностью цветовых параметров, обусловленной различиями в химическом составе, условиях хранения и методами переработки. Традиционные методы оценки цветовых характеристик, такие как визуальный анализ или однопараметрические измерения, часто не учитывают многомерную природу данных, что приводит к недостаточной точности прогнозирования и оптимизации.

Поставленная проблема связана с тем, что современные методы классификации макулатуры по ГОСТ 10700-97 «Макулатура бумажная и картонная. Технические условия» базируются на органолептическом анализе и поэтому являются неточными, субъективными и требуют значительных материальных затрат. В то же время основная тенденция методов классификации различных видов природного и искусственного сырья базируется на машинных методах цифрового зрения, что позволяет повысить точность и экспрессивность анализа.

Как известно, бумажная макулатура подразделяется на три класса А, Б, В. Настоящая работа посвящена анализу цветовых характеристик макулатуры первого класса: марок МС-1А – МС-4А с применением методов многомерного статистического анализа, включая методы факторного анализа, главных компонент, кластерного анализа.

Цель исследования – выявить ключевые факторы вариабельности цветовых параметров, установить классификацию образцов и разработать модели для контроля качества. Полученные результаты позволят повысить надежность отбора макулатуры и минимизировать брак в производстве.

Обзор литературы по данному направлению показал, что число работ, посвященных данной проблеме, крайне невелико, и в основном они сосредоточены на проблемах цветового анализа загрязнений общих отходов, в т.ч. и макулатуры^{1,2} [1–12].

В задачах многомерной классификации, где каждый объект описывается большим количеством признаков (дескрипторов), ключевой проблемой является «проклятие размерности». Избыточное количество переменных не только увеличивает вычислительные затраты, но и может ухудшить качество классификации из-за наличия шума, мультиколлинеарности и нерелевантных признаков. В этой связи этап отбора и преобразования дескрипторов становится достаточно важной задачей. В научной практике для решения этой задачи широко применяются три взаимодополняющих метода: кластерный анализ [13], метод главных компонент (РСА) [13] и факторный анализ (ФА) [13]. Их комбинированное использование позволяет перейти от исходного пространства признаков к более компактному, информативному и интерпретируемому подпространству, оптимальному для последующего построения классификационных моделей.

¹ US Patent No. 6, 250, 472, (2001). Paper Sorting System / M. Grubbs, G. R. Kenny and P. G. Gaddis.

² US Patent No. 7, 081, 594, (2006). Optical Paper Sorting Method Device and Apparatus / Z. Khalfan and S. Greenspan.

Среди методов кластерного анализа наиболее широкое применение получили задачи с использованием меры сходства на основании расстояния Евклида, расстояния Хэмминга, а также различных характеристик, взятых из корреляционного анализа. Группа алгоритмов основана на ряде методов типа методов ближнего и дальнего соседа, простого среднего, метода Варда и др.

Результатом этого метода является дендрограмма – древовидная структура, наглядно отображающая иерархию сходства дескрипторов. Анализируя дендрограмму, исследователь устанавливает пороговое значение сходства (или просто «разрезает» дерево на определенной высоте). Все дескрипторы, попавшие в один кластер выше этого порога, считаются сильно коррелированными и несут сходную информацию. Из каждого такого кластера для дальнейшего анализа выбирается один наиболее репрезентативный признак (например, имеющий наибольшую среднюю корреляцию с другими признаками кластера или наибольшую дискриминационную способность относительно целевых классов). Таким образом, процедура позволяет значительно сократить размерность и устранить избыточность.

РСА применяется после или вместо кластеризации признаков для кардинального сокращения размерности с минимальными потерями информации.

Этот метод выполняет ортогональное линейное преобразование исходных, возможно, коррелированных переменных в новый набор некоррелированных переменных – главных компонент (ГК). Компоненты упорядочены по убыванию дисперсии, которую они объясняют. Первая ГК соответствует направлению максимальной изменчивости данных, вторая – максимальной изменчивости в ортогональном подпространстве к первой и т.д.

РСА не производит отбор исходных дескрипторов в прямом смысле, а создает новые, синтетические признаки. Для классификации отбирается не все множество ГК, а только первые k компонент, кумулятивная дисперсия которых превышает заданный порог (например, 80–95%). Эти k ГК заменяют собой сотни исходных переменных. Преимущество подхода – гарантированная ортогональность новых признаков и максимальное сохранение дисперсии. Однако интерпретируемость ГК может быть затруднена, т.к. они являются линейными комбинациями всех исходных дескрипторов с различными весами. Тем не менее, по нагрузкам РСА можно сгруппировать признаки.

В отличие от РСА, который фокусируется на объяснении дисперсии, ФА нацелен на объяснение ковариаций (корреляций) между наблюдаемыми переменными. Метод предполагает, что наблюдаемые корреляции между p дескрипторами обусловлены их зависимостью от меньшего числа m скрытых (латентных) переменных – общих факторов. Модель факторного анализа описывает каждый исходный признак как линейную комбинацию этих общих факторов плюс уникальный фактор (шум, специфичную для данного признака вариацию).

Результатом ФА являются «факторные нагрузки» – коэффициенты корреляции между исходными дескрипторами и выделенными латентными факторами. Анализ матрицы нагрузок позволяет: структурировать и интерпретировать признаки. Дескрипторы, имеющие высокие нагрузки на один фактор, образуют содержательно осмысленную группу, произвести обоснованный отбор. В рамках каждого выделенного фактора можно отобрать несколько дескрипторов с наибольшими факторными нагрузками, которые наилучшим образом представляют данный латентный конструкт, использовать факторные значения. Как и в РСА, для каждого объекта можно вычислить его проекцию на выделенные факторы (факторные значения). Эти значения, являясь некоррелированными оценками латентных переменных, затем используются как входные данные для классификаторов.

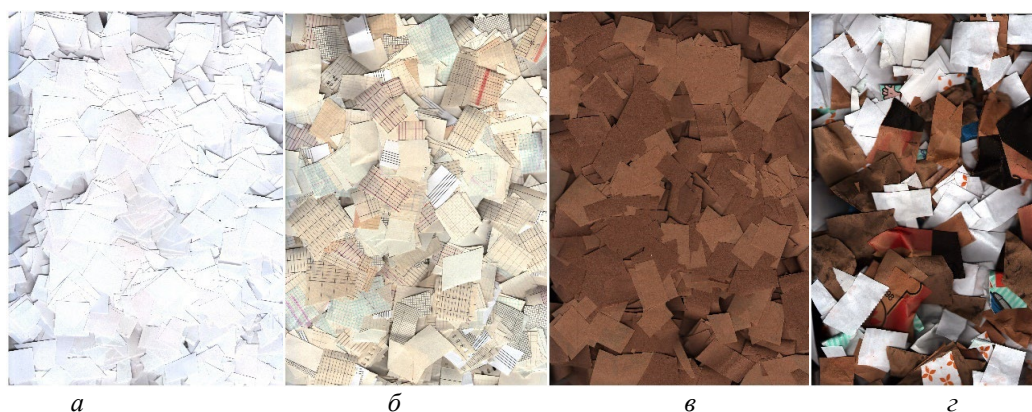
Таким образом, процесс отбора дескрипторов для многомерной классификации, основанный на комбинации кластерного анализа, метода главных компонент и факторного анализа, представляет собой мощный методический аппарат.

Экспериментальные методы исследования. Характеристики макулатуры марок МС-1А – МС-4А регулируются ГОСТ 10700-97 «Макулатура бумажная и картонная. Технические условия». Ниже приведены основные описания этих марок согласно стандарту.

МС-1А: Отходы производства белой бумаги (кроме газетной) – чистая белая бумага без печати, линовки или покрытий. МС-2А: Отходы производства белой бумаги (кроме газетной) в виде обрезков с линовкой и черно-белой или цветной полосой. МС-3А: Картон из белой целлюлозы без печати (немелованный). МС-4А: Отходы производства бумаги из сульфатной небеленой целлюлозы (упаковочная, электроизоляционная, мешочная и т.п.), допускаются бумажные мешки из-под каолина, цемента и аналогичных материалов по согласованию.

Макулатуру отбирали согласно ГОСТ 10700-97 и разрезали на куски размером примерно 1,5–2,5 см. Полученную массу выкладывали на стекло сканера Canon MF 4010 Series таким образом, чтобы верхний слой был как можно более равномерно. Поверх слоя макулатуры помещали лист черной бумаги и сканировали с разрешением 600 dpi, в цветном формате. Файл сохранялся в формате RGB и характеризовался размером 4961x7016 пикселей. Полученные изображения характеризовались значением параметров цифровой модели в каналах RGB, вычислялись их средние значения, среднеквадратичные отклонения, а также среднеквадратичное отклонение в градациях серого. Значения параметров RGB преобразовывались в модели CMYK, HSB, Lab с вычислением значений этих параметров. Кроме того, в матрицу данных было включено среднеквадратичное отклонение по серому. Для обработки данных в качестве меры близости использовались расстояния Евклида, расстояния Хэмминга.

На рисунке 1 представлены изображения макулатуры МС-1А – МС-4.



а – макулатура марки МС-1А; **б** – макулатура марки МС-2А; **в** – макулатура марки МС-3А; **г** – макулатура марки МС-4А

Рисунок 1. – Отсканированные изображения моделей макулатуры марок МС-1А - МС-4

Для первичного анализа было отобрано 8 образцов макулатуры для каждого из классов, фрагменты характеристик которых приведены в таблицах 1 и 2. В таблице 3 и на рисунках 2–4 представлены результаты кластеризации изученных объектов, полученных различными методами для числа кластеров, равных 5. Выбор числа кластеров обусловлен использованием четырех цветовых систем и включением в материалы для обработки среднеквадратичного отклонения в градациях по серому.

Таблица 1. – Цветовые характеристики макулатуры МС-1А для координат цвета RGB и CMYK

R	G	B	C	M	Y	K
1	2	3	4	5	6	7
109,08	71,788	55,444	57,2	70,9	78,3	57,3
111,721	73,254	56,366	56,2	69,4	77,9	56,2
114,036	74,83	57,504	55,3	67,8	77,5	55,3
115,681	76,188	58,545	54,5	66,5	77,1	54,6
117,77	77,679	59,697	53,8	65,2	76,6	53,8
116,875	76,835	58,995	54,1	66,0	76,9	54,2
109,08	71,788	55,444	57,2	70,9	78,3	57,3
119,9	78,758	60,363	53,0	64,2	76,3	53,0
217,14	205,711	187,995	0	5,26	13,42	14,85
214,104	203,674	186,535	0	4,87	12,88	16,04
214,155	203,055	185,994	0	5,18	13,15	16,02
213,71	203,107	186,108	0	4,96	12,92	16,19
215,599	205,102	187,859	0	4,87	12,87	15,45
216,853	206,517	189,506	0	4,76	12,61	14,96
216,028	205,605	188,7	0	4,83	12,65	15,28
216,514	205,313	187,751	0	5,18	13,29	15,09
237,04	238,5	243,71	7,04	6,47	4,43	0
240,35	241,23	245,81	5,78	5,38	3,6	0
240,04	240,81	245,12	5,92	5,66	3,87	0
241,75	242,41	246,17	5,19	4,96	3,5	0
239,59	239,96	244,13	6,04	5,94	4,26	0
238,23	238,80	243,63	6,58	6,35	4,46	0
237,75	238,53	243,62	6,77	6,46	4,46	0
238,96	239,64	244,38	6,29	6,02	4,17	0
130,579	112,791	106,762	0	13,59	18,25	48,81
166,645	154,863	152,216	0	7,07	8,66	34,65
166,573	154,491	151,518	0	7,25	9,04	34,68
145,937	132,895	128,884	0	8,94	11,69	42,77
156,417	146,384	143,687	0	6,42	8,14	38,66
159,633	147,925	144,125	0	7,3	9,68	37,42
162,659	152,645	150,178	0	6,16	7,67	36,21
171,894	160,006	157,001	0	6,92	8,66	32,59

Таблица 2. – Цветовые характеристики макулатуры MC-1A для координат цвета H, S, V и Lab

H	S	V	L	a	b	StdV
1	2	3	4	5	6	7
359,9	49,1	42,8	29,18	19,77	11,14	30,473
359,9	49,5	43,8	29,93	19,81	11,18	30,179
359,9	49,6	44,7	30,66	19,83	11,21	29,917
359,9	49,4	45,4	31,26	19,85	11,24	30,46
359,9	49,4	46,2	31,91	19,88	11,27	30,081
359,9	49,5	45,8	31,56	19,86	11,25	29,947
359,9	49,1	42,8	29,17	19,76	11,13	30,473
359,9	49,7	47	32,55	19,89	11,29	28,563
37,56	13,43	85,15	85,02	2,09	12,73	39,05
36,69	12,87	83,96	83,86	2,11	12,34	38,678
35,91	13,16	83,98	83,88	2,09	12,33	39,778
36,86	12,91	83,81	83,71	2,12	12,4	40,079
36,95	12,87	84,55	84,45	2,08	12,4	40,128
37,22	12,61	85,04	84,94	2,06	12,44	39,139
37,07	12,65	84,72	84,62	2,08	12,39	38,815
36,93	13,29	84,91	84,81	2,09	12,58	37,588
56,72	6,51	95,52	94,33	0,45	-2,66	26,506
55,86	5,58	96,4	95,3	0,6	-2,31	23,465
58,02	5,84	96,13	95,19	0,59	-2,37	25,194
57,07	5,1	96,5	95,44	0,55	-2,2	24,797
58,44	6,02	95,74	95,03	0,6	-2,41	25,295
58,31	6,49	95,54	94,32	0,57	-2,59	26,063
57,99	6,69	95,54	94,32	0,58	-2,59	26,735
58,36	6,25	95,83	94,62	0,59	-2,49	24,606
10,53	18,25	51,21	48,31	14,92	10,77	78,375
7,86	8,66	65,35	64,83	9,7	5,56	75,112
8,19	9,04	65,32	64,67	9,91	5,72	73,122
8,44	11,69	57,23	56,31	11,28	7,34	76,843
8,4	8,14	61,34	61,49	9,5	5,87	75,309
10,26	9,68	62,58	62,44	10,42	6,55	72,196
8,79	7,67	63,79	63,7	9,1	5,16	70,314
8,75	8,66	67,41	66,38	10,07	6,04	71,013

В дальнейшем с целью упрощения описания значениям координат цвета были присвоены следующие обозначения: Cul_1-R, Cul_2-G, Cul_3-B, Cul_4-C, Cul_5-M, Cul_6-Y, Cul_7-K, Cul_8-H, Cul_9-S, Cul_10-B, Cul_11-L, Cul_12-a, Cul_13-b, Cul_14-StdV.

Таблица 3. – Результаты кластеризации (мера близости – расстояние Евклида)

Метод кластеризации						
переменная	ближнего соседа	дальнего соседа	центроидный	медиана	групповое среднее	Варда
Col_1	1	1	1	1	1	1
Col_10	1	1	1	1	1	1
Col_11	1	1	1	1	1	1
Col_2	1	1	1	1	1	1
Col_3	1	1	1	1	1	1
Col_12	2	2	2	2	2	2
Col_7	2	2	2	2	2	2
Col_13	3	3	3	3	3	3
Col_14	4	4	4	4	4	4
Col_4	5	5	5	5	5	5
Col_5	5	5	5	5	5	5
Col_6	5	5	5	5	5	5
Col_8	5	5	5	5	5	5
Col_9	5	5	5	5	5	5

Как следует из полученных данных (см. таблицу 3), независимо от метода обработки дескриптеры в кластерах распределились следующим образом: кластер 1 – Col_1, Col_11, Col_10, Col_2, Col_3; кластер 2 – Col_12, Col_7; кластер 3 – Col_13; кластер 4 – Col_14; кластер 5 – Col_4, Col_5, Col_6, Col_8, Col_9.

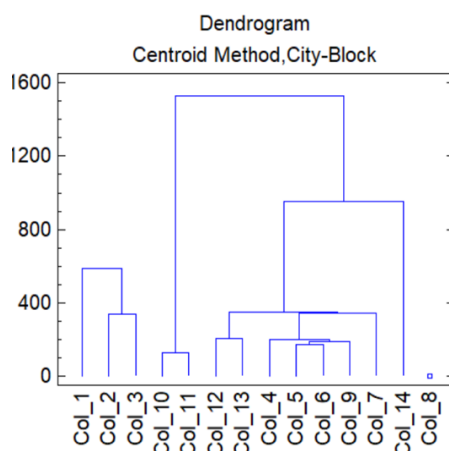


Рисунок 2. – Дендограмма распределения кластеров цветовых характеристик макулатур (центроидный метод, расстояние по Хэммингу)

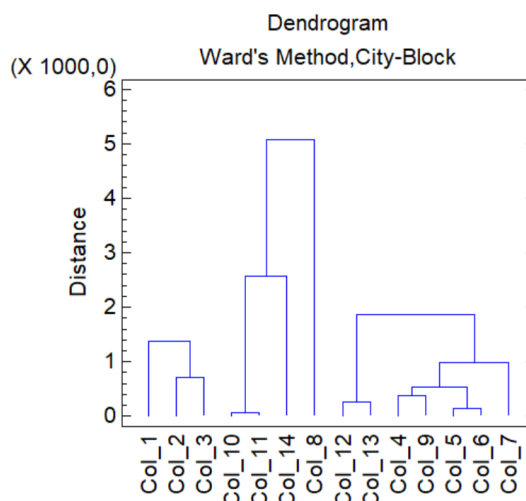
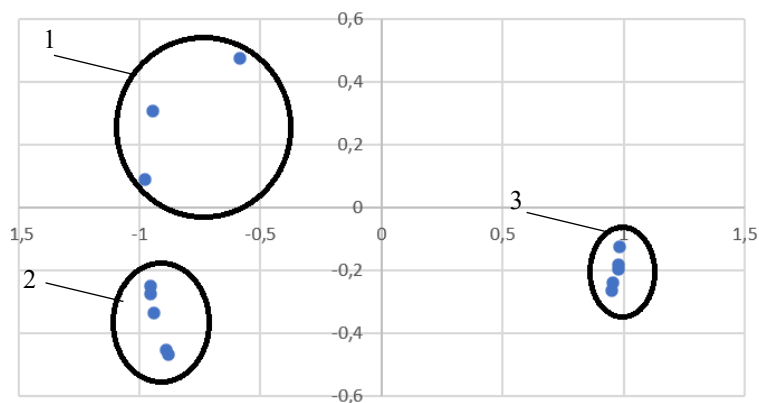


Рисунок 3. – Дендограмма распределения кластеров цветовых характеристик макулатур (метод Варда, расстояние по Хэммингу)



1 – Col_1–Col_4; 2 – Col_5–Col_8; 3 – Col_9–Col_13

Рисунок 4. – Факторные нагрузки цветового анализа образцов макулатуры (центроидный метод, без ротации)

Для уменьшения числа кластера были использованы центроидный метод (2 кластера) и метод Варда (3 кластера), а в качестве меры близости расстояние по Хэммингу (City Block). В этом случае были получены следующие кластеры (Вард): кластер 1 – Col_1, Col_2, Co_3; кластер 2 – Col_10, Col_11, Col_14, и кластер 1 – Col_1, Col_2, Co_3; кластер 2 – все остальные цветовые характеристики. Из дендограмм легко получить любое деление выборки на кластеры – от 2 до 5.

Хотя использование мер сходства, основанных на вычислении коэффициента корреляции для кластерного анализа, редко используется, были проведены соответствующие вычисления с использованием в качестве алгоритма метода межгрупповой средней связи. При этом были выделены следующие кластеры: кластер 1 – Col_1, Col_2, Col_10, Col_11, Col_3; кластер 2 – Col_4, Col_5, Col_6, Col_8, Col_9; кластер 3 – Col_7, Col_12; кластер 4 – Col_14; кластер 5 – Col_15.

Ниже приведен список пар дескрипторов, имеющих статистически значимую корреляцию (имеют P -значения ниже 0,05, что указывает на статистически значимые ненулевые корреляции на уровне доверия 95,0%.):

Col_1, Col_10; Col_1, Col_11; Col_1, Col_12; Col_1, Col_13; Col_1, Col_2; Col_1, Col_3; Col_1, Col_4; Col_1, Col_5; Col_1, Col_6; Col_1, Col_7; Col_1, Col_9; Col_10, Col_11; Col_10, Col_12; Col_10, Col_13; Col_10, Col_2; Col_10, Col_3; Col_10, Col_4; Col_10, Col_5; Col_10, Col_6; Col_10, Col_7; Col_10, Col_9; Col_11, Col_12; Col_11, Col_13; Col_11, Col_2; Col_11, Col_3; Col_11, Col_4; Col_11, Col_5; Col_11, Col_6; Col_11, Col_7; Col_11, Col_8; Col_11, Col_9; Col_12, Col_13; Col_12, Col_2; Col_12, Col_3; Col_12, Col_4; Col_12, Col_5; Col_12, Col_6; Col_12, Col_7; Col_12, Col_8; Col_12, Col_9; Col_13, Col_2; Col_13, Col_3; Col_13, Col_4; Col_13, Col_5; Col_13, Col_6; Col_13, Col_9; Col_14, Col_4; Col_14, Col_5; Col_14, Col_6; Col_14, Col_7; Col_14, Col_8; Col_14, Col_9; Col_2, Col_3; Col_2, Col_4; Col_2, Col_5; Col_2, Col_6; Col_2, Col_7; Col_2, Col_8; Col_2, Col_9; Col_3, Col_4; Col_3, Col_5; Col_3, Col_6; Col_3, Col_7; Col_3, Col_8; Col_3, Col_9; Col_4, Col_5; Col_4, Col_6; Col_4, Col_7; Col_4, Col_8; Col_4, Col_9; Col_5, Col_6; Col_5, Col_8; Col_5, Col_9; Col_6, Col_8; Col_6, Col_9; Col_7, Col_8; Col_7, Col_9; Col_8, Col_9.

Применение метода факторного анализа показало практически одинаковые результаты с кластерным анализом. Доля двух факторов покрывала более 96% дисперсии, что оказалось вполне достаточной для интерпретации результатов, поэтому на рисунке 4 приведены результаты нагрузки факторов F1 и F2 для центроидного метода. Как следует из полученных данных, можно выделить 3 кластера: кластер 1 – Col_1, Co_3, Col_10, Col_2; кластер 2 – Col_12, Co_13, Col_7; кластер 3 – Col_4, Col_5, Col_6, Col_8, Col_9. Использование метода главных компонент привело к аналогичным результатам.

В целом, группируя полученные результаты, можно отметить: чаще всего один устойчивый кластер представляет система RGB, «загрязненный» показателями цветности из других систем; отдельно формируется кластер, состоящий из среднеквадратичного отклонения по серому, что и следовало ожидать, т.к. прямого отношения к цветности он не имеет.

Заключение. Исследование макулатур марок MC-1A – MC-4A методами цветометрии позволило выявить и сгруппировать цветометрические характеристики, выполненные в различных цветовых моделях в любое приемлемое для классификации число кластеров. Дальнейшие исследования должны показать, какой из данных наборов кластеров наиболее приемлем для проведения классификации, что позволит избавиться от избыточной информации и уменьшить шум.

Настоящее исследование выполнено по гранту ГКНТ РБ «Модель машинно-аналитического комплекса и её реализация на базе цифровых технологий при решении задач управления и прогнозирования качества в производстве целлюлозных композиционных материалов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Robot-assisted automated sorting techniques for plastic recycling / D. Aschenbrenner, C. Colloseus, R. Khoury et al. // 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP CMS '23, South Africa / Procedia CIRP 120. – 2023. – P. 1232–1237. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.154
2. Deep Reinforcement Learning for Robotic Pushing and Picking in Cluttered Environment / Y. Deng, X. Guo, Y. Wei et al. // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Macau, China, 2019. – P. 619–626. DOI: 10.48550/arXiv.2302.10717
3. Recyclable Waste Paper Sorting Using Template Matching / M. O. Rahman, A. Hussain, E. Scavino et al. // LNCS 5857, Springer-Verlag. – 2009. – P. 467–478. DOI: 10.1007/978-3-642-05036-7_44
4. Faibish S., Bacakoglu H., Goldenberg A. A. An Eye-Hand System for Automated Paper Recycling // Proceedings of the 1997 IEEE, International Conference on Robotics and Automatlon / Albuquerque, New Mexico, APRIL. – P. 9–14.
5. Würtz H., Breum Niels O. Exposure to Microorganisms During Manual Sorting of Recyclable Paper of Different Quality // Ann Agric Environ Med. – 1997. – Vol. 4. – P. 129–135.
6. High-Speed automated optical sorting of recovered paper / F. A. Hottenstein, G. R. Kenny, T. Friberg et al. // Proc. TAPPI Recycling Symp. – 2000. – Vol. 1. – P. 149–158.
7. Optical Sensor for Noncontact Measurement of Lignin Content in High-Speed Moving Paper Surfaces / M. Ramasubramanian, R. Venditti, C. Ammineni et al. // IEEE Sensors Journal. – 2005. – Vol. 5(5). – P. 1132–1139. DOI: 10.1109/JSEN.2005.851007

8. Venditti R., Ramasubramanian M., Katuri K. A Noncontact Sensor for the Identification of Paper and Board Samples on a High Speed Sorting Conveyor // *Appita Journal: Journal of the Technical Association of the Australian and New Zealand Pulp and Paper Industry*. – 2007. – Vol. 60. – Iss. 5, Sept. – P. 366–371.
9. Pham D. T., Alcock R. J. Image Acquisition and Enhancement; Chap. 4. Feature Extraction and Selection; Chap. 5. Classification // *Smart Inspection System: Techniques and Applications of Intelligent Vision*. – Academic Press, Great Britain, 2003. – P. 38–47, 55–59, 99–102, 115–116, 133–134.
10. Alnihoud J. An Efficient Region-Based Approach for Object Recognition and Retrieval Based on Mathematical Morphology and Correlation Coefficient // *The International Arab Journal of Information Technology* (. – 2008. – Vol. 5(2). – P. 154–162.
11. Comparing deep learning and support vector machines for autonomous waste sorting / G. Sakr, M. Mokbel, A. Darwich et al. // In *Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET)*, IEEE International. – 2016. – P. 207–212. DOI: 10.1109/IMCET.2016.7777453
12. Integrated technologies for solid waste bin monitoring system / M. Arebey, M. A. Hannan, H. Basri et al. // *Environmental monitoring and assessment*. – 2011. – 177(1-4). – P. 399–408. DOI: 10.1007/s10661-010-1642-x
13. Федоров О.В., Болгаров Н.И. Кластерный анализ и риски инновационной деятельности. – М.: Кнорус, 2009. – 157 с.

Поступила 18.02.2026

ANALYSIS OF COLOR CHARACTERISTICS OF WASTE PAPER GRADES MC-1A – MC-4A BY MULTIDIVERSE STATISTICAL ANALYSIS METHODS

M. ZILBERGLEYT, I. NIKOLAICHIK

(Belarusian State Technological University, Minsk)

N. MIDUCOV

(Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

The article presents the results of a study of class A waste paper using colorimetric methods. The system of color characteristics of waste paper, based on various color models: RGB, CMYK, HSB, is considered. Lab, the characteristics also included an indicator of the standard deviation for gray. The goal of the work was to reduce the number of features for subsequent identification of objects. Cluster and factor analysis methods were used as a data processing method. It is shown that the aggregation of features only partially coincides with the color model, and the value of the standard deviation for gray in most cases it does not aggregate with other characteristics.

Keywords: *Class A waste paper, color characteristics, color models, cluster and factor analysis, feature selection.*

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЫСОКОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ СПЕКАНИЕМ КЕРАМИЧЕСКИХ ВОЛОКОН Е-СТЕКЛА,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЯМИ БОРА**

*д-р техн. наук, доц. С.М. АЗАРОВ, канд. техн. наук, доц. А.А. ДРОБЫШ,
О.В. ГРИШЕЛЬ, К.В. ПАВЛОВСКАЯ, Е.И. МИХАСИК*

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

д-р техн. наук, доц. И.В. ФОМИХИНА

(Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск)

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния термической обработки волокна Е-стекла, добавок высокодисперсного диоксида кремния и борсодержащих соединений (колеманит, борная кислота) на структуру, пористость и механические свойства высокопористых материалов. Установлено, что введение соединений бора способствует снижению температуры жидкофазного спекания, подавляет кристаллизацию волокна (аморфность до 100%) и увеличивает предел прочности на сжатие до 10 МПа. Определены закономерности формирования порового пространства и контактообразования между волокнами. Показано преимущество использования колеманита перед борной кислотой из-за меньшей летучести оксида бора. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки технологии фильтрующих материалов на основе керамических волокон.

Ключевые слова: *высокопористые материалы, керамическое волокно, термическая обработка, соединения бора, колеманит, спекание, структура, пористость, проницаемость, прочность при сжатии.*

Введение. Высокопористые материалы на основе керамических волокон находят широкое применение в качестве фильтрующих элементов, катализаторных носителей и теплозащитных конструкций благодаря сочетанию высокой пористости, развитой удельной поверхности и химической стойкости [1]. Среди волокнистых материалов особый интерес представляют волокна Е-стекла, обладающие высокими термомеханическими характеристиками и доступностью сырья [2].

Одним из эффективных способов управления структурой и свойствами является модифицирование поверхности волокон высокодисперсными добавками, которые в процессе термической обработки участвуют в формировании межволоконных контактов и влияют на фазовые превращения [3]. Особое место среди модификаторов занимают соединения бора (B_2O_3 , H_3BO_3 , колеманит $Ca_2B_6O_{11} \cdot H_2O$), которые снижают температуру плавления силикатных систем и способствуют сохранению аморфной структуры волокна [4; 5].

Цель настоящей работы – установление закономерностей структурообразования и определение физико-механических свойств высокопористых материалов, полученных спеканием базальтовых волокон, модифицированных соединениями бора (колеманит, борная кислота) и высокодисперсным диоксидом кремния, в зависимости от режимов термической обработки.

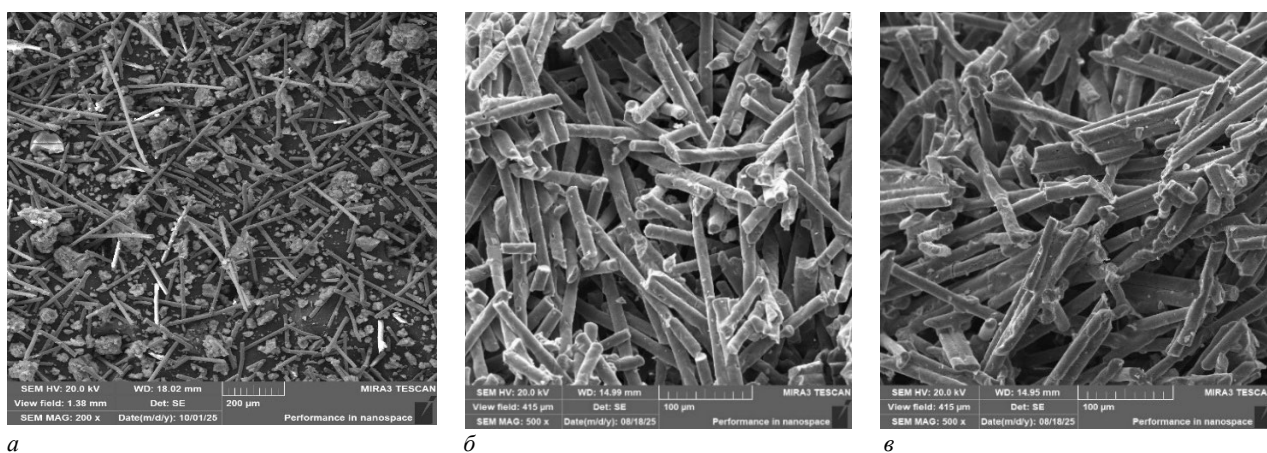
Основная часть. В качестве исходных материалов использовали: волокно Е-стекла с диаметром волокон 5–15 мкм; высокодисперсный диоксид кремния (SiO_2) с размером частиц 50–100 нм; колеманит производства фирмы «Eti Mine Works G.M.» (Турция) следующего химического состава (%): 5,66 SiO_2 , 36,54 B_2O_3 , 0,35 Al_2O_3 , 23,49 CaO , 2,61 MgO , 0,30 Na_2O , 0,07 Fe_2O_3 ; борную кислоту H_3BO_3 (ГОСТ 9656-75).

Формование образцов осуществляли прессованием в пресс-форме при давлении 4 МПа. Образцы в виде цилиндров диаметром 25 мм и высотой 5–10 мм термически обрабатывали в электрической печи сопротивления в диапазоне температур 750–770 °С. Структура образцов до и после термообработки представлена на рисунке 1.

Структуру поверхности исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (SEM). Фазовый состав определяли рентгенофазовым анализом (РФА) на дифрактометре ДРОН-3 в $CuK\alpha$ -излучении. Степень аморфности оценивали методом рентгеновской дифрактометрии. Пористость и распределение пор по размерам изучали методом порометрии (ГОСТ 26849-86). Газовую проницаемость определяли при перепаде давления 0,1 бар. Механические испытания на сжатие проводили на универсальной испытательной машине Instron 5967 согласно ГОСТ 4651-2014.

На рисунках 2 и 3 представлены изображения поверхности образцов после термообработки. Наблюдается жидкофазное спекание с образованием на поверхности волокна эвтектических фаз, участвующих в контактообразовании и повышающих прочность. Поры остаются открытыми, не заполненными жидкой фазой. При нагреве до 770 °С происходит более интенсивное контактообразование между волокнами по сравнению с нагревом до 750 °С.

При нагреве до 770 °С происходит небольшое уменьшение размера пор за счет образования большего количества жидкофазной эвтектической фазы силлиманита (Al_2O_3Si) по сравнению с нагревом до 750 °С и более интенсивное контактообразование. Поверхность волокон остается гладкой (рисунок 3).



a – исходный; *б* – 750 °C; *в* – 770 °C

Рисунок 1. – Вид образцов до термообработки (*a*) и после термообработки (*б, в*)

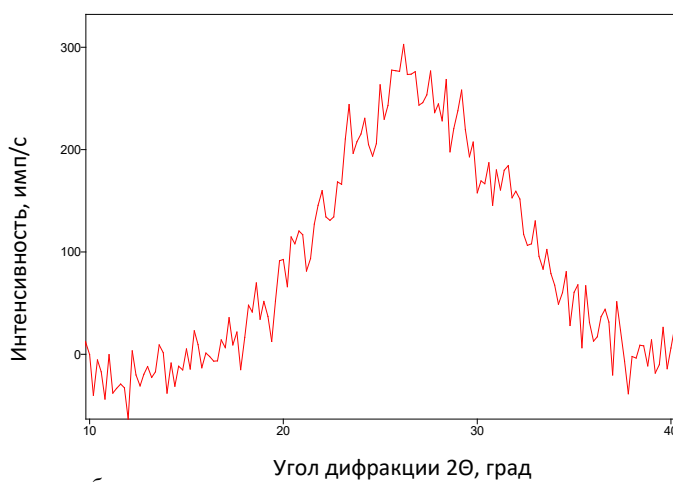
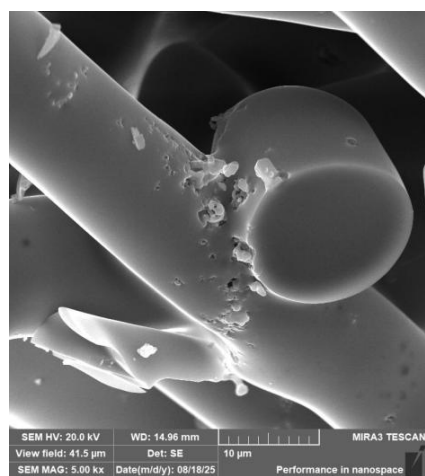


Рисунок 2. – Изображение структуры (*a*) и дифрактограмма(*б*) образца с добавками SiO₂ после спекания при 750 °C

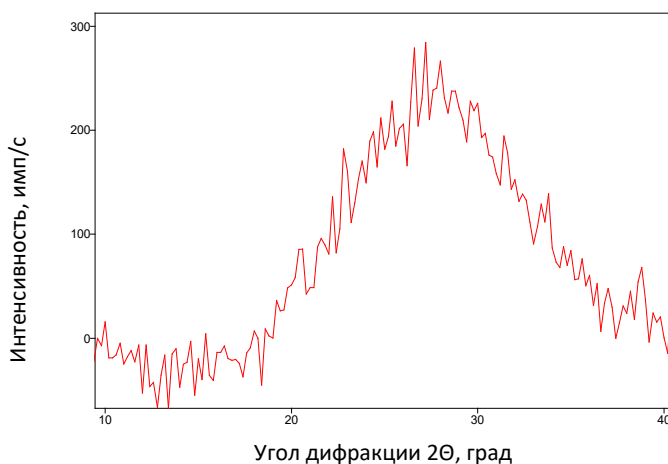
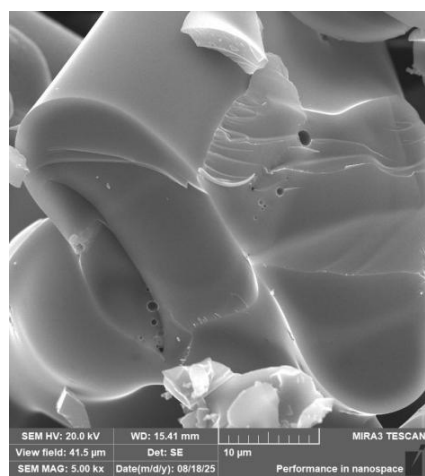


Рисунок 3. – Изображение структуры (*a*) и дифрактограмма(*б*) образца с добавками SiO₂ после спекания при 770 °C

Рентгенофазовый анализ образцов показал, что при нагреве немодифицированного волокна до 750 °С степень аморфности снижается до 10%, а при нагреве до 770 °С – до 3%. В то же время для образцов с высокодисперсным SiO₂ наблюдается 100% аморфность независимо от диапазона температурной обработки. Это свидетельствует о том, что введение SiO₂ подавляет кристаллизационные процессы и стабилизирует аморфное состояние волокна.

Соединения бора (H₃BO₃, Colemanite Ca₂B₆O₁₁·H₂O) химически активно взаимодействуют с поверхностью базальтового волокна и изменяют его структуру.

Химическое взаимодействие B₂O₃ с компонентами волокна Е-стекла происходит по следующим механизмам, представленным [4–10]. Волокно содержит (в масс.%): 45–52 SiO₂, 12–17 Al₂O₃, 5–12 CaO, 4–7 MgO, до 2 Fe₂O₃. При термической обработке выше 500 °С оксид бора, образующийся при разложении колеманита или борной кислоты, вступает в следующие реакции:

- с оксидом кальция: $\text{CaO} + \text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaB}_2\text{O}_4$ (метаборат кальция).

Температура начала реакции – 550–600 °С. CaB₂O₄ – легкоплавкое соединение ($T_{\text{пл}} \approx 980$ °С), которое при 700–770 °С находится в вязкожидком состоянии и обволакивает волокна;

- с силикатами кальция: $\text{CaSiO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Ca}[\text{Si}_2\text{B}_2\text{O}_8]$.

Реакция начинается при 700–750 °С. Боросиликат формирует кристаллические «мостики» между волокнами;

- при этом с глиноземом и кремнеземом: $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ с формированием боросиликатного стекла. Образовавшаяся аморфная фаза имеет низкую вязкость при 750–800 °С и эффективно смачивает волокна.

Известно, что оксид бора является одним из самых сильных флюсов в технологии получения стекла [4]. Диаграммы состояния системы CaO-SiO₂-B₂O₃ показывают, что эвтектика CaSiO₃-CaB₂O₄ плавится при 740 °С, тогда как чистый CaSiO₃ (волластонит) плавится при 1544 °С [10]. Это означает, что при нагреве до 770 °С в присутствии бора образуется значительное количество жидкой фазы. Жидкая фаза обеспечивает капиллярное растекание по поверхности волокон с образованием сплошных пленок толщиной 0,1–1 мкм и стягивание волокон за счет сил поверхностного натяжения, что уменьшает межволоконные зазоры и увеличивает количество контактов (см. рисунки 2, а, 3, а). Волокно Е-стекла в исходном состоянии аморфно. При нагреве выше 650–700 °С начинается его кристаллизация с образованием пироксенов (авгит, диопсид) и плагиоклазов. Этот процесс резко ухудшает механические свойства: кристаллизованное волокно становится хрупким, прочность на изгиб падает в 2–3 раза [2]. Введение B₂O₃ подавляет кристаллизацию по двум причинам. Во-первых, ионы бора (B³⁺) имеют малый радиус и высокий заряд. Встраиваясь в кремнекислородную сетку (заменяя Si⁴⁺ или занимая межузельные позиции), они нарушают ее периодичность, что препятствует зарождению кристаллических зародышей. Во-вторых, образующиеся боросиликатные фазы (например, Al₂O₃·2SiO₂·B₂O₃) имеют высокую вязкость в расплавленном состоянии и при охлаждении легко застекловываются, не успевая кристаллизоваться. В результате аморфность образцов с добавкой колеманита и SiO₂ после нагрева до 770 °С сохраняется (см. рисунок 3, б).

При нагреве до 770 °С жидкая фаза, обогащенная боратами, собирается в точках контакта волокон за счет капиллярных сил. Формируются характерные шейки – утолщения диаметром в 1,5–2 раза больше диаметра волокна. На рисунке 3, а представлена область контакта без острых граней, что свидетельствует о жидкофазном механизме образования. Проведенный микрозондовый анализ показал, что в шейках содержание B₂O₃ достигает 8–12%, тогда как на гладких участках волокна – не более 2–3%. В отличие от бора, модификатор SiO₂ сам по себе не образует жидкой фазы при 770 °С (температура плавления SiO₂ – 1713 °С), поэтому контактообразование при использовании только SiO₂ происходит по твердофазному механизму, что менее эффективно.

Присутствие бора приводит к частичному закрытию пор за счет заполнения их жидкой боратной фазой. Как показано в таблице 1 при введении SiO₂ и повышении температуры нагрева с 750 до 770 °С пористость снижается с 77,1% до 62,4%. Основной вклад в это снижение вносит именно бор. Однако важно, что поры остаются открытыми (сообщающимися), что подтверждается высокими значениями газовой проницаемости (46,5·10⁻¹² м²). Жидкая фаза концентрируется в узких перешейках и микротрещинах, но не закупоривает магистральные поры.

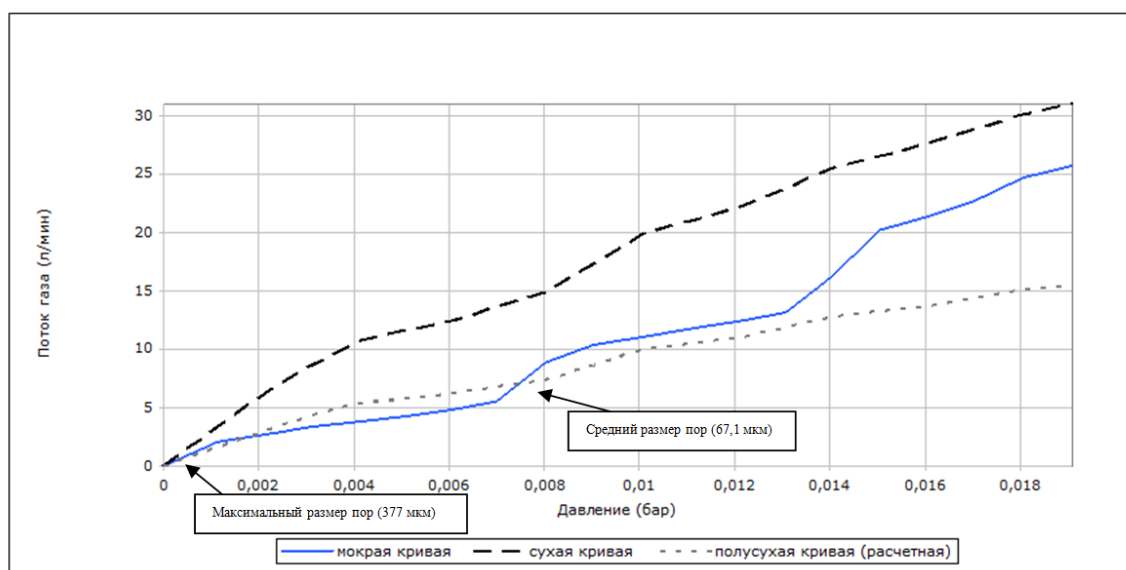
Микроиндентирование зон контактов (шеек) показало, что микротвердость материала в шейках составляет 6,5–7,2 ГПа для образцов с колеманитом против 2,8–3,5 ГПа для образцов без бора. Это доказательство того, что борсодержащие фазы (CaB₂O₄, Ca[Si₂B₂O₈]) обладают значительно более высокой собственной прочностью, чем аморфное Е-стекло.

В таблице 1 представлены размер пор ($D_{\text{пор}}$), газовая проницаемость ($K_{\text{г}}$), пористость (Π). Анализ результатов (таблица 1, см. рисунок 1, б, в) показывает, что пористость образцов на основе базальтового волокна после нагрева до 770 °С остается практически постоянной и достигает 76%. Газовая проницаемость при этом составляет 41,8·10⁻¹² м². Для образцов с добавлением SiO₂ наблюдается более выраженная зависимость от температурного режима. При повышении верхней границы нагрева с 750 °С до 770 °С общая пористость уменьшается с 77,1% до 62,4 % (в 1,2 раза), а газовая проницаемость снижается с 54,9·10⁻¹² м² до 46,5·10⁻¹² м². Это объясняется уве-

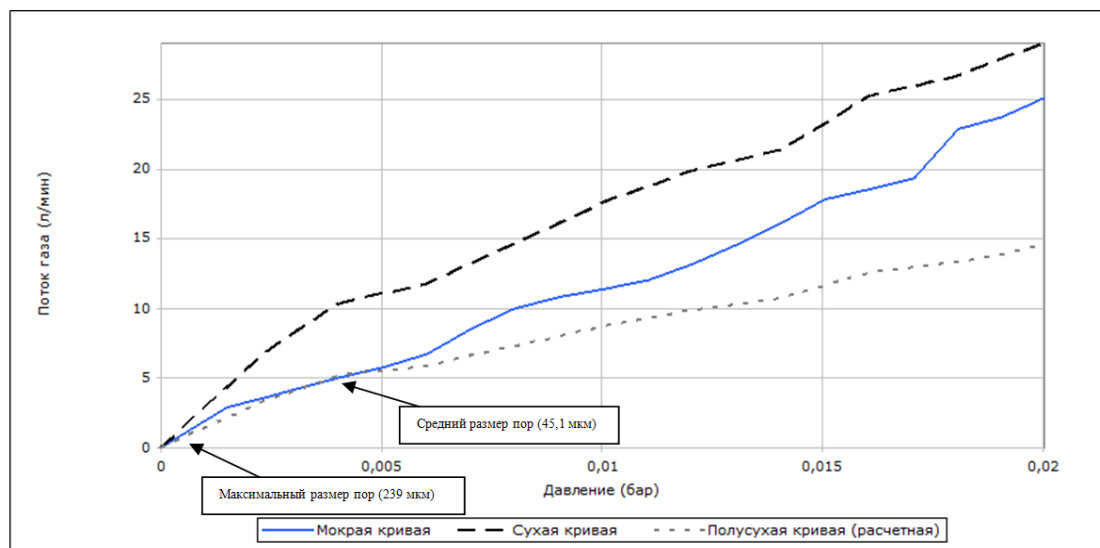
личением количества жидкофазной эвтектической фазы силлиманита и более интенсивным контактообразованием, что подтверждается данными [1; 8]. Порометрические кривые (рисунок 4) демонстрируют, что введение SiO_2 и соединений бора приводит к увеличению среднего размера пор и увеличению дисперсии их распределения.

Таблица 1. – Максимальный, средний размер пор, пористость, газовая проницаемость

Материал	Термообработка, °C	$D_{\text{пор}}$, мкм		K_{μ} , 10^{-12} м^2	Π , %
		$D_{\text{пор макс.}}$	$D_{\text{пор ср.}}$		
Волокно	750	312,0	23,3	41,6	76,2
Волокно	770	203,5	25,2	41,8	75,6
Волокно с SiO_2	750	377,0	67,1	54,9	77,1
Волокно с SiO_2	770	239,0	45,1	46,5	62,4



a



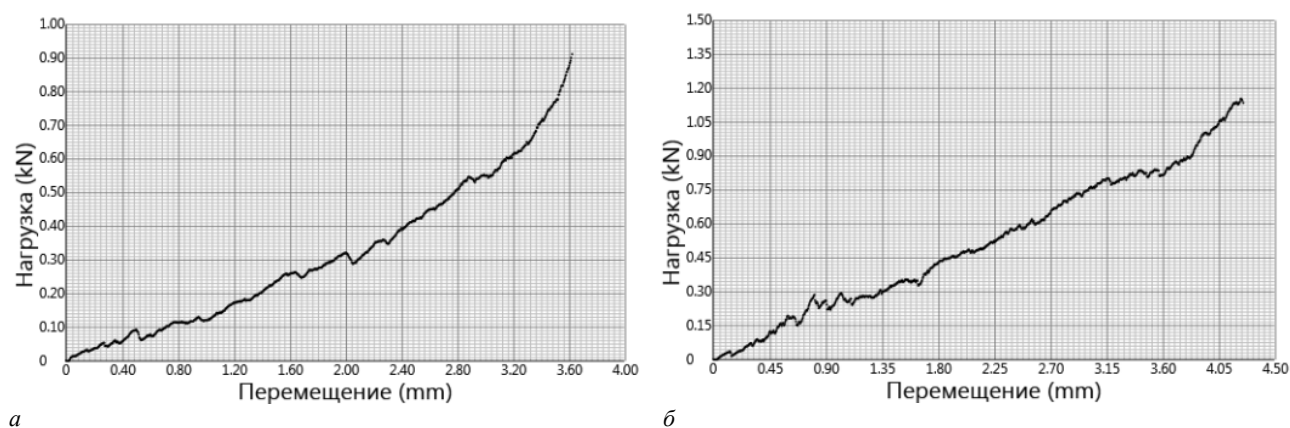
b

a – 750 °C; b – 770 °C

Рисунок 4. – Порометрические кривые определения размера пор в образцах с добавкой SiO_2

Испытания на сжатие (рисунок 5, таблица 2) показали, что прочность на сжатие образцов из волокна Е-стекла после спекания при 770 °C составляет 5,0 МПа, что в два раза выше, чем при температуре 750 °C (2,5 МПа). Добавление высокодисперсного SiO_2 и боросодержащих компонентов приводит к значительному

упрочнению: предел прочности на сжатие достигает 7,0 МПа при нагреве до 750 °С и 10,0 МПа – до 770 °С. Полученные результаты согласуются с данными работы [4], что модифицирование колеманитом интенсифицирует процессы жидкофазного спекания за счет образования легкоплавких эвтектик. При этом происходит более полное смачивание волокон и формирование прочных межволоконных связей без существенного снижения пористости. Прирост прочности обусловлен увеличением количества и прочности межволоконных связей за счет жидкофазного спекания, сохранением аморфной структуры волокна (которое при разрушении работает как упругий элемент, рассеивая энергию трещины) и формированием градиентных переходных слоев между волокном и связующим, что снижает концентрацию напряжений.



a – волокно; *б* – волокно с добавкой SiO₂

Рисунок 5. – Кривые нагружения образцов при испытаниях на прочность после спекания при температуре 770 °С

Таблица 2. – Результаты испытания образцов на сжатие

Материал	Термообработка, °С	Прочность на сжатие, МПа
Волокно Е-стекла	500–750	2,5
	500–770	5,0
Волокно Е-стекла с SiO ₂	500–750	7,0
	500–770	10,0

На основе проведенных экспериментальных исследований установлено, что спекание в диапазоне температур 750–770 °С не нарушает поровое пространство материалов на основе волокна Е-стекла, при этом наблюдается жидкофазное спекание с образованием эвтектических фаз, способствующих контактообразованию между волокнами. Поры остаются открытыми и сообщающимися, что подтверждается высокими значениями газовой проницаемости, а жидкая фаза концентрируется преимущественно в зонах межволоконных контактов, не закупоривая магистральные поры. При нагреве до 770 °С контактообразование происходит более интенсивно по сравнению с нагревом до 750 °С.

Введение высокодисперсного SiO₂ позволяет сохранить аморфную структуру волокна независимо от диапазона температурной обработки и предотвратить его кристаллизацию. Это связано с тем, что частицы SiO₂ равномерно распределяются по поверхности волокон, образуя защитный слой, который препятствует упорядочению кремнекислородного каркаса и зарождению кристаллических фаз, таких как пироксены и плагиоклазы.

В таблице 3 приведены сравнительные характеристики боросодержащих модификаторов [4–10]. Сравнение показывает, что колеманит эффективнее борной кислоты.

Таблица 3. – Сравнительная характеристика боросодержащих модификаторов

Параметр	Борная кислота H ₃ BO ₃	Колеманит Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·H ₂ O
Температура разложения, °С	150–215	345–450
Потери В ₂ O ₃ при 500 °С, %	до 15	практически 0
Состояние В ₂ O ₃ в шихте	свободный, летучий	связанный в CaB ₂ O ₄
Равномерность распределения по волокну	низкая (из-за улетучивания)	высокая
Аморфность до 770 °С, %	80–90	100
Наличие кристаллических фаз после нагрева	частичная кристаллизация	отсутствует
Экологическая безопасность	низкая (выбросы В ₂ O ₃)	высокая

Борная кислота начинает разлагаться уже при 150–215 °С, и при 500 °С до 15% B_2O_3 улетучивается, что приводит к потерям модификатора, загрязнению атмосферы, неравномерному распределению бора по поверхности волокон и неполному подавлению кристаллизации (аморфность составляет лишь 80–90%). Колеманит же разлагается при 345–450 °С с потерей только кристаллизационной воды, а образующийся B_2O_3 находится в связанном состоянии в составе CaB_2O_4 , что практически полностью исключает его летучесть. Это обеспечивает нулевые потери B_2O_3 , равномерное распределение модификатора по поверхности волокон и 100% аморфность после нагрева до 770 °С, а также более высокую экологическую безопасность процесса.

Пористость и газовая проницаемость материалов на основе немодифицированного базальтового волокна после нагрева в диапазонах 800–1050 °С и 800–1080 °С остаются практически постоянными и составляют 75,6–76,2% и $(41,6–41,8) \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ соответственно. Для образцов с добавлением SiO_2 и Colemanita наблюдается более выраженная зависимость от температурного режима: при повышении верхней границы нагрева с 750 до 770 °С общая пористость уменьшается с 77,1% до 62,4% (в 1,2 раза), а газовая проницаемость снижается с $54,9 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ до $46,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. Это объясняется увеличением количества жидкофазной эвтектической фазы силлиманита (Al_2O_3Si) и более интенсивным контактообразованием. Порометрические кривые демонстрируют, что введение SiO_2 и соединений бора приводит к увеличению среднего размера пор и расширению их распределения.

Прочность на сжатие достигает 10,0 МПа для образцов с добавкой SiO_2 после нагрева до 770 °С, что в 2–5 раз превышает прочность немодифицированных образцов (2,5–5,0 МПа). Прирост прочности обусловлен увеличением количества и прочности межволоконных связей за счет жидкофазного спекания, сохранением аморфной структуры волокна, которое при разрушении работает как упругий элемент, рассеивая энергию трещины, а также формированием градиентных переходных слоев между волокном и связующим, что снижает концентрацию напряжений.

Заключение. Полученные результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. С фундаментальной точки зрения подтверждены химические и физико-химические механизмы влияния соединений бора на структурообразование волокнистых композиционных материалов, включая реакции фазообразования, снижение температуры эвтектического плавления, подавление кристаллизации и формирование межволоконных контактов. С прикладной точки зрения разработанные режимы термической обработки и состав модифицирующей композиции (базальтовое волокно + SiO_2 + борсодержащий модификатор) могут быть непосредственно использованы при разработке технологических регламентов изготовления высокопористых материалов фильтрационного назначения, работающих в агрессивных средах и при повышенных температурах. Рекомендуется использовать Colemanita в качестве источника оксида бора как более эффективную, экономичную и экологически безопасную альтернативу борной кислоте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование структуры и свойств керамических материалов с жесткой системой микрофильтрационных транспортных пор на основе базальтовых волокон / Е.Е. Петюшик, С.М. Азаров, Т.А. Азарова и др. // Журнал метастабильных и нанокристаллических материалов. – 2022. – Т. 34. – С. 13–18.
2. Модифицирование поверхности высокопористых керамических материалов / В.Н. Анциферов, Е.В. Матыгуллина, С.Е. Порозова и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – № 8. – С. 2–4.
3. Павлюкевич Ю.Г., Левицкий И.А., Мазура Н.В. Использование Colemanita в производстве стеклянного волокна // Стекло и керамика. – 2009. – № 10. – С. 9–13.
4. Пути совершенствования технологии и свойств конструкционных керамических материалов / Г.И. Бердов, В.Е. Злобин, Е.Е. Петюшик и др. // Конструкции из композиционных материалов. – 2004. – № 2. – С. 5–9.
5. Влияние природы связующего на структурно-механические свойства пористой силикатной керамики / А.И. Ратько, А.И. Иванец, Е.А. Степанова и др. // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 222–227.
6. Влияние размера частиц порошка на структурные характеристики пористых проницаемых макротел на основе природного кварца / О.П. Реут, Е.В. Королев, А.Г. Лошкарев и др. // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. – Минск, 2006. – Вып. 29. – С. 337–341.
7. Kolesov Yu.I., Kudryavtsev M.Yu., Mikhailenko N.Yu. Types and Compositions of Glass for Production of Continuous Glass Fiber // Glass and Ceramics. – 2001. – Vol. 58, No. 5–6. – P. 197–202. DOI: 10.1023/A:1012386814248
8. Реут О.П., Королев Е.В. Удельная поверхность и пористая структура волокнистых композитов // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. – Минск, 2010. – Вып. 33. – С. 215–221.
9. Диаграммы состояния силикатных систем: справочник / Н.А. Торопов, В.П. Барзаковский, В.В. Лапшин и др. – Л.: Наука, 1972. – Вып. 3: Тройные системы. – 448 с.
10. Павлюкевич Ю.Г., Левицкий И.А. Влияние Colemanita на процессы силикатообразования при варке стекла // Труды БГТУ. Серия II, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2009. – № 4. – С. 38–42.

Поступила 22.05.2026

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-POROUS MATERIALS OBTAINED
BY SINTERING OF E-GLASS CERAMIC FIBERS MODIFIED
BY BORON COMPOUNDS**

S. AZAROV, A. DROBYSH, O. HRYSHEL, K. PAYLOYSKAYA, E. MIKHASIK
(Belarusian National Technical University, Minsk)

I. FOMIKHINA
(State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy, Minsk)

The article presents the results of experimental studies of the effect of thermal treatment of E-glass fiber, additives of highly dispersed silicon dioxide and boron-containing compounds (colemanite, boric acid) on the structure, porosity and mechanical properties of highly porous materials. It is established that the introduction of boron compounds contributes to the reduction of the liquid-phase sintering temperature, suppresses the crystallization of the fiber (amorphity up to 100%) and increases the compressive strength up to 10 MPa. The patterns of pore space formation and contact formation between fibers are determined. The advantage of using colomanite over boric acid due to the lower volatility of boron oxide is shown. The results obtained are of practical importance for the development of technology of filter materials based on ceramic fibers.

Keywords: *highly porous materials, ceramic fiber, heat treatment, boron compounds, colomanite, sintering, structure, porosity, permeability, and compressive strength.*

УДК 666.3-1-12-127

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-119-124

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ СОХРАНЕНИЯ ЗАДАННОЙ ПОРИСТОСТИ
В МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ЧАСТИЦ И ВОЛОКОН**

*д-р техн. наук, доц. С.М. АЗАРОВ, канд. техн. наук, доц. А.А. ДРОБЫШ,
А.С. ЯНЕЦКАЯ, Н.И. АСТАПЧИК*

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлены результаты моделирования усадки пористых структур, получаемых спеканием тугоплавких неметаллических материалов. Рассмотрена задача формирования жесткого каркаса транспортных пор в пористых материалах на основе базальтового волокна и мелкодисперсных алюмосиликатных частиц. Предложено использование перколяционного подхода для оценки минимальной концентрации алюмосиликатных частиц-центров, ограничивающих усадку. Порог перколяции определяется с помощью математической модели, основанной на матричном представлении аппарата теории графов. Показано, что применение дискретных математических моделей позволяет прогнозировать структурную устойчивость каркаса при сохранении пористости более 50%.

Ключевые слова: базальтовое волокно, пористость, перколяционный кластер, усадка, матрица смежности, порог протекания.

Введение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных и экономичных способов очистки сжимаемых сред, обеспечивающих соблюдение экологических норм и повышение производительности процессов фильтрации. Пористые материалы на основе алюмосиликатных порошков (например, отходов фарфорового производства) и тугоплавких базальтовых волокон позволяют создавать фильтры с заданными характеристиками. Такие материалы востребованы в химическом машиностроении, медицине, пищевой промышленности и водоочистке [1].

Спецификой формирования пористых каркасов является микрометрический диаметр базальтовых волокон (≤ 10 мкм) и жидкофазный механизм их спекания в диапазоне температур 1000–1200 °С. Данные условия провоцируют значительную объемную усадку образцов, что препятствует сохранению открытой пористости на уровне, необходимом для транспортных пор (более 50%). Для стабилизации структуры и ограничения усадки необходимо введение тугоплавких центров, формирующих пространственный скелет. В качестве таких центров предложено использовать более тугоплавкие алюмосиликатные частицы размером 2–3 диаметра волокна [2; 3]. Сложность практической реализации заключается в определении минимально необходимой доли частиц, ограничивающих усадку, при которой формируется непрерывный каркас, соединяющий противоположные границы образца. В условиях случайного распределения компонентов данная задача эффективно решается в рамках теории перколяции (протекания) [4; 5]. Перколяция изучает формирование связанных структур (кластеров), и момент возникновения сквозного кластера (порог перколяции) интерпретируется в данной работе как момент сохранения геометрической формы и заданной пористости материала при спекании.

Целью исследования является анализ критических условий сохранения пористости в смесях алюмосиликатных частицах и базальтового волокна путем построения графовых моделей и расчета перколяционных характеристик системы.

Основная часть. Задача сводится к оценке порога перколяции (p_c) – концентрации, при которой частицы-центры образуют непрерывный кластер, соединяющий противоположные границы образца. Ниже p_c – усадка не контролируется, выше p_c – каркас фиксирует геометрию пор. Для формализации задачи рассмотрим двумерную модель упаковки частиц. Представим структуру материала в виде квадратной решетки. Узлы решетки моделируют локальные области материала. Узел считается «открытым» (1), если в данной локальной области доминирует алюмосиликатная частица (частица-центр, ограничивающая усадку), и «закрытым» (0) – если область занята только волокнами, склонными к усадке. В качестве простейшего примера для демонстрации метода рассмотрим квадратную решетку 4 узла, 4 связи. Графическое изображение, на котором представлены различные комбинации открытых и закрытых узлов, показано на рисунках 1–5.

Общее число возможных конфигураций для квадратной решетки, состоящей из 4 узлов, каждый из которых может находиться в одном из двух состояний (открыт или закрыт), определяется по формуле

$$N = p^n, \quad (1)$$

где $p = 2$ – число возможных состояний для каждого узла; $n = 4$ – количество узлов в решетке.

Таким образом, общее число конфигураций:

$$N = 2^4.$$

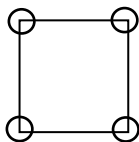


Рисунок 1. – Квадратная решетка с четырьмя закрытыми узлами

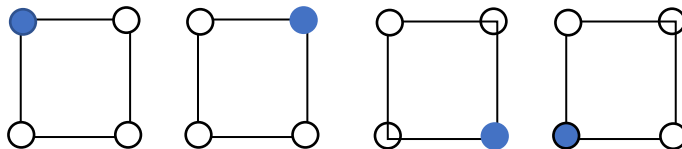


Рисунок 2. – Комбинация из 1 открытого и 3 закрытых узлов

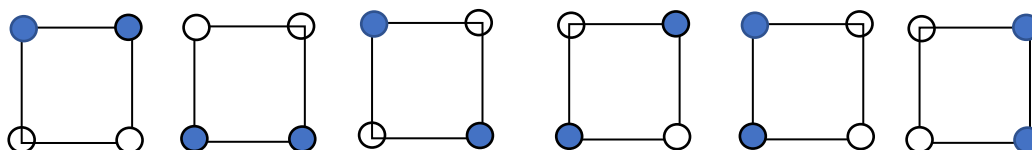


Рисунок 3. – Комбинация из 2 открытых и 2 закрытых узлов

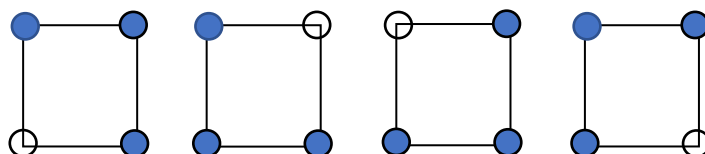


Рисунок 4. – Комбинация из 3 открытых узлов и 1 закрытого

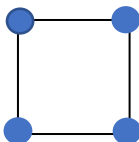


Рисунок 5. – Квадратная решетка с четырьмя открытыми узлами

Перколяция в данной модели реализуется при наличии непрерывного пути через открытые узлы, соединяющего противоположные границы решетки. Для анализа порога перколяции рассмотрим количество благоприятных исходов для различного числа открытых узлов.

Используем формулу сочетаний для определения числа способов выбора m открытых узлов из n :

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}. \quad (2)$$

Расчеты:

Для $m = 2$: $C_4^2 = 6$.

Из этих 6 комбинаций только 4 обеспечивают наличие пути (две комбинации, где открытые узлы расположены диагонально, не удовлетворяют условию перколяции).

Для $m = 3$: $C_4^3 = 4$.

Все 4 комбинации обеспечивают наличие пути.

Для $m = 4$: $C_4^4 = 1$.

Единственный случай, когда все узлы открыты.

Суммарное число благоприятных исходов: $4 + 4 + 1 = 9$.

Порог перколяции p_c определяется как отношение числа благоприятных исходов к общему числу конфигураций для заданного числа открытых узлов. Рассчитаем вероятность для каждого случая:

Для $m = 2$: $P(A) = \frac{2}{4} = 0.5$.

Для $m = 3$: $P(A) = \frac{3}{4} = 0.75$.

Для $m = 4$: $P(A) = \frac{4}{4} = 1$.

Для оценки порога перколяции в терминах доли открытых узлов:

При $m = 2$: $p_c \approx 0.5$.

При $m = 3$: $p_c \approx 0.75$.

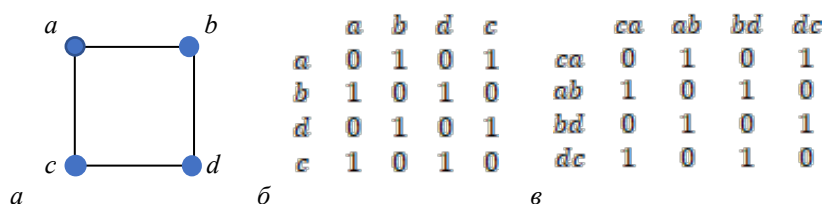
При $m = 4$: $p_c = 1$.

С увеличением числа узлов в решетке порог перколяции стремится к единице, что соответствует физическому смыслу задачи: для возникновения сквозного пути требуется все большая доля открытых узлов.

Математическая модель процесса основывается на матричном представлении, где в двумерном случае системе соответствует бинарная матрица состояний из комбинаций открытых (1) и закрытых (0) элементов. На примере анализа фрагмента матрицы размером 2×2 , представленного на рисунке 7, видно, что каждая клетка заполняется с вероятностью p (параметр перколяции), находящейся в диапазоне $0 \leq p \leq 1$. Для определения состояния каждой ячейки генерируется случайное число, и если оно оказывается меньше p , клетка становится «пустой», формируя структуру системы. В данной конфигурации анализ пути выявил наличие сквозного маршрута от верхней строки к нижней через координаты $(1,1) \rightarrow (1,2) \rightarrow (2,2)$, что непосредственно свидетельствует о возникновении явления перколяции. Фрагмент матричного анализа, указывающий на наличие сквозного маршрута через активные центры:

$$A \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow A \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow A \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow A \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Для быстрого анализа связей между вершинами и ребрами необходимо построить матрицу смежности вершин, в нашем случае узлов, и матрицу смежности ребер, каждая строка и столбец которой сопоставлены определенной вершине и ребру графа. Матрица смежности вершин фиксирует связи вершина–вершина, а матрица смежности ребер показывает связь вершина–ребро. Рассматривая квадратную решетку как неориентированный граф, для построения матриц смежности вершин и смежности ребер требуется симметричная матрица M (рисунок 6). В задачах перколяции такой подход позволяет эффективно определить связность между узлами и ребрами и отсеивать комбинации, которые не приводят к перколяции.



а – неориентированный граф; б – матрица смежности вершин;
в – матрица смежности ребер

Рисунок 6. – Построение матриц смежности вершин и ребер неориентированного графа

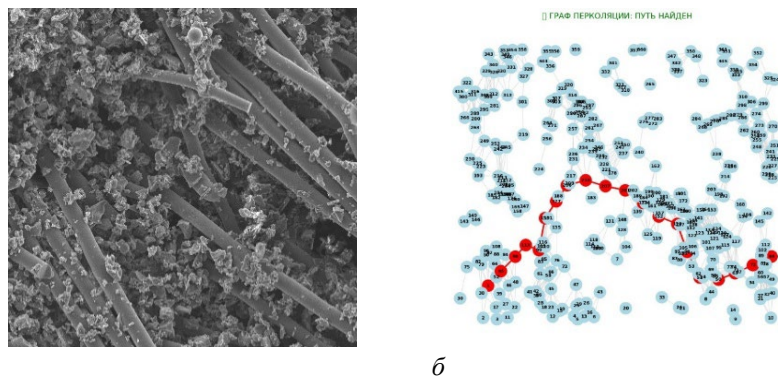
$$M = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Визуализация графа по матрице смежности позволяет качественно определить момент образования перколяционного кластера – непрерывной цепи, соединяющей противоположные края образца. На рисунке 7 представлена структура пористого материала на основе смесей алюмосиликатных частиц и базальтового волокна в сравнении с двумерным модельным аналогом порога перколяции с вероятностью 0,51. Видно, что полученное двумерное модельное представление в определенной степени соответствует трехмерной структуре пористого материала. Видимое соответствие подтверждает, что двумерная решеточная модель адекватно отражает топологию связей в реальном композите.

Из шихты на основе алюмосиликатных частиц размером 30–60 мкм и рубленого базальтового волокна с добавлением пластификатора и порообразователя прессовали при давлении 20 МПа на децимальном прессе партии экспериментальных образцов в виде цилиндров диаметром 17 мм и высотой 17 мм. Полученные образцы спекали в воздушной атмосфере. Соотношения ингредиентов в шихте и режимы спекания представлены в таблице 1. Соотношения ингредиентов и режимы смешивания подбирались таким образом, чтобы гарантировать создание структур с равномерным распределением алюмосиликатных частиц в объеме шихты.

Структура всех представленных образцов исследовалась на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия). Микроскоп оснащен детекторами вторичных электронов SE и обратно отраженных электронов BSE, которые позволяют проводить анализ образцов в двух режимах. При съемке образцов в режиме вторичных электронов (SE) контраст на изображении создается за счет отраже-

ния электронного пучка от поверхности образца. В случае исследования при помощи детектора обратно отраженных электронов (BSE) контраст на картинке создается за счет разности «усредненных» атомных номеров.



а – изображение поверхности пористого материала;
б – модель с выделенной траекторией перколяции

Рисунок 7. – Сравнение трехмерной структуры пористого материала и двумерного модельного аналога

Таблица 1. – Характеристика исследуемых образцов

№ образца	Содержание ингредиентов, % масс	Температура спекания, °С
1	Алюмосиликатные частицы – 15, базальтовое волокно – 70, поробразователь – 10, пластификатор – 5	1000
2	Алюмосиликатные частицы – 15, базальтовое волокно – 70, поробразователь – 10, пластификатор – 5	1150
3	Алюмосиликатные частицы – 30, базальтовое волокно – 50, поробразователь – 15, пластификатор – 5	1000
4	Алюмосиликатные частицы – 30, базальтовое волокно – 50, поробразователь – 15, пластификатор – 5	1150
5	Алюмосиликатные частицы – 40, волокно – 40, поробразователь – 15, пластификатор – 5	1000
6	Алюмосиликатные частицы – 40, волокно – 40, поробразователь – 15, пластификатор – 5	1150

Спекание в диапазоне 1100–1150 °С на воздухе приводит к выгоранию органических поробразователя и пластификатора, уплотнению образца и, как следствие, усадке и изменению удельного веса (таблица 2).

Все образцы уменьшились в размерах (диаметр ~14–15 мм против ~18 мм, высота ~12–15 мм против ~17 мм). Наблюдается зависимость максимальных усадок (~59%) у группы с 25% поробразователя и пластификатора. У группы с меньшим содержанием (20%) усадка меньше (~51–54%). На основе представленных в таблице 2 данных проведен сравнительный анализ влияния процентного содержания алюмосиликатных частиц на свойства образцов. Ключевыми характеристиками являются удельный вес (плотность) и усадка после спекания при 1100–1150 °С. В таблице 3 представлены средние данные по группам образцов.

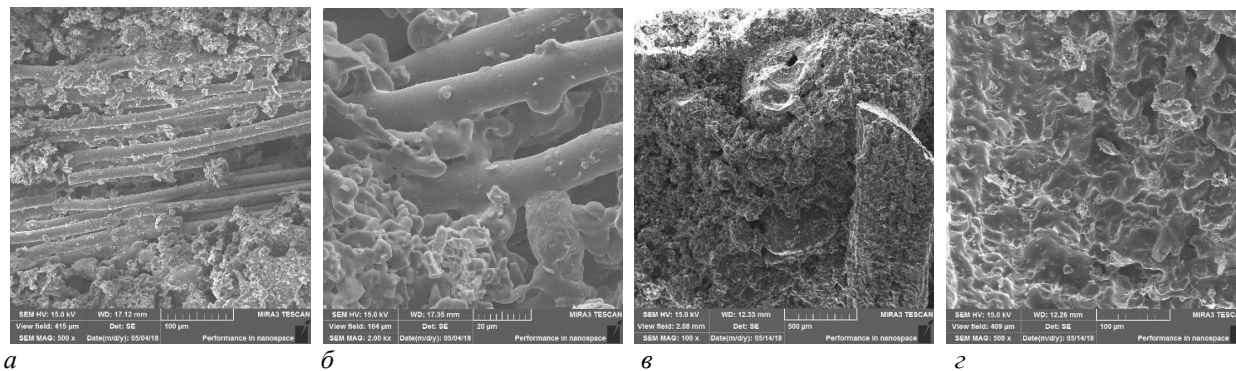
Таблица 2. – Средние значения усадки и удельного веса до и после спекания

№ образца	Порообразователь + пластификатор, %	Уд. вес, г/см ³		Усадка, %
		до	досле	
1	25	0,601	1,35	56,9
2	25	0,615	1,40	59,0
3	20	0,756	1,48	51,4
4	20	0,764	1,52	54,4
5	20	0,853	1,67	41,2
6	20	0,860	1,72	44,8

Таблица 3. – Средние данные по группам образцов

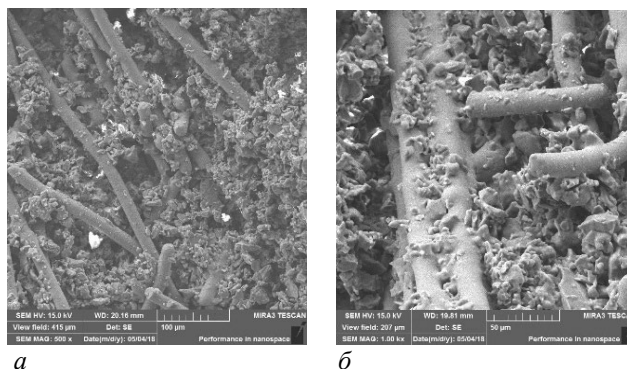
Группа	Содержание алюмооксидных частиц, %	Средняя плотность после спекания, г/см ³	Средняя усадка
Обр. 1, 2	15	1,37	0,58
Обр. 3, 4	30	1,50	0,53
Обр. 5, 6	40	1,69	0,42

На рисунках 8–10 представлены снимки структуры образцов с маркировками № 1 – № 6 (см. таблицу 1). В образцах присутствует кристаллическая и аморфная фазы. Аморфная фаза представляет собой частично расплавленное базальтовое волокно, которое служит связкой между алюмосиликатными частицами. Увеличение температуры спекания на 150 °С (с 1000 °С до 1150 °С) несколько увеличило количество расплавленных базальтовых волокон. Видно, что увеличение доли тугоплавких частиц с 15% до 40% снижает усадку с ~58% до ~42%. При 40% усадка минимальна, пористость сохраняется выше 50% (расчет: плотность после спекания 1,69 г/см³ при теоретической плотности ~2,5–2,7 г/см³ дает пористость ~35–37%, что несколько ниже заявленных 50%).



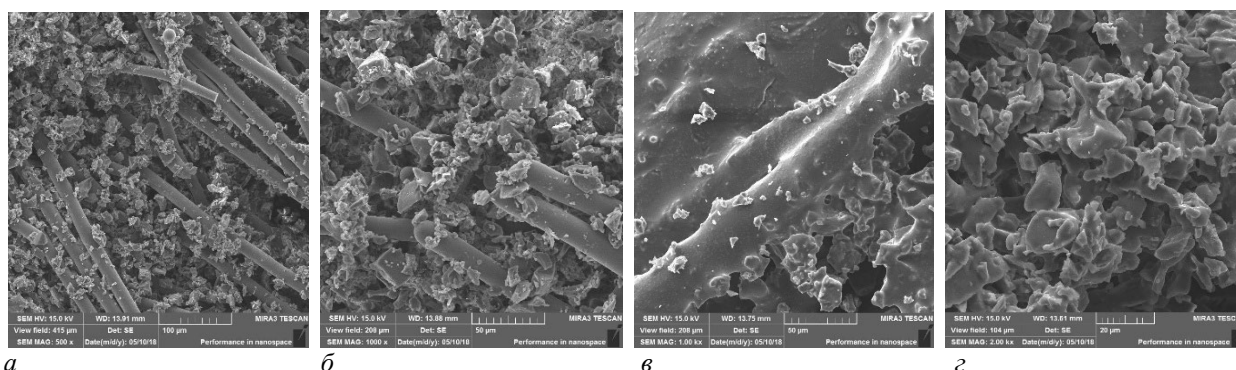
a – $\times 500$; *b* – $\times 2000$ – спекание 1000 °С; *v* – $\times 100$; *z* – $\times 500$ – спекание 1150 °С

Рисунок 8. – Морфология поверхности образцов № 1, 2



a – $\times 500$; *б* – $\times 1000$ – спекание 1000 °С;

Рисунок 9. – Морфология поверхности образца № 3



a – $\times 500$; *б* – $\times 1000$ – спекание 1000 °С; *в* – $\times 1000$; *z* – $\times 2000$ – спекание 1150 °С

Рисунок 10. – Морфология поверхности образцов № 4

В образцах, полученных спеканием при 1150 °С, доминирует аморфная фаза. Кристаллические частицы полностью «затянуты» аморфной составляющей, образуя единую сплошную матрицу. Благодаря этому количество связок (контактов) между частицами увеличилось. Как показало проведенное исследование, температура спекания оказывает существенное влияние на структуру материала.

В контексте решаемой задачи порог перколяции p_c соответствует минимальной объемной доле тугоплавких алюмосиликатных частиц, при которой в процессе спекания волокон формируется жесткий несжимаемый скелет. Ниже этого порога волокна стягиваются силами поверхностного натяжения жидкой фазы, и образец теряет форму и пористость. Выше порога – частицы упираются друг в друга, образуя пространственный каркас, фиксирующий геометрию пор. Условие задачи подразумевает, что размер алюмосиликатных частиц в 2–3 раза превышает диаметр волокна. В модели это отражается на топологии связей: частица взаимодействует с окружением как локальный «жесткий» узел, блокирующий усадку в соседних ячейках решетки. Несмотря на трехмерный характер реальных материалов, анализ двумерных сечений и модельных решеток позволяет получить качественную оценку наблюдаемых тенденций. Для осуществления количественного прогнозирования требуется масштабирование модели на объемную (3D) решетку с учетом реальной функции распределения частиц по размерам и координатных чисел. При этом фундаментальный принцип, продемонстрированный в данной работе, – существование критической концентрации структурообразующих центров – сохраняет свою справедливость.

Заключение. В рамках исследования решена задача моделирования условий ограничения усадки в пористых материалах на основе смесей алюмосиликатных частиц и базальтового волокна. В качестве адекватного инструмента для описания формирования жесткого каркаса обоснован перколяционный подход. Порог протекания интерпретируется как критическая минимальная концентрация тугоплавких частиц, при которой процесс усадки при спекании становится контролируемым. Для верификации модели разработана двумерная решеточная аппроксимация трехмерной системы. На малых решетках ключевое свойство процесса проявляется наглядно – при доле «открытых» узлов свыше 0,5 вероятность возникновения связанного кластера резко возрастает. Предсказания модели получили экспериментальное подтверждение. Установлена зависимость линейной усадки от объемного содержания алюмосиликатных частиц – увеличение их доли с 15% до 40% приводит к снижению усадки с 58% до 42%. Данные микроструктурного анализа (SEM) выявили формирование непрерывного кристаллического каркаса именно при 40%-ном содержании частиц, что полностью соответствует теоретическим предсказаниям. Вместе с тем установлено, что для сохранения пористости свыше 50% одного лишь формирования жесткого каркаса недостаточно. При достижении пороговой концентрации в 40%, останавливающей усадку, итоговая плотность спеченного образца достигает 1,69 г/см³, что соответствует конечной пористости около 35%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модифицирование поверхности высокопористых керамических материалов / В.Н. Анциферов, Е.В. Матыгуллина, С.Е. Порозова и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – № 8. – С. 2–4.
1. Влияние циклических термических нагрузок на структуру и свойства керамических материалов различного фазового состава / Р.Ю. Попов, Е.М. Дятлова, О.А. Сергиевич и др. // Стекло и керамика. – 2020. – № 4-5. – С. 14–21.
2. Исследование механизмов формирования жесткой системы микрофильтрационных транспортных пор при спекании базальтовых волокон / С.М. Азаров, Е.Е. Петюшик, И.В. Фомихина и др. / Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 2 кн. / редкол.: В.Г. Залесский (гл. ред.) и др. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2024. – Кн. 1: Материаловедение. – С. 6–13.
3. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. – М.: УРСС, 2002. – 112 с.
4. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. – London: Taylor & Francis, 1994. – 192 p.

Поступила 22.05.2026

MODELING OF CONDITIONS FOR MAINTAINING THE SPECIFIED POROSITY IN MATERIALS BASED ON MIXTURES OF ALUMINOSILICATE PARTICLES AND FIBERS

S. AZARAV, A. DROBYSH, A. YANETSKAYA, N. ASTAPCHIK
(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article presents the results of modeling the shrinkage of porous structures obtained by sintering refractory non-metallic materials. The problem of forming a rigid framework of transport pores in porous materials based on basalt fibers and fine-grained aluminosilicate particles is considered. The use of a percolation approach is proposed to estimate the minimum concentration of aluminosilicate particle centers that limit shrinkage. The percolation threshold is determined using a mathematical model based on the matrix representation of graph theory apparatus. It is shown that the application of discrete mathematical models allows predicting the structural stability of the framework while maintaining porosity of more than 50%.

Keywords: basalt fiber, porosity, percolation cluster, shrinkage, adjacency matrix, percolation threshold.

УДК 661.833

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-125-131

ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКАЛИЙФОСФАТА НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ

*канд. техн. наук, доц. В.И. ШАТИЛО**(Белорусский государственный технологический университет, Минск)**ORCID <https://orcid.org/0009-0007-0835-2800>**А.А. ХОЛОД**(ОАО «Гродно Азот»)*

Рассмотрен актуальный вопрос получения водорастворимого комплексного удобрения – монокалийфосфата. Изучен способ получения монокалийфосфата на основе экстракционной фосфорной кислоты и технического гидроксида калия. Установлено, что химическое осаждение в интервале pH, равном 4–5, позволяет осуществить очистку от соединений железа, алюминия и фтора. Различие характера распределения фтора между жидкой и твердой фазами в процессе нейтрализации кислоты гидроксидом калия зависит от природы фосфатного сырья, применяемого для получения экстракционной фосфорной кислоты, в частности от содержания диоксида кремния. При соотношении $Si:F$ в кислоте ниже 0,25 не весь фтор связывается в виде малорастворимого гексафторосиликата калия и достичь высокой степени очистки раствора от этой примеси невозможно. Степень осаждения сульфатов, соединений кальция и магния не превышает 25–26% независимо от вида фосфатного сырья. Водорастворимые формы этих соединений в процессе дальнейшей кристаллизации монокалийфосфата из очищенного раствора частично переходят в продукт. Предложен способ повышения его качества путем перекристаллизации. На основании экспериментальных данных сделан вывод о возможности получения водорастворимого удобрения (монокалийфосфата), содержащего 51,3–51,5 масс.% P_2O_5 , 33,5–34,5 масс.% K_2O , не более 0,1% не растворимых в воде веществ.

Ключевые слова: водорастворимое удобрение, дигидрофосфат калия, гидроксид калия, экстракционная фосфорная кислота, нейтрализация, технология, монокалийфосфат, примеси.

Введение. Рынок водорастворимых удобрений считается одним из наиболее динамично развивающихся сегментов рынка удобрений в мире. Его развитие напрямую связано с переходом сельского хозяйства на интенсивные технологии. Водорастворимые удобрения стали ключевым элементом современных агротехнологий благодаря универсальности: они идеально подходят для капельного полива (как в открытом, так и в защищенном грунте), малообъемной гидропонике и некорневых подкормок.

Согласно данным компании Fundamental Business Insights¹, рынок водорастворимых удобрений был оценен в 2,2 млрд долл. США в 2024 г., а среднегодовой темп роста, по их прогнозам, составит 1,7% с 2025 по 2034 гг.

Высокий уровень цен на водорастворимые удобрения имеет объективную основу, обусловленную технологической сложностью их производства и дороговизной используемых сырья и реагентов. Так, например, промышленные способы производства монокалийфосфата основаны на использовании в качестве исходного калийного реагента поташа (карбонат калия), а в качестве фосфатного – термической фосфорной кислоты.

Организация производства водорастворимых удобрений в Республике Беларусь возможна только в случае использования дешевых и доступных фосфор- и калийсодержащих технических продуктов, производимых в стране. В настоящее время на предприятии ООО «Компания БКМ» (Беларусь) уже успешно реализовано производство водорастворимого удобрения – нитрата калия – конверсионным методом на основе хлористого калия, выпускаемого на ОАО «Беларуськалий», и раствора нитрата аммония, производимого на ОАО «Гродно Азот». Имеются все предпосылки и для разработки технологии получения монокалийфосфата – на предприятии ОАО «Беларуськалий» имеется крупнотоннажное производство гидроксида калия (как кристаллического, так и в виде растворов), а в ОАО «Гомельский химический завод» – действующее производство экстракционной фосфорной кислоты. Вся производимая экстракционная фосфорная кислота идет на получение комплексных удобрений. В связи с этим одним из наиболее актуальных и перспективных направлений дальнейшего совершенствования производства комплексных удобрений является организация производства водорастворимых продуктов.

Основная цель исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, – изучение процесса и разработка принципиальной схемы получения монокалийфосфата на основе технических продуктов – экстракционной фосфорной кислоты и раствора гидроксида калия.

¹ URL: <https://www.fundamentalbusinessinsights.com/>

Основная часть. В зависимости от требований к качеству конечного продукта (содержание основного вещества – дигидрофосфата калия) водорастворимый монокалийфосфат (МКФ) может производиться из экстракционной фосфорной кислоты путем нейтрализации раствором щелочи (путем химического осаждения примесей, входящих в состав кислоты), а также из предварительно очищенной экстракционной фосфорной кислоты. Производство очищенной кислоты в республике отсутствует, но на предприятии ОАО «Гомельский химический завод» осуществляется концентрирование кислоты путем ее упаривания до концентрации 48–52 масс.% P_2O_5 , при этом содержание фторид-ионов снижается на 60–70%.

При проведении исследований использовались образцы упаренной экстракционной фосфорной кислоты (УЭФК), производимой на предприятии из фосфоритов Марокко и кировского апатитового концентрата.

Химический состав образцов УЭФК, полученных из этих видов фосфатного сырья, представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав образцов УЭФК

Вид фосфатного сырья	Содержание, масс.%									
	P_2O_5	CaO	MgO	SO_4^{2-}	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	F ⁻
Апатитовый концентрат	49,43	0,60	0,03	4,65	0,168	0,108	0,137	0,745	1,340	0,268
Фосфорит	52,70	1,40	0,826	3,33	0,049	0,019	0,085	0,665	0,173	0,263

Отмечается более высокое содержание в кислоте, полученной из апатитового концентрата, таких компонентов-примесей, как диоксид кремния, соединения алюминия (в пересчете на Al_2O_3), соединения натрия и калия (в пересчете на Na_2O и K_2O), в то время как в кислоте, полученной из фосфорита, более высокое содержание соединений магния и кальция (в пересчете на MgO и CaO соответственно). Это связано с различным минералогическим составом фосфатного сырья. Основные фосфорсодержащие фазы кировского апатита – фторапатит, гидроксиапатит (фторгидроксиапатит); фазы примесей – нефелин, эгирин, оксид кремния, фосфат алюминия, полевые шпаты, сфен. В марокканском фосфорите фторапатит, карбонатапатит (фторгидроксиапатит) и кварц являются основными минералами, а примеси представлены гипсом, кальцитом, доломитом, флюоритом и силикатами кальция [1].

В качестве нейтрализующего агента применялся раствор гидроксида калия марка А (ТУ ВУ 600122610.001-2015) с массовой долей гидроксидов (KOH, NaOH) в пересчете на KOH, не менее 54,0 масс.%. Содержание NaOH не более 1,0 масс.%.

При нейтрализации термической (реактивной) фосфорной кислоты продуктами реакций являются только фосфаты калия. Нейтрализация экстракционной фосфорной кислоты, содержащей различные примеси (см. таблицу 1), приводит к образованию сложных многокомпонентных солевых систем. Состав образующихся соединений зависит от состава исходных кислот и степени их нейтрализации, которая выражается мольным отношением $K_2O:P_2O_5$ или значением pH.

Исследование процесса нейтрализации УЭФК раствором гидроксида калия проводили в термостатируемом химическом реакторе с перемешивающим устройством. Экстракционная фосфорная кислота непрерывно дозировалась в раствор щелочи. Величина pH в ходе процесса (с точностью $\pm 0,05$) контролировалась с помощью pH-метра HANNA HI 221. Нейтрализацию проводили до pH = 4,5, т.к. именно в диапазоне pH = 4–5, согласно литературным данным [2; 3], можно практически полностью перевести примеси в нерастворимый осадок, после отделения которого получить чистые растворы фосфатов. Суспензия после окончания нейтрализации выдерживалась при температуре 70–80 °C в течение 60–70 мин. Выдержка проводилась, чтобы комплексные фторфосфаты железа и алюминия, образующие устойчивые пересыщенные растворы, находящиеся в метастабильном состоянии, перешли в более стабильное состояние, что сопровождается выделением дополнительного количества твердой фазы. При совместном присутствии в кислоте фосфатов железа и алюминия фосфат алюминия практически осаждается полностью за 1 ч при pH 4,2–5,0 [4].

Применение концентрированных растворов кислоты и щелочи приводит к получению сильнопересыщенных растворов дигидрофосфата калия (концентрация соли составит 68–71 масс.%), и при химическом осаждении нерастворимых примесей вязкость образующейся суспензии возрастает (вплоть до загустения) за счет быстротекущей массовой кристаллизации дигидрофосфата калия. С целью исключения сокристаллизации дигидрофосфата калия с выпадающими в осадок примесями, присутствующими в УЭФК, необходимо либо проводить горячее фильтрование суспензии, либо использовать разбавленные растворы гидроксида калия, а полученные растворы упаривать.

В представленной работе нейтрализация проводилась с получением насыщенного при температуре 30 °C раствора (содержание дигидрофосфата калия – 21,0–22,0 масс.%). После завершения процесса осадок отделялся от раствора фильтрацией суспензии. Полученный очищенный раствор упаривался при медленном нагревании до концентрации дигидрофосфата калия 40–41 масс.% (насыщенный при 80 °C). Кристаллизация проводилась политермическим методом при охлаждении упаренного раствора при непрерывном перемешивании до 20 °C (концентрация дигидрофосфата калия 18–19 масс.%). Пересыщение составило 21–23%. После завер-

шения кристаллизации при достижении указанной температуры выпавшие кристаллы отделялись от насыщенного маточного раствора фильтрованием. Влажные кристаллы подвергались сушке до постоянной массы при 90–95 °С.

Для проведения количественных и качественных анализов образцы целевого и побочного продуктов, а также насыщенных растворов фосфатов калия, получаемых на стадиях нейтрализации и кристаллизации, анализировались на содержание соответствующих компонентов с использованием стандартных методов² [5–7].

Идентификация полученного кристаллического продукта (монокалийфосфата) проводилась рентгенографическим методом с использованием рентгеновского дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker (Германия). При расшифровке рентгенограмм применяли базу данных JCPDS International Centre for Diffraction Data 2003.

При выполнении исследования критерием эффективности процесса очистки раствора (химического осаждения примесей) являлась степень перехода компонентов из УЭФК в осадок. Содержание компонентов в осадке и растворе, полученных нейтрализацией экстракционной фосфорной кислоты водным раствором гидроксида калия до pH = 4,5, а также степень перехода компонентов в осадок представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. – Распределение соединений фосфора (в пересчете на P₂O₅) и калия (в пересчете на K₂O) при нейтрализации УЭФК раствором гидроксида калия

УЭФК, полученная на основе	Осадок					Раствор	
	P ₂ O ₅ общ.	P ₂ O ₅ усв.	P ₂ O ₅ вод.	K ₂ O общ.	K ₂ O вод.	P ₂ O ₅	K ₂ O
апатитового концентрата	Содержание, масс. %						
	33,01	32,82	23,47	18,21	11,0	10,12	6,99
	Степень перехода в осадок, %					МО	
	14,51	14,42	10,31	10,59	6,39	1,043:1,0	
фосфорита	Содержание, масс. %						
	37,86	35,94	27,87	15,64	9,46	10,83	7,50
	Степень перехода в осадок, %					МО	
	11,70	11,01	9,20	7,01	4,23	1,046:1,0	

Примечание: МО – мольное отношение K₂O:P₂O₅.

Сравнительный анализ (см. таблицу 2) показал, что степень извлечения соединений фосфора и калия в осадок при нейтрализации кислоты из апатитового концентрата превышает аналогичный показатель для кислоты из фосфорита, тогда как разница в содержании водорастворимых форм составляет 1–2%. Такое распределение соединений связано с более высоким содержанием железа и алюминия в составе УЭФК, полученной на основе апатитового концентрата (см. таблицу 1), что ведет к увеличению доли фосфора, связанного в нерастворимые в воде, но усвояемые растениями фторфосфатные комплексные соединения. Основная часть водорастворимых соединений фосфора в осадках (от 71 до 74% от общего содержания) представляет собой растворы, аналогичные по составу маточному раствору. Высокое содержание жидкой фазы (остаточная влажность осадков составила 55–65 масс.%) обусловлено образованием в системе гелеобразной суспензии, состоящей из фосфат-фторидов железа и алюминия, которые имеют аморфную структуру и обладают высокой удерживающей способностью.

Степень извлечения соединений фосфора в раствор при нейтрализации фосфорных кислот достигает 85–88%. Как видно из представленных данных (см. таблицу 2), содержание фосфора в растворе составляет 10–11 масс.% в пересчете на P₂O₅, что близко к его содержанию в насыщенных растворах дигидрофосфата калия при 25 °С (10,52 масс.% P₂O₅). Мольное соотношение K₂O:P₂O₅ в фильтрах после нейтрализации УЭФК равно 1,043–1,046, что свидетельствует о присутствии основной части фосфора в виде дигидрофосфата калия и, незначительно, в виде гидрофосфата.

Основная цель стадии нейтрализации фосфорных кислот раствором гидроксида калия – получение чистых растворов фосфатов калия, не содержащих примесей, поэтому важным этапом исследований явилось изучение распределения соединений полуторных металлов, фтора и сульфатов в процессе нейтрализации (таблица 3).

Химический анализ осадков, отделяемых после стадии нейтрализации, а также данные источников [2–4] позволяют сделать вывод, что их состав представлен следующими основными соединениями: комплексными фосфат-фторидами полуторных металлов (Al,Fe)K(HPO₄)₂·0,5H₂O; (Al,Fe)KHPO₄F₂, а также CaHPO₄, CaSO₄,

² Удобрения минеральные. Методы анализа: ГОСТ 20851.2–75. – М.: Гос. ком. СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1983. – 71 с.

K_2SiF_6 . При нейтрализации магнийсодержащей кислоты (полученной на основе фосфорита) образуются также комплексы $Mg(Al,Fe)K_2(HPO_4)_2F_3$, фторид-фосфат магния $MgKHFPO_4$, $MgKPO_4 \cdot H_2O$. Все фосфаты, образующиеся в диапазоне pH = 4–5, являются цитратно- и лимоннорастворимыми (усвояемыми).

Анализ характера распределения примесей полуторных металлов и фтора между осадком и фильтратом показывает, что они практически полностью переходят в состав твердой фазы (таблица 3). Отсутствие соединений железа и алюминия в растворе фосфата калия подтверждается качественными реакциями, а остаточное содержание фтора не превышает 0,01 масс. %.

Таблица 3. – Содержание компонентов-примесей в продуктах нейтрализации УЭФК раствором гидроксида калия

Компоненты	УЭФК, полученная на основе					
	апатитового концентрата			фосфорита		
	Содержание, масс. %		Степень перехода в осадок, %	Содержание, масс. %		Степень перехода в осадок, %
	осадок	раствор		осадок	раствор	
CaO	0,188	0,03	22,16	1,84	0,334	21,12
MgO	0,024	0,005	23,00	2,28	0,226	25,91
Fe ₂ O ₃	4,56	*отс.	99,99	5,19	*отс.	99,99
Al ₂ O ₃	1,68	*отс.	99,99	1,36	*отс.	99,99
SO ₄ ²⁻	2,90	0,82	16,32	3,63	0,66	17,50
F ⁻	0,61	0,01	98,85	1,306	0,009	78,57

Примечание: * по результатам качественного анализа на ион железа(III) с роданид-ионом; на ион алюминия – с ализарином (чувствительность – 4 мкг/мл).

При pH < 3 преобладающими соединениями фтора в растворах являются H_2SiF_6 и HF, а при pH = 4–5, концентрация фтора в жидкой фазе снижается за счет образования малорастворимых фторсодержащих комплексных соединений и гексафторосиликата калия. Степень перехода фтора в осадок для двух кислот различается. При нейтрализации УЭФК, полученной из апатитового концентрата, этот показатель составил 98,85%, из фосфорита – 78,57%. Согласно данным химического анализа (см. таблицу 1), различия в содержании фтора в фосфорных кислотах незначительны, но содержание SiO_2 в УЭФК, полученной на основе апатитового концентрата, выше в 1,5 раза, что приводит к существенному изменению характера распределения фтора между фазами.

Массовое отношение Si:F в гексафторосиликат-ионе (SiF_6^{2-}) составляет 0,2456, в кислоте из апатитового концентрата – 0,2385; в кислоте из фосфорита – 0,1508. Недостаток кремния приводит к дебалансу соотношения Si:F в суспензии, полученной в результате нейтрализации УЭФК из фосфорита, следовательно, не весь фтор переходит в состав гексафторосиликата калия – часть остается в растворе в виде растворимого фторида калия.

Степень перехода в осадок сульфат-ионов соединений кальция и магния имеет близкие значения при использовании обеих кислот и не превышает 26 масс. %. Основная часть соединений кальция и магния остается в растворе и представлена растворимыми солями (дигидрофосфатами), а часть переходит в осадок в виде малорастворимых гидрофосфатов и сульфата кальция. При этом большая часть сульфат-ионов (сульфаты калия и магния) остаются в составе жидкой фазы.

Полученные результаты позволяют сделать заключение, что основная часть примесей, содержащихся в экстракционных фосфорных кислотах и оказывающих негативное влияние на качество водорастворимых удобрений, может быть удалена путем химического осаждения при нейтрализации.

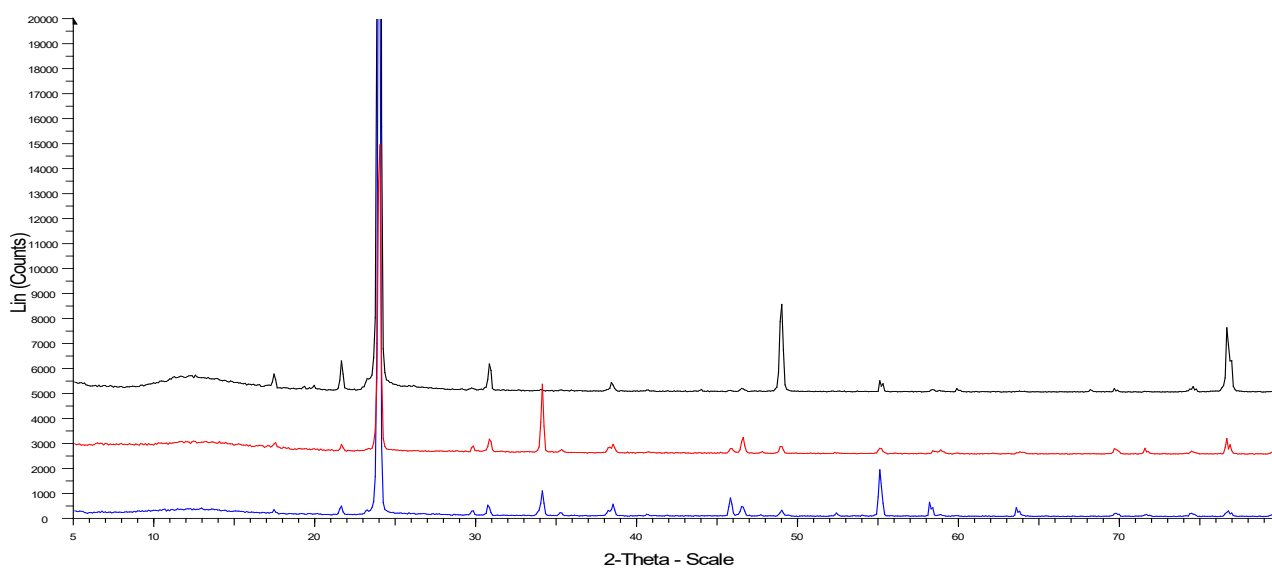
Кристаллизация монокалийфосфата из очищенного раствора осуществлялась политермическим методом, охлаждением при непрерывном перемешивании упаренного раствора до 20 °С. Содержание компонентов в кристаллических осадках и маточных растворах представлено в таблице 4.

Таблица 4. – Распределение основных и примесных компонентов при кристаллизации монокалийфосфата

Компоненты	УЭФК, полученная на основе			
	апатитового концентрата		фосфорита	
	Осадок МКФ	Маточный раствор	Осадок МКФ	Маточный раствор
	Содержание, масс. %			
P ₂ O ₅	51,53	10,05	51,30	13,05
K ₂ O	34,40	8,23	33,48	9,93
CaO	0,013	0,03	1,98	0,25
MgO	–	–	0,47	0,53
SO ₄ ²⁻	0,73	2,35	2,33	1,16
F ⁻	0,001	0,026	0,045	0,01
влага	9,22	–	12,35	–
н.о.	0,036	–	0,064	–

Содержание фторид-иона в монокалийфосфате, полученном на основе УЭФК из фосфорита, составило 0,045 масс.%, а остаточное содержание фторид-иона в продукте, полученном из УЭФК (апатитовый концентрат), равное 0,001 масс.%, находится в пределах погрешности аналитического метода определения фтора. Содержание нерастворимого в воде остатка (н.о.) в обоих продуктах удовлетворяет требованиям, предъявляемым к водорастворимым удобрениям (не более 0,1 масс.%). Присутствие сульфат-иона (до 2,5 масс.%) в конечном продукте может быть обусловлено тем, что происходит сокристаллизация сульфата и дигидрофосфата калия. В монокалийфосфате, полученном на основе кислоты из фосфорита, может присутствовать незначительное количество дигидрофосфата кальция (содержание СаО около 2 масс.%). Но при получении удобрений это не критично, т.к. образующиеся при кристаллизации сульфат калия и дигидрофосфат кальция являются водорастворимыми соединениями, в т.ч. применяются и в качестве водорастворимых удобрений (сульфат калия), а их присутствие не снижает агрономическую ценность основного продукта.

Выполненный рентгенофазовый анализ не позволил идентифицировать примесные фазы (ввиду их незначительного количества). Для сравнения на рисунке 1 приводятся рентгенограммы кристаллических продуктов, полученных из упаренных экстракционных фосфорных кислот, а также из термической фосфорной кислоты.



* – Potassium Hydrogen Phosphate (KH₂PO₄)

Рисунок 1. – Рентгенограммы кристаллического монокалийфосфата, полученного на основе УЭФК из фосфорита (1); апатитового концентрата (2); на основе термической фосфорной кислоты (3)

На рисунке 2 представлена принципиальная схема получения монокалийфосфата на основе УЭФК и раствора гидроксида калия.

Процесс получения водорастворимого МКФ включает нейтрализацию упаренной экстракционной фосфорной кислоты раствором гидроксида калия необходимой концентрации в трубчатом или емкостном реакторе до достижения требуемого мольного соотношения K₂O:P₂O₅. Далее фосфорнокислая суспензия проходит выдержку и последующую фильтрацию (в пресс-фильтре) с целью максимального выделения осаждаемых примесей. Фильтрат направляется на упаривание и последующую кристаллизацию в вакуум-кристаллизатор. Кристаллический продукт отделяется в центрифуге. Влажные кристаллы МКФ подвергаются сушке в сушильном барабане или аппарате кипящего слоя, охлаждаются, после чего отправляются на фасовку. Маточный раствор после кристаллизации (фугат), представляющий собой насыщенный при 20 °С раствор дигидрофосфата калия, используется для репульпирования фторфосфатного осадка, отделенного на пресс-фильтре, с последующим выводом в цикл производства гранулированных NPK удобрений. Такой подход обеспечит эффективное использование ресурсов и минимизацию отходов в процессе производства.

Вопрос повышения качества монокалийфосфата может быть решен посредством осуществления дополнительной очистки путем перекристаллизации. Технология должна быть дополнена стадиями растворения кристаллов с последующей фильтрацией, концентрирования выпариванием и вторичной кристаллизации. Это позволит получить высокочистый МКФ, в т.ч. кормового и технического качества. Важным аспектом в этом случае является исключение влияния вариативности состава экстракционной фосфорной кислоты, который зависит от качества применяемого для переработки фосфатного сырья.

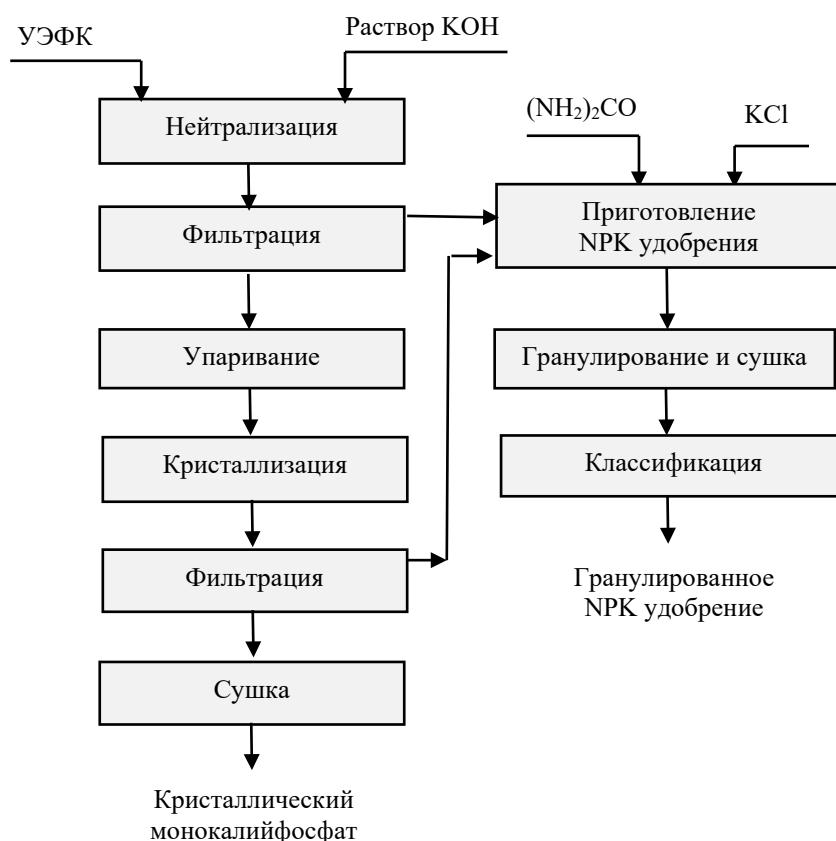


Рисунок 2. – Принципиальная схема получения монокалийфосфата на основе УЭФК и раствора гидроксида калия

Заключение. Результаты проведенного исследования указывают на возможность получения монокалийфосфата на основе технических продуктов – экстракционной фосфорной кислоты и раствора гидроксида калия. Полученный МКФ содержит 51,3–51,5 масс.% P_2O_5 , 33,5–34,5 масс.% K_2O , менее 0,1 масс.% н.о. и подходит для использования в качестве водорастворимого удобрения, при этом дальнейшая очистка перекристаллизацией позволит получить более чистый продукт.

Предложенная принципиальная схема получения МКФ может быть реализована на действующих предприятиях Республики Беларусь – ОАО «Гомельский химический завод» или ОАО «Беларуськалий». Наличие в стране собственного производства экстракционной фосфорной кислоты и гидроксида калия создает определенные преимущества для организации промышленного производства монокалийфосфата: позволит обеспечить потребности отечественных сельхозпроизводителей в водорастворимом РК-удобрении, способствуя развитию аграрного сектора (удовлетворение внутреннего спроса); страна может стать экспортером МКФ, поставляя его на международные рынки (экспортный потенциал); производства кислоты и щелочи – крупнотоннажные, что позволяет достичь более низкой себестоимости МКФ по сравнению с закупаемым на внешних рынках, а это, в свою очередь, формирует более выгодные ценовые предложения на конечный продукт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дормешкин О.Б., Гаврилюк А.Н., Черчес Г.Х. Влияние видов фосфатного сырья на технологический процесс производства экстракционной фосфорной кислоты и комплексных удобрений // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2013. – № 3. – С. 71–77.
2. Кармышов В.Ф. Химическая переработка фосфоритов. – М.: Химия, 1983. – 304 с.
3. Кононов А.В., Стерлин В.Н., Евдокимова Л.И. Основы технологии комплексных удобрений. – М.: Химия, 1988. – 320 с.
4. Копылев П.Н., Попова И.А., Варшавский Я.М. Исследование выделения фосфатов железа и алюминия из фосфорнокислых растворов // Журнал прикладной химии. – 1985. – Т. 58, № 4. – С. 823–828.
5. Крешков А.П. Основы аналитической химии. – М.: Госхимиздат, 1961. – 635 с.
6. Винник М.М., Ербанова Л.И., Зайцев П.М. Методы анализа фосфатного сырья, фосфорных и комплексных удобрений, кормовых фосфатов. – М.: Химия, 1975. – 218 с.
7. Шарло Г. Методы аналитической химии. Качественный анализ неорганических соединений. – М.: Химия, 1965. – 976 с.

Поступила 22.05.2026

PRODUCTION OF MONOPOTASSIUM PHOSPHATE BASED ON TECHNICAL PRODUCTS

V. SHATSILO

(Belarusian State Technological University, Minsk)

A. KHOLAD

(JSC «Grodno Azot»)

The article discusses the current issue of obtaining a water-soluble complex fertilizer – monopotassium phosphate. A method for obtaining monopotassium phosphate based on wet-process phosphoric acid and technical potassium hydroxide has been studied. It has been established that chemical precipitation in the pH range of 4–5 allows purification from iron, aluminum, and fluorine compounds. The difference in the nature of fluorine distribution between the liquid and solid phases during the neutralization of acid with potassium hydroxide depends on the nature of the phosphate raw material used to obtain wet-process phosphoric acid, particularly on the content of silicon dioxide. When the Si:F ratio in the acid is below 0,25, not all fluorine is bound in the form of sparingly soluble potassium hexafluorosilicate, and it is impossible to achieve a high degree of purification of the solution from this impurity. The degree of precipitation of sulfates, calcium, and magnesium compounds does not exceed 25-26% regardless of the type of phosphate raw material. Water-soluble forms of these compounds partially pass into the product during further crystallization of monopotassium phosphate from the purified solution. A method for improving its quality by recrystallization is proposed. Based on experimental data, a conclusion is drawn about the possibility of obtaining a water-soluble fertilizer (monopotassium phosphate) containing 51,3–51,5% P_2O_5 , 33,5–34,5% K_2O , no more than 0,1% water-insoluble substances.

Keywords: water-soluble fertilizer, potassium dihydrogen phosphate, potassium hydroxide, wet-process phosphoric acid, neutralization, technology, monopotassium phosphate, impurities.

УДК 621.926.4

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-132-138

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ RDF-ТОПЛИВА

канд. техн. наук, доц. П.С. ГРЕБЕНЧУК

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Д.В. ДУШКЕВИЧ, Д.В. КОТОВИЧ

(ОАО «НПО Центр», Минск)

Рассмотрены проблемы утилизации полимерных коммунальных отходов в Республике Беларусь. Установлено, что в измельченном виде эти отходы могут быть использованы во многих отраслях промышленности. Предложен центробежно-ударный измельчитель для этих целей. Изложена методика расчета энергии разрушения полимерных материалов. Приведены результаты экспериментальных исследований, имевших целью определение применимости мельниц подобной конструкции к переработке полимерных отходов, а также выявление оптимальных режимов их работы. Проанализировано влияние влажности исходного материала и возникновения статического электричества на процесс измельчения. Проведена оценка производительности и удельного энергопотребления измельчителя при различных условиях. Сделаны выводы о возможности применения центробежно-ударного измельчителя с гибкими элементами для утилизации полимерных отходов и даны рекомендации по направлениям совершенствования этого процесса.

Ключевые слова: коммунальные отходы, топливо, полимеры, измельчитель, ротор, деформация, энергия, установка, продукт, фракция, наслаивание, производительность, энергопотребление.

Введение. Ежегодно в Республике Беларусь формируется 4,0–4,3 млн т твердых коммунальных отходов (ТКО). Обеспечено 100%-ное покрытие населения системой обращения с отходами, при этом более 85% населения имеют доступ к раздельному сбору. В 2024 г. заготовлено 840,2 тыс. т основных вторичных материальных ресурсов, включая отходы бумаги и картона, стекла, полимеров, изношенных шин, отработанных масел, а также электрического и электронного оборудования. В настоящее время внедряется производство RDF-топлива (Refuse-Derived Fuel), потребителями которого выступают цементные заводы (например, ОАО «Красносельскстройматериалы») и иные промышленные предприятия¹.

Разработка RDF-технологий представляет собой стратегический подход к утилизации полимерных отходов и обеспечению устойчивой энергетики. RDF получают из горючих компонентов ТКО: полимеров, целлюлозных материалов (бумага, картон), текстиля, резины, кожи и древесины. Применение RDF реализуется в цементных вращающихся печах (замена до 20–30% ископаемого топлива, как на заводе HeidelbergCement в Германии², на теплоэлектростанциях, в металлургических агрегатах, котельных установках и технологических процессах для генерации тепловой энергии и электроэнергии).

Продукты неполного сгорания полимеров (копоть, сажа) функционируют как полимерные пластификаторы в бетонных смесях, повышая прочность на сжатие до 80%. Так, исследования цементного завода «Курово» (Россия) показали рост прочности М400-бетона на 25–80% при добавке 5–10% RDF-золы³.

Несмотря на динамичное развитие переработки ТКО, физико-механические свойства полимеров определяют ключевые технологические ограничения. Макромолекулярная структура полимеров обеспечивает относительное удлинение 300–800%, что приводит к снижению эффективности механического измельчения (до 50–70% потерь энергии). В Беларуси на пилотной линии RDF-производства в Минске (проект НАН Беларуси, 2024) эта проблема решена комбинированным методом: криогенная обработка жидким азотом (–196 °С) с последующим роторным дроблением, повысившим выход фракции <10 мм до 92%⁴. Аналогично, в ЕС (завод ARCIS в Нидерландах) применяют двухстадийные шредеры с предварительным замораживанием, обеспечивая энергоэффективность на уровне 0,2–0,4 кВт·ч/кг⁵.

¹ Семенкова Т. Как в Беларуси работают над улучшением системы обращения с твердыми коммунальными отходами // SB.BY. – 2025. – 11 апр. – URL: <https://www.sb.by/articles/davayte-nachistotu-belarus-tko.html> (дата обращения: 12.02.2026).

² Alternative fuels RDF // A TEC Group. – URL: <https://www.atec-ltd.com/de/engineering/alternative-fuels-rdf.html> (дата обращения: 12.02.2026).

³ Рекомендации по применению в бетонах золы, шлака и золошлаковой смеси тепловых электростанций / НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1986. – 80 с.

⁴ Технология переработки полимерных отходов для получения композиционных материалов строительного назначения // Виртуальная выставка НАН Беларуси. – URL: <https://www.ictt.by/rus/exh/plan/view.php?proid=b749ac012d0fc82803c813dac8155e&lng=rus> (дата обращения: 12.02.2026).

⁵ Шредер RDF // ХусманнРус. – URL: <https://husmann.su/drobilki/shredery/shredery-rdf-husmann/> (дата обращения: 12.02.2026).

ОАО «НПО «Центр» давно и успешно занимается разработкой и исследованием центробежных агрегатов, в т.ч. центробежно-ударных дробилок и мельниц. Эти измельчители отличаются высокой эффективностью, в особенности для разрушения горнорудных материалов средней и малой прочности, а также сравнительно низкой удельной металло- и энергоемкостью⁶. В данной работе представлены результаты теоретических исследований нового варианта центробежного измельчителя с гибкими элементами.

Основная часть. В центробежно-ударном измельчителе рассматриваемой конструкции процесс измельчения исходного сырья осуществляется посредством соударения материала с гибким элементом, который закреплен на вращающемся роторе. Благодаря высокой скорости вращения гибкого элемента при столкновении с фрагментами исходного материала происходит нарушение связей между макромолекулами, что приводит к их последующему разрушению. Подобные устройства для измельчения известны и зарекомендовали себя как высокоэффективные при обработке широкого спектра материалов [7].

На рисунке 1 представлен ротор центробежно-ударного измельчителя с закрепленными на нем гибкими элементами. В процессе столкновения гибкого элемента с полимерными материалами происходит их разрушение, однако этот процесс отличается от общепринятого метода дробления, применяемого в горном производстве. При работе с полиэтиленом предполагается, что цепь тянет пленку до критического предела удлинения, при котором происходит разрыв материала. Полиэтилен представляет собой вязкопластичный полимер, способный к значительным пластическим деформациям, достигающим 300–800% удлинения перед разрушением.

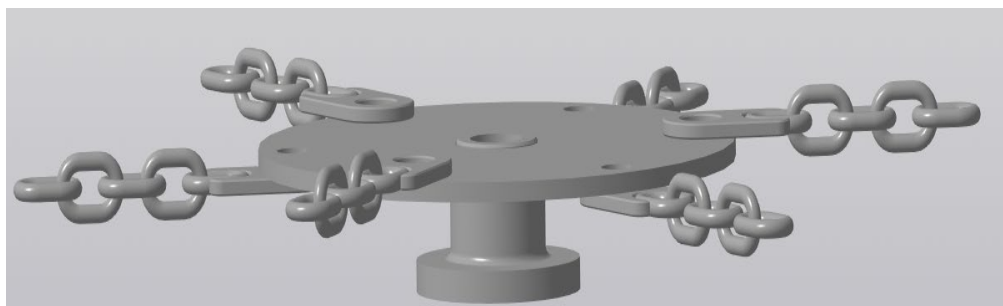


Рисунок 1. – Ротор центробежно-ударного измельчителя

Удельная деформация до разрыва материала определяется следующим образом:

$$W_{уд} = \int_0^{\epsilon_{крит}} \sigma(\epsilon) d\epsilon, \quad (1)$$

где $\sigma(\epsilon)$ – напряжение деформации материала;

$\epsilon_{крит}$ – критическое удлинение при разрыве.

К моделям, описывающим напряжение деформации материала, можно отнести двухстадийную модель, которая применяется для вязкопластичных материалов. Эта модель основана на двух этапах деформации: упругой и пластической. В таком случае формула для удельной деформации выглядит как

$$W_{уд} = W_{упр} + W_{пласт}. \quad (2)$$

где $W_{упр}$ – упругая деформация материала, Дж/м³;

$W_{пласт}$ – пластическая деформация материала, Дж/м³.

Упругая деформация происходит по следующему принципу: удлинение материала в результате удара не должно превышать относительное удлинение его текучести ($0 \leq \epsilon \leq \epsilon_y$).

$$W_{упр} = \frac{\sigma_{тек} \cdot \epsilon_y}{2} = \frac{\sigma_{тек}^2}{2 \cdot E}, \quad (3)$$

где $\sigma_{тек}$ – предел текучести, МПа;

$\epsilon_y = \sigma_{тек}/E$ – относительное удлинение при текучести;

E – модуль упругости, МПа.

⁶ Селективное измельчение материалов в центробежной мельнице многократного ударного нагружения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Гребенчук Павел Сергеевич; Белорус. гос. технол. ун-т (БГТУ). – Минск, 2011. – 23 с.

Механизм пластической деформации основан на принципе, согласно которому удлинение материала при ударе должно быть больше относительного удлинения текучести материала, но не превышать критического удлинения при разрыве ($\varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{крит}}$). В этом случае

$$W_{\text{пласт}} = \sigma \cdot (\varepsilon_{\text{крит}} - \varepsilon_y). \quad (4)$$

Далее сделаем допущение, что предел прочности будет представлять собой среднее арифметическое между пределом текучести $\sigma_{\text{тек}}$ и пределом прочности на разрыв $\sigma_{\text{раз}}$:

$$\sigma \approx \sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_{\text{тек}} + \sigma_{\text{раз}}}{2}. \quad (5)$$

Уравнение пластической деформации примет вид:

$$W_{\text{пласт}} = \frac{\sigma_{\text{тек}} + \sigma_{\text{раз}}}{2} \cdot (\varepsilon_{\text{крит}} - \varepsilon_y). \quad (6)$$

В результате формула для расчета удельной деформации материала до его разрыва:

$$W_{\text{уд}} = \frac{\sigma_{\text{тек}}^2}{2 \cdot E} + \frac{\sigma_{\text{тек}} + \sigma_{\text{раз}}}{2} \cdot (\varepsilon_{\text{крит}} - \varepsilon_y). \quad (7)$$

Энергия, необходимая для растяжения и последующего разрушения одного слоя пленки, определяется удельной деформацией материала и его объемом. Однако для вязкопластичных материалов, способных изменять свою форму под воздействием напряжений, ключевым параметром становится площадь контакта материала с гибким элементом центробежно-ударного измельчителя.

Формула для расчета энергии:

$$E_{\text{рас}} = W_{\text{уд}} \cdot a_{\text{пл}} \cdot b_{\text{пл}} \cdot h_{\text{пл}}, \quad (8)$$

где $a_{\text{пл}}$ – длина контакта материала с гибким элементом;
 $b_{\text{пл}}$ – ширина контакта материала с гибким элементом;
 $h_{\text{пл}}$ – толщина материала.

Полное уравнение для вычисления энергии, требуемой для разрушения единичного слоя материала при растяжении, может быть представлено как

$$E_{\text{рас}} = \frac{\sigma_{\text{тек}}^2}{2 \cdot E} + \frac{\sigma_{\text{тек}} + \sigma_{\text{раз}}}{2} \cdot (\varepsilon_{\text{крит}} - \varepsilon_y) \cdot a_{\text{пл}} \cdot b_{\text{пл}} \cdot h_{\text{пл}}. \quad (9)$$

Таким образом, методика расчета удельной деформации и энергии растяжения разрушения полимерной пленки, учитывающая вязкопластичные свойства полиэтилена, может быть применена для рациональной организации процесса измельчения подобных продуктов.

Цель экспериментального исследования – определение способности центробежно-ударной дробилки с гибкими элементами (цепями) к измельчению полимерных материалов, входящих в состав твердых коммунальных отходов и RDF-топлива.

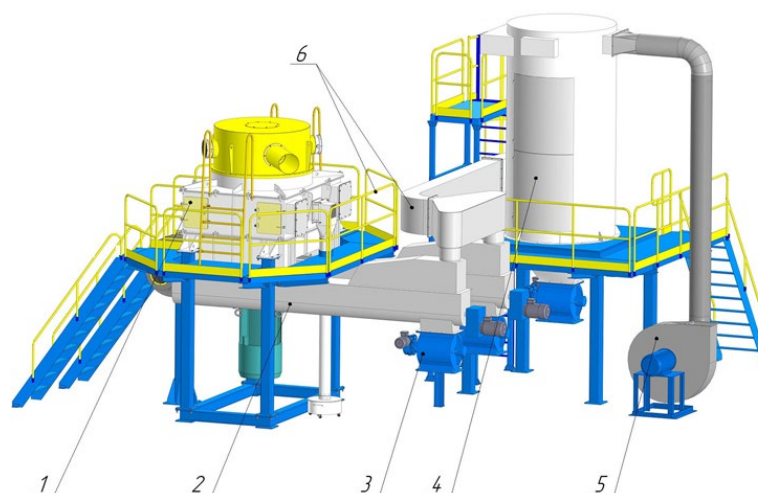
Основные задачи исследования:

- определение способности гибких цепных элементов к разрушению пластиковой тары и полиэтиленовой пленки;
- выявление оптимальных режимов работы оборудования при измельчении полимеров;
- определение влияния влажности и статического электричества на процесс измельчения;
- оценка производительности оборудования при различных условиях.

Финальные экспериментальные исследования проводились на промышленной установке центробежно-ударной дробилки с гибкими элементами, которая представлена на рисунке 2.

В экспериментах использовались следующие полимерные материалы:

- пластиковая тара: прозрачные пластиковые бутылки объемом 0,5–2 л из полиэтилентерефталата (ПЭТ);
- полиэтилен высокого давления (ПВДП): тонкая полимерная пленка (мешки, упаковка), толщина 0,1–0,2 мм, физико-механические свойства согласно ГОСТ 16337-77;
- полиэтилен низкого давления (ПНДП): полимерная пленка и листовой материал, толщина: 0,2–0,5 мм, физико-механические свойства согласно ГОСТ 16338-85.



1 – дробилка центробежная; 2 – конвейер винтовой; 3 – питатель шлюзовой; 4 – циклон-фильтр;
5 – вентилятор транспортный; 6 – воздуховоды

Рисунок 2. – Схема промышленной установки центробежно-ударной дробилки с гибкими элементами

Экспериментальное исследование было разделено на несколько этапов.

Этап 1: испытания на лабораторной установке. На этом этапе проводилась качественная оценка способности цепных элементов к разрушению полимеров. Материал загружался вручную в камеру дробления лабораторной установки с частотой вращения ротора 800 об/мин. Наблюдалось состояние материала в камере и фиксировалась возможность его полного разрушения на мелкие фрагменты.

Результаты лабораторных испытаний показали, что:

- цепные элементы успешно разрушают хрупкие материалы (ПЭТ-бутылки);
- цепные элементы способны разрушать полимерные пленки;
- существует проблема наслаивания пленки на цепные элементы, особенно во влажном состоянии.

Этап 2: испытания на промышленной установке центробежно-ударной дробилки с целью:

- выявления конструктивных недостатков оборудования;
- определения оптимальных режимов работы;
- оценки влияния геометрии рабочей камеры и влажности материала на эффективность измельчения.

Наблюдалось:

- неравномерное распределение материала в камере дробления;
- образование зон застоя материала в углах корпуса,

выявлена необходимость:

- оптимизации углов наклона питающих элементов;
- усовершенствования системы вентиляции.

Этап 3: оценка производительности и энергопотребления. На этом этапе проводились детальные испытания по определению производительности оборудования при различных режимах работы. Материал подавался в камеру дробления с максимальной производительностью, при этом фиксировались: фактическая производительность установки (т/ч); мощность, потребляемая главным двигателем; момент срабатывания защитной системы; качество готового продукта (размерное распределение фракций).

Приведем результаты исследований на промышленной установке. Эксперимент проводился на полимерном материале размером листов от 150 до 300 мм с толщиной от 30 до 200 мкм при скорости вращения ротора 800 об/мин.

В первом опыте оба регулируемых окна открыты на 80% по площади забора. При загрузке исходного материала измельченные фрагменты воздушными потоком транспортировались в бункер циклона, а неизмельченные – вращались широким кольцом с накоплением между регулируемыми окнами и перфорацией в камере измельчения (см. рисунок 2). Рабочий ток главного двигателя доходил до 230 А (номинальный – 442 А).

Во втором опыте оба регулируемых окна открыты на 10% по площади забора. Существенных изменений в движении материала внутри мельницы не возникло.

На основании проведенных испытаний сделан вывод, что необходима доработка конструкции дробилки, исключающая накопление материала в виде кольца выше зоны измельчения и направляющая весь материал в зону измельчения.

Эксперимент по оценке производительности проводился на полимерном материале тех же размеров.

Результатом испытаний промышленного образца на полиэтилене высокого давления стало получение готового продукта размером от 2 до 30 мм с ярко выраженным рваным следом. На рисунке 3 представлен материал до и после измельчения.



а – материал до измельчения; *б* – материал после измельчения

Рисунок 3. – Результаты исследований по измельчению полиэтилена высокого давления

После измельчения полиэтилена низкого давления был получен готовый продукт со средним размером 20 мм. На рисунке 4 представлен отбор проб материала до и после измельчения.



а – материал до измельчения; *б* – материал после измельчения

Рисунок 4. – Результаты исследований по измельчению полиэтилена низкого давления

Максимальная достигнутая производительность при измельчении полиэтилена составила 1900 кг/ч. При попытке увеличения производительности выше этого значения происходило срабатывание защитного автомата главного электродвигателя, что говорит о перегрузке установки. Данный результат может быть объяснен следующими факторами:

- насаиванием материала. При производительности, превышающей 1,9 т/ч, на элементы цепи поступает количество материала, которое приводит к его интенсивному насаиванию. Как было выяснено ранее, средневзвешенное количество таких слоев может достигать 3–8 в зависимости от скорости звена цепи;
- влиянием влажности. Материал брался максимально приближенным к реальным условиям, таким образом, он имел высокую влажность был не однородным и загрязненным;
- влиянием статического электричества. Полимерные материалы являются хорошими диэлектриками, поэтому при трении слоев друг о друга происходит накопление электрического заряда. Это приводит к электростатическому притяжению между слоями материала, что способствует их слипанию. Данный эффект слабо проявился на исходном материале, однако на измельченном продукте его влияние оказалось значительно сильнее. Это существенно ухудшило выгрузку из циклона: из-за статического электричества материал налипал на стенки циклона и забивал выходной патрубок шлюзового питателя.

Удельное энергопотребление при измельчении полиэтилена достигало 39–42,1 кВт·ч/т. Это значение было получено при расчете отношения средней мощности, потребляемой главным двигателем, к производительности установки. Теоретические расчеты, проведенные ранее, дали следующий результат:

- теоретическое энергопотребление для полиэтилена высокого давления: 15,81 кВт·ч/т;
- теоретическое энергопотребление для полиэтилена низкого давления: 38,16 кВт·ч/т.

Одной из ключевых проблем, выявленных в ходе экспериментов, явилось интенсивное наслаивание полимерной пленки на элементы цепи. Это явление имеет сложную физическую природу, которая объясняется следующими механизмами:

- механизмом статического электричества. При движении полимерной пленки в цепи и трении об элементы цепи происходит генерация статического электрического заряда. Поскольку полимеры являются диэлектриками, электроны, переданные от одного слоя к другому, не могут свободно перемещаться. В результате образуется электрическое поле между слоями, которое создает притягивающую силу, удерживающую слои вместе. Экспериментально наблюдалось, что при высокой скорости вращения (800 об/мин) интенсивность наслаивания была выше, чем при пониженных скоростях;

- механизмом поверхностного натяжения влаги. Капля воды имеет высокое поверхностное натяжение ($\sigma \approx 72$ мН/м при 20 °С), что позволяет ей действовать как адгезивный мостик между слоями. Даже при относительной влажности воздуха 50–60%, на поверхности полимерной пленки могут образовываться микроскопические капли конденсированной влаги. При наличии таких капель между двумя слоями полимера формируется менискообразная граница, которая создает капиллярное давление. Для тонких слоев полимера (0,1–0,2 мм) даже незначительное количество влаги (несколько микрограмм) может вызвать достаточное капиллярное давление, чтобы удерживать слои вместе;

- комбинированным воздействием. В реальных условиях оба механизма действуют одновременно, создавая синергетический эффект. Это объясняет, почему наслаивание особенно интенсивно в условиях:

- высокой влажности воздуха;
- низкой температуры (конденсация влаги);
- загрязненности материала;
- длительного хранения материала перед дроблением.

Интерпретация результатов экспериментальных исследований:

1. Пластиковые бутылки (ПЭТ) показывают наилучшие результаты благодаря хрупкому характеру материала при комнатной температуре. Хрупкие материалы разрушаются с меньшими энергетическими затратами, отсутствует проблема наслаивания;

2. В условиях реального производства сложно выделить из смешанного исходного материала полиэтилен высокого и полиэтилен низкого давления. Поэтому полученные экспериментальные результаты рекомендуется приравнять к полиэтилену низкого давления, т.к. полученные для него значения энергопотребления, во-первых, выше, во-вторых, ближе к расчетным, что указывает на адекватность разработанной математической модели. Различие между теоретическим и практическим значениями (на 2–10%) объясняется следующими факторами:

- потерями в механизме передачи. Не вся электроэнергия тратится непосредственно на разрушение материала. Часть энергии теряется на трение в подшипниках, вращение пустого ротора, преодоление аэродинамического сопротивления;

- вариативностью материала. Исходный материал (ТКО для RDF-производства) имеет разнородный состав. Наличие примесей склеивающих коагулянтов более твердых материалов требует дополнительных энергетических затрат;

- неполная загрузка во время переходных процессов. Во время экспериментов система регулирования производительности питателя не была идеально отстроена, поэтому периодически происходили колебания массового расхода материала.

Заключение. На основании проведенных исследований можно сделать следующие ключевые выводы:

1. Подтверждение концепции. Центробежно-ударная дробилка с гибкими цепными элементами способна эффективно измельчать полимерные материалы, входящие в состав RDF-топлива и твердых коммунальных отходов.

2. Практическая производительность. При оптимизации условий (осушение материала, контроль влажности) установка способна достичь производительности 1,9–2,2 т/ч.

3. Энергоэффективность. Удельное энергопотребление 39–42,1 кВт·ч/т для полиэтилена согласуется с теоретическими расчетами и находится в приемлемом диапазоне для процессов измельчения вязкопластичных материалов.

4. Проблемы и решения. Основной проблемой является наслаивание материала на элементы цепи, вызываемое влажностью и статическим электричеством. Эта проблема может быть решена:

- предварительной сушкой исходного материала;
- применением антистатических покрытий.

5. Универсальность оборудования. Оборудование успешно справляется с разнородным материалом (смесь пластика, бумаги, картона, полиэтилена), что подтверждает его пригодность для применения в производстве RDF-топлива из твердых коммунальных отходов.

6. Перспективы развития. Результаты экспериментов показывают, что при проведении надлежащей подготовки материала (сортировка по типам полимеров, осушение) производительность может быть увеличена без превышения допустимых энергетических затрат.

Проведенные экспериментальные исследования на лабораторном и промышленном образцах центробежно-ударной дробилки с гибкими элементами подтвердили эффективность данного метода для измельчения полимерных материалов в составе твердых коммунальных отходов. Максимальная достигнутая производительность составила 1900 кг/ч при удельном энергопотреблении 39–42,1 кВт·ч/т, что соответствует теоретическим прогнозам. Выявленная проблема насаивания материала связана с влажностью и статическим электричеством и может быть решена через модификацию конструкции и оптимизацию технологических параметров. Исследование подтвердило пригодность центробежно-ударных дробилок для применения в производстве RDF-топлива из твердых коммунальных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Душкевич Д.В., Гребенчук П.С. Исследование и анализ технологических параметров центробежно-ударного оборудования по измельчению полимерных материалов для получения RDF-топлива // НЕФТЕГАЗОХИМИЯ – 2024: материалы VII Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке / Минск (13–15 нояб. 2024 г.) – Минск: БГТУ, 2024. – С. 200–203.

Поступила 16.03.2026

APPLICATION OF CENTRIFUGAL IMPACT GRINDERS FOR PROCESSING POLYMER MATERIALS IN RDF FUEL PRODUCTION

P. GREBENCHUK
(Belarusian State Technological University, Minsk)
D. DUSHKEVICH, D. KOTOVICH
(JSC «NPO Center», Minsk)

The article examines the problems of municipal polymer waste disposal in the Republic of Belarus. It is established that, in crushed form, this waste can be used in many industries. A centrifugal impact grinder that can be used for these purposes is proposed. A method for calculating the destruction energy of polymeric materials is presented. The results of experimental studies aimed at determining the applicability of mills of a similar design for polymer waste recycling, as well as identifying their optimal operating modes, are presented. The influence of source material moisture and the occurrence of static electricity on the grinding process are considered. The productivity and specific energy consumption of the grinder under various conditions are assessed. Conclusions are drawn regarding the feasibility of using a centrifugal impact grinder with flexible elements for polymer waste recycling, and recommendations are given for ways to improve this process.

Keywords: municipal waste, fuel, polymers, grinder, rotor, deformation, energy, installation, product, fraction, layering, productivity, energy consumption.

УДК 614.8.084

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-139-143

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА УСЛОВИЙ ТРУДА И БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ

канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА¹, В.С. ЖИЗНЕВСКАЯ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

¹ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5025-7419>

Интеграция цифровых технологий в сферу управления охраной труда открывает новые возможности для снижения уровня профессиональных рисков и разработки обоснованных профилактических мероприятий. Изучены потенциальные возможности государственного ресурса – Геопортала земельно-информационной системы – как полнофункциональной геоинформационной среды, обладающей единой координатной базой, картографическими подложками и аналитическими инструментами. В рамках данного исследования предложено внедрение модуля «Производственная безопасность» в функционал Геопортала земельно-информационной системы путем создания тематического слоя, нанесения источников опасности, использования буферизации и тепловых карт. Предлагаемый модуль позволит визуализировать распределение опасных зон для обоснованного планирования мероприятий по снижению профессиональных рисков несчастных случаев и профессиональных заболеваний, строить безопасные маршруты перемещения персонала и проведения экскурсий по территории предприятия.

Ключевые слова: охрана труда, производственная безопасность, геоинформационная система, ГИС-технология, Геопортал земельно-информационной системы.

Введение. Глубокая интеграция цифровых технологий во все сферы жизнедеятельности человека требует переосмысления концептуальных направлений обеспечения безопасности современных промышленных производств, характеризующихся непрерывным усложнением технологических процессов, высокими скоростями, ростом единичных мощностей оборудования и, как следствие, возрастанием потенциальных рисков для жизни и здоровья работников [1]. Цифровая трансформация, которая является одной из приоритетных целей развития современного общества, закономерно затронула и сферу управления охраной труда, позволяя перейти от реактивных методов управления к проактивным, основанным на предиктивной аналитике и данных, отображаемых в реальном времени [2–6]. Современные информационные системы предоставляют мощный инструментарий для повышения эффективности управления охраной труда, функциональные возможности которых позволяют автоматизировать процессы разработки локальных-нормативно-правовых актов организации (положений, стандартов, инструкций, журналов, приказов и т.п.), процессы контроля (сроки обучения и инструктажей, карточки выдачи средств индивидуальной защиты (СИЗ), медосмотры, планы мероприятий, предписаний, результатов аттестации рабочих мест по условиям труда, карт оценки рисков и т.п.), регулярных операций (наряд-допуски, отчетность и т.п.); повышать эффективность процесса обучения и тренировки персонала, работающего на опасных производствах, с использованием технологий виртуальной (VR) и дополненной (AR) реальности, геймификации, Smart-тренажеров, цифровых симуляторов и двойников оборудования; организовать непрерывный мониторинг условий труда позволяющий прогнозировать профессиональные риски в реальном времени при помощи систем искусственного интеллекта и видеоаналитики, умных СИЗ и носимых устройств («умная» каска, модули, вшиваемые в спецодежду (жилет, куртку, перчатки, обувь), браслеты, ремни, предохранительные пояса и т.п.) [2–6].

Разрабатываемые продукты различаются по своему назначению и функционалу. Особую роль в цифровизации охраны труда могут сыграть геоинформационные системы (ГИС) [7]. Республика Беларусь обладает уникальным государственным ресурсом в этой сфере – Геопорталом земельно-информационной системы (ЗИС) (владелец – УП «Проектный институт Белгипрозем»), который представляет собой полнофункциональную геоинформационную среду с единой координатной базой, картографическими подложками и инструментарием для сбора, хранения, обработки, пространственного анализа и визуализации пространственных данных (геоданных) и связанной с ними атрибутивной информации. Вместе с тем потенциал этого ресурса для решения задач охраны труда до настоящего времени не используется: отсутствуют методики интеграции данных об условиях труда в Геопортал, не разработаны тематические слои производственной безопасности, не созданы алгоритмы пространственного анализа профессиональных рисков на его основе, что и определило *цель настоящего исследования*, которая заключается в обосновании и разработке ГИС-модели для анализа условий труда на производственных объектах с возможностью ее последующей интеграции в Геопортал ЗИС Республики Беларусь.

Методы исследований. Предложена интеграция элементов обеспечения охраны труда в функционал Геопортала ЗИС. Особенность геоинформационной системы заключается в том, что помимо чисто географических координат, она оперирует документальной, статистической, нормативно-справочной информацией, что позволяет формировать на ее основе аналитические отчеты и прогнозы, выявлять пространственные закономерности распределения производственных факторов, визуализировать эти данные, осуществлять моделирова-

ние сценариев и прогнозирование последствий аварийных ситуаций; планировать пути эвакуации; анализировать динамику уровня профессионального риска при установке нового оборудования или изменении технологического процесса; оценить эффективность планируемых защитных мероприятий и т.п.

Результаты и их обсуждение. Предлагаемое решение базируется на создании в составе Геопортала ЗИС тематического слоя «Производственная безопасность». Предлагаемый модуль может стать интерактивной картографической средой, объединяющей кадастровую информацию о территории предприятия с актуальными данными о фактических производственных факторах. Данный модуль может обеспечивать визуализацию источников опасности и безопасных зон в едином координатном пространстве, используя стандартные картографические подложки Геопортала (ортофотопланы, кадастровые планы, схемы инженерных коммуникаций), позволяя создавать динамическую цифровую модель предприятия. На карту-схему предприятия могут быть нанесены различные типы источников опасности, а именно: физические факторы (места расположения источников повышенного шума, вибрации (станки, вентиляционные установки, насосы, компрессоры), электромагнитных полей, источников ионизирующего излучения и т.п.); химические факторы: участки работы с вредными веществами, отбора проб, склады химических реагентов, сливно-наливные эстакады, резервуарные парки и другие места возможных выбросов, зоны рассеивания вредных примесей в атмосфере и т.п.; факторы травматизации: зоны погрузочно-разгрузочных работ, работы грузоподъемных механизмов, движущиеся части оборудования и т.п. Для каждого объекта в атрибутивной базе модуля могут храниться нормативные значения предельно допустимых концентраций (ПДК), предельно-допустимого выброса (ПДВ) вредных веществ и предельно-допустимых уровней воздействия (ПДУ) физических факторов, фактические результаты замеров (с привязкой по дате), а также информация о средствах защиты, а также зонах с наиболее высоким риском травмирования, полученным по результатам анализа статистической информации о происшествиях.

Ключевой аналитической функцией модуля «Производственная безопасность» является возможность построения «зеленых зон» (безопасных пространств) на основе пространственного (топографического) анализа: маршрутов перемещения путем построения оптимальных и безопасных путей прохода от входной группы до рабочего места, автоматически исключающих зоны с превышением ПДУ и ПДК или опасные зоны работы механизмов; зон отдыха (нанесение на карту мест, где уровни вредных и опасных производственных факторов находятся в допустимых пределах (санитарно-бытовые помещения, операторные, укрытия)); динамической фильтрации: возможности для пользователя включить отображение только безопасных участков для решения конкретной задачи (например, прокладки маршрута для транспортировки груза или проведения экскурсий по территории предприятия).

Для более эффективного использования собранных данных модуль может включать блок аналитических инструментов, характерных для современных геоинформационных систем: построение «тепловых карт» (автоматическая генерация карт плотности распределения опасных факторов по территории цеха, что позволит наглядно выявлять участки с накоплением рисков (например, совпадение зон повышенного шума и интенсивного перемещения людей); буферизация (зонирование) (автоматическое построение санитарно-защитных зон вокруг источника опасности с сигнализацией попадания в эту зону постоянного рабочего места; автоматическая генерация актуальных схем эвакуации с учетом временных препятствий (ремонтные работы, загроможденные проходы) и динамических рисков (утечки аварийно-химически опасных веществ, токсичных соединений). Указанные схемы могут добавляться в виде векторного слоя поверх основной карты.

Предлагается двухуровневая система актуализации и наполнения данных модуля «Производственная безопасность»: статический слой (базовый): данные, вносимые по результатам анализа источников опасности от оборудования и технологического процесса; проведения аттестации рабочих мест по условиям труда, оценки рисков, анализа статистических данных о происшествиях, зоны рассеивания вредных веществ с указанием нормативных значений ПДК/ПДУ; динамический слой (оперативный): данные, вносимые по результатам инструментальных замеров (в результате производственного (локального) мониторинга и т.п.). Интеграция с портативными измерителями (дозиметры, газоанализаторы, датчиками взрывных концентраций, видеоаналитики и т.п.) позволит загружать показания в модуль с привязкой к геометрии места замера.

Для отображения возможностей предлагаемого модуля в качестве объекта моделирования выбран машиностроительный комплекс, представляющий собой территорию площадью около 30 га, на которой расположено 22 здания и сооружения различного функционального назначения, территориально привязанный к системе координат, совместимой с Геопорталом ЗИС. Комплекс включает типичные функциональные зоны среднего машиностроительного предприятия: производственные цеха, энергетический блок, складское хозяйство, административно-бытовые корпуса и транспортную сеть. Конфигурация комплекса и данные об уровне производственного шума являются модельными, максимально приближенными к реальным характеристикам аналогичных объектов. Типы зданий и сооружений с указанием их функционального назначения и акустических характеристик приведены в таблице 1.

Для объектов административно-бытового назначения фоновый уровень шума принят в диапазоне 45–60 дБА, что соответствует допустимым значениям для административно-управленческой деятельности. ПДУ шума для производственных помещений составляет 80 дБА по эквивалентному уровню за смену и 90 дБА по максимальному уровню звука.

Таблица 1. – Модельные источники шума и их акустические характеристики

Обозначение	Наименование объекта	L, дБА	Характер шума
Цех 1	Листопрокатный цех	105	Постоянный широкополосный с импульсными пиками
Цех 2	Компрессорная станция сжатого воздуха	100	Постоянный широкополосный с тональными составляющими
Цех 3	Энергоцентр	95	Непостоянный при работе дизель-генераторов
Цех 4	Установка получения водорода	92	Постоянный с тональными компонентами
Цех 5	Цех водоподготовки	88	Постоянный низкочастотный
Цех 6	Центральная мастерская	90	Широкополосный с высокочастотным пиком
Всп. 1	Трансформаторная подстанция 110/10 кВ	82	Узкополосный низкочастотный (100 Гц)
Всп. 2	Очистные сооружения	75	Постоянный широкополосный
Всп. 3	Гараж	78	Непостоянный колеблющиеся

Процесс моделирования пространственного распределения шума реализован в среде ArcGIS и включает четыре последовательных этапа:

1. Подготовка векторных слоев. Полигональный слой зданий пополняется атрибутами, характеризующими эквивалентный уровень звука у наружных ограждающих конструкций. Точечный слой источников шума формируется путем размещения точек в геометрических центрах наиболее шумных фасадов соответствующих зданий. Каждой точке присваивается значение уровня звуковой мощности, которое определяется из эквивалентного уровня на расстоянии 1 м.

2. Расчет на регулярной сетке. На территорию комплекса накладывается регулярная сетка точек с шагом 35 м. Для каждого узла сетки проверяется принадлежность внешнему контуру территории. Для точек, попавших внутрь полигона, выполняются расчет расстояний до всех источников шума и вычисление результирующего уровня звука методом энергетического суммирования с учетом логарифмического затухания и атмосферного поглощения. Расчет реализуется через калькулятор программного обеспечения Surfer. Результатом является точечный слой, приведенный на рисунке 1, содержащий координаты и расчетный уровень шума в дБА.

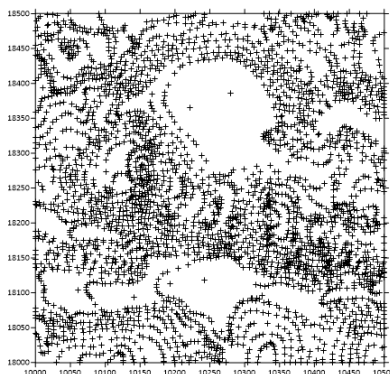


Рисунок 1. – Точечный слой в ПО Surfer

3. Построение непрерывной поверхности шума методом интерполяции обратно взвешенных расстояний (IDW) с радиусом поиска 70 м и показателем степени 2. Полученный растр классифицируется по четырем зонам опасности в соответствии с критериями, приведенными в таблице 2.

Таблица 2. – Классификация зон шумовой опасности

Зона	Уровень шума, дБА	Класс условий труда	Режим пребывания
Зеленая	< 70	1, 2	Постоянное пребывание без ограничений
Желтая	70–85	3.1	Контроль времени пребывания
Оранжевая	85–95	3.2	Обязательное применение СИЗ слуха
Красная	> 95	3.3, 3.4, 4	Кратковременное пребывание, комбинированные СИЗ

4. Верификация модели, картографическое оформление и визуализация полученных данных. К растру применяется цветовая схема, приведенная на рисунке 2 (зеленый → желтый → оранжевый → красный). На итоговую карту накладываются контуры зданий, подписи объектов и легенда.

Пространственное распределение зон шумовой опасности демонстрирует выраженную закономерность: производственное ядро формирует компактную область высоких уровней шума, тогда как восточная периферия и административный сектор характеризуются уровнями, соответствующими зеленой зоне. Количественное распределение точек выборки по зонам представлено в таблице 3.

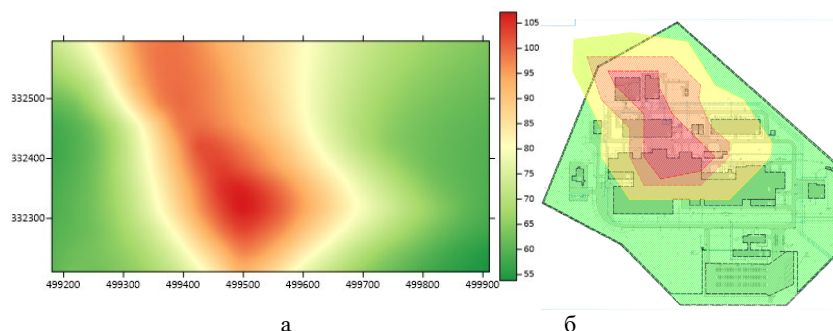


Рисунок 2. – Цветовая схема шумовой опасности (а) и итоговая карта (б) предприятия

Таблица 3. – Распределение точек по зонам шумовой опасности

Зона	Доля точек, %	Преобладающие объекты
Зеленая (< 70 дБА)	47	АБК, административные здания, КПП, восточный периметр
Желтая (70–85 дБА)	18	Подъездные пути, складская зона, границы цехов
Оранжевая (85–95 дБА)	19	Компрессорная, энергоцентр, цех водоподготовки
Красная (> 95 дБА)	16	Листопрокатный цех, участок прокатного стана

Максимальный расчетный уровень (107 дБА) зафиксирован у южного фасада листопркатного цеха, что соответствует опасному уровню. Административно-бытовые корпуса находятся в зеленой зоне (50–62 дБА), и это подтверждает правильность архитектурно-планировочного решения. На северо-западном участке периметра уровень шума (60–65 дБА) превышает ПДУ для территорий, прилегающих к жилой застройке в ночное время (45 дБА), что необходимо учитывать при обосновании санитарно-защитной зоны и режима работы предприятия.

Для интеграции модели в информационную систему управления охраной труда определена структура атрибутивных данных, отображаемых при выборе зоны на карте. Состав атрибутов обеспечивает принятие управленческих решений непосредственно из интерфейса ГИС, что соответствует современным подходам к цифровизации охраны труда. В таблице 4 представлен перечень предлагаемых атрибутивных полей и примеры их значений.

Таблица 4. – Предлагаемое атрибутивное наполнение зон шумовой опасности

Атрибут	Зеленая	Желтая	Оранжевая	Красная
Наименование зоны	Безопасная	Умеренно опасная	Опасная	Чрезвычайно опасная
Код зоны	GREEN	YELLOW	ORANGE	RED
Уровень шума, дБА	50–69	70–84	85–94	95–107
ПДУ, дБА	60	80	80	80
Класс условий труда	1, 2	3.1	3.2	3.3, 3.4, 4
Режим пребывания	Без ограничений	Контроль времени	2–4 ч	До 15 мин
СИЗ слуха обязательны	Нет	Нет (< 80 дБА)	Да	Да
Периодичность замеров	1 раз в 2 года	1 раз в год	1 раз в 6 месяцев	1 раз в 3 месяца

Предложенная структура может быть реализована в среде Геопортала ЗИС через механизм связанных таблиц. Для внедрения на предприятии значения атрибутов необходимо заполнять путем запроса к базе данных инструментальных замеров, обеспечивая актуализацию информации по примеру, приведенному на рисунке 3.

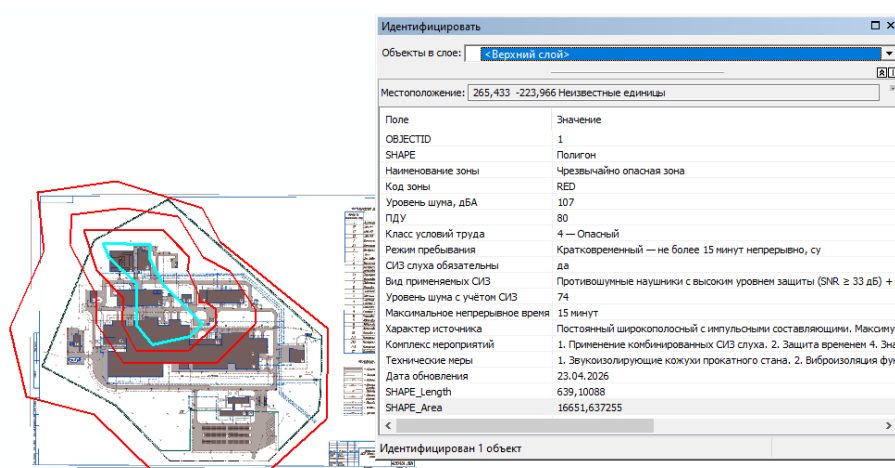


Рисунок 3. – Пример отображения атрибутивной таблицы

Предлагаемая модель инвариантна к типу производственного фактора. Замена фактора на другой пространственно-распределенный параметр не требует изменения структуры модели – достаточно добавить новый слой источников и нормативные значения ПДК/ПДУ. Комплексная оценка условий труда может быть реализована путем наложения нескольких карт с весовыми коэффициентами. Дальнейшее развитие системы может быть связано с интеграцией данных от датчиков для перехода динамической модели.

Заключение. Цифровизация управления охраной труда открывает новые возможности для снижения уровня профессиональных рисков и разработки обоснованных профилактических мероприятий. При этом применение геоинформационных систем позволит перейти к пространственному (топографическому) анализу параметров среды и их распределения по территории предприятия. ГИС-технологии могут выступать как полноценная аналитическая платформа, которая интегрирует разрозненные данные об условиях труда, источниках опасности для жизни и здоровья работников в единую пространственную среду, позволяя выявлять скрытые закономерности, прогнозировать развитие ситуации и принимать обоснованные решения для предотвращения несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голенских С.А. Принцип охраны труда в системе отраслевых принципов трудового права // Трудовое право в России и за рубежом. – 2025. – № 1. – С. 38–40. DOI: 10.18572/2221-3295-2025-1-38-40
2. Федорова Н.В. Цифровизация в охране труда // Вестник ангарского государственного технического университета. – 2024. – № 1(18). – С. 330–332. DOI: 10.36629/2686-777X-2024-1-18-330-332
3. Яронова Н.В. Интеграция технологий интернета вещей (Iot) в систему охраны труда на железнодорожном транспорте // Свет науки. – 2025. – № 11(46). – URL: <https://inlibrary.uz/index.php/science-shine/article/view/103704> (дата обращения: 23.08.2026).
4. Тимофеева С.С. Цифровизация и искусственный интеллект в охране труда // XXI век. Техносферная безопасность. – 2024. – № 9(3). – С. 280–295. DOI: 10.21285/2500-1582-2024-9-3-280-295
5. Булавка Ю.А., Самусевич В.Н. Использование цифровых инструментов интегрированных решений в области охраны труда // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 11. – С. 72–81.
6. Сунцов А.В., Булавка Ю.А. Применение цифровых технологий в обеспечении безопасности жизнедеятельности // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XIX междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых / Минск (16–17 апр. 2025 г.). – Минск: УГЗ, 2025. – С. 107–108.
7. Жизневская В.С., Булавка Ю.А. Применение ГИС-технологий для анализа условий труда // Технологии ликвидации чрезвычайных ситуаций: сб. материалов XII междунар. заоч. науч.-практ. конф. / Минск (29 мая 2026 г.). – Минск: УГЗ, 2026 – С. 264–268.

Поступила 23.08.2026

USING GIS-TECHNOLOGIES TO ANALYZE WORKING CONDITIONS AND SAFETY IN THE WORKING ENVIRONMENT

Y. BULAUKA, V. ZHIZNEVSKAYA
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The integration of digital technologies into occupational safety management opens up new opportunities for reducing occupational risks and developing sound preventative measures. The potential of the state resource – the Geoportal of the Land Information System – was explored as a fully functional geographic information environment with a unified coordinate base, map basemaps, and analytical tools. This study proposed integrating the "Industrial Safety" module into the Geoportal of the Land Information System by creating a thematic layer, mapping hazard sources, and using buffering and heat maps. The proposed module will visualize the distribution of hazardous zones for informed planning of measures to reduce the risk of occupational accidents and diseases, construct safe routes for personnel, and conduct tours of the enterprise.

Keywords: labor protection, industrial safety, geographic information system, GIS technology, geoportal of the land information system.

ВЛИЯНИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И БЕЗОПАСНОСТЬ ШАХТ ИЗМЕНЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ГОРНОЙ МАССЫ ЗА СЧЕТ КОРРЕКТИРОВКИ УГЛОВ УСТАНОВКИ РЕЗЦОВ

канд. техн. наук В.А. ДРОНЧЕНКО, Д.Д. ЗАДОХИН
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения класса опасности по пылевому фактору в угольных шахтах. Одним из перспективных методов является управление размером фракции горной массы непосредственно в процессе ее добычи за счет оптимизации параметров режущего инструмента. В данной статье исследуется влияние углов установки резцов на гранулометрический состав продукта разрушения. В результате установлены оптимальные диапазоны значений углов, при которых выход наиболее пылевидной фракции снижается. Полученные данные позволяют обосновать выбор параметров исполнительного органа комбайна для минимизации пылеобразования и улучшения санитарно-гигиенических условий в очистном забое.

Ключевые слова: геоэкология, охрана окружающей среды, безопасность шахт, горнодобывающая промышленность, углы резцов, размер фракции, гранулометрический состав, оптимизация, проходческий комбайн.

Введение. По данным Статистического комитета Республики Беларусь¹, в стране в 2024 г. образовалось 55 340 тыс. т отходов производства, а использовано было лишь 17 827 тыс. т. Способы повышения уровня использования нефтесодержащих отходов предложены и проанализированы в [1–3]. Следует заметить, что подавляющая масса удаленных отходов – это отходы, образовавшиеся при добыче калийных солей.

Подземная добыча калийной соли в виде сильвинита представляет собой сложный технологический процесс, сопровождающийся постоянным образованием рудничной пыли. Пыль, являясь неизбежным спутником горного производства, создает серьезные проблемы для обеспечения безопасности труда и экологической защиты [4; 5]. Особую актуальность эта проблема приобретает при работе проходческих и очистных комбайнов, которые генерируют до 90–95% всего объема пылевых частиц в горных выработках.

Калийная пыль, обладающая выраженной гигроскопичностью, имеет сложное физико-химическое поведение в рудничной атмосфере. Содержание связанной влаги в сильвинитовых породах достигает 0,3–0,6%, что приводит к активному влагообмену с окружающей средой согласно закону Рауля. Это свойство существенно осложняет процессы пылеподавления и влияет на реологические характеристики аэрозоля, определяя особенности его распространения по горным выработкам.

Поведение пылевых частиц в подземном пространстве характеризуется сложной динамикой, где мелкие фракции менее 0,1 мкм демонстрируют броуновское движение, а более крупные частицы подчиняются законам аэродинамики. Адгезионные и аутогезионные свойства пыли дополнительно осложняют ситуацию, способствуя образованию устойчивых аэрозолей и налипанию частиц на поверхности оборудования.

Распределение запыленности по горным выработкам отличается значительной неоднородностью. Наибольшие концентрации наблюдаются в призабойных пространствах, зонах перегрузки горной массы и участках работы самоходного оборудования. Особую опасность представляет повышенная запыленность в околоствольных дворах, где скорость воздуха в воздухоподающих стволах достигает 5–8 м/с, создавая условия для интенсивного пылепереноса.

Пылевая обстановка в руднике формируется под влиянием множества факторов, где локальные источники в добычных участках определяют запыленность на рабочих местах, а распределенные источники вдоль транспортных коммуникаций формируют общий фон запыленности. Особую тревогу вызывает высокая концентрация пыли в зоне дыхания операторов горного оборудования, где показатели могут многократно превышать предельно допустимые значения.

Экологический аспект проблемы усугубляется выносом пылевых частиц исходящей струей рудника, что приводит к загрязнению прилегающих территорий и требует организации эффективных систем аспирации и очистки. В этой связи разработка комплексных решений по снижению пылеобразования на стадии разрушения горного массива приобретает первостепенное значение. Перспективным направлением представляется оптимизация параметров режущего инструмента горных машин, позволяющая управлять гранулометрическим составом продукта разрушения и минимизировать образование наиболее опасной мелкодисперсной фракции. Данное исследование направлено на всесторонний анализ природы и свойств

¹ Статистический ежегодник Республика Беларусь, 2025. – Минск: Нац. статист. ком. Респ. Беларусь, 2025 – URL: <https://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 05.06.2026).

рудничной пыли, механизмов ее образования и распространения, а также разработку научно-обоснованных мероприятий по кардинальному улучшению аэрологи-ческой обстановки в подземных горных выработках.

Основная часть. Методология. Добыча соляных пород, включая каменную соль, сильвинит и карналлит, сопряжена с уникальными техническими вызовами, обусловленными их физико-механическими свойствами. Высокая сопротивляемость резанию, пластичность, гигроскопичность и абразивность требуют особого подхода к проектированию режущего инструмента горных комбайнов. Например, сопротивление резанию соляных пород Старобинского месторождения достигает 350–450 кН/м, что значительно превышает аналогичный показатель для углей Донецкого бассейна (80–160 кН/м). Это приводит к повышенной энергоемкости процессов разрушения и снижению производительности оборудования.

Оптимизация углов резцов исполнительного органа комбайна становится ключевым фактором минимизации рисков аварий и повышения эффективности добычи² [6–8].

Угол резца определяет характер взаимодействия инструмента с породой. Основные параметры:

- угол заострения – влияет на усилие резания. Увеличение угла снижает сопротивление, но повышает риск сколов;
- угол поворота (φ) – угол установки резца относительно направления вращения диска (рисунок 1);
- угол атаки (δ) – это угол между касательной к режущей кромке наконечника резца и его осью (рисунок 1).

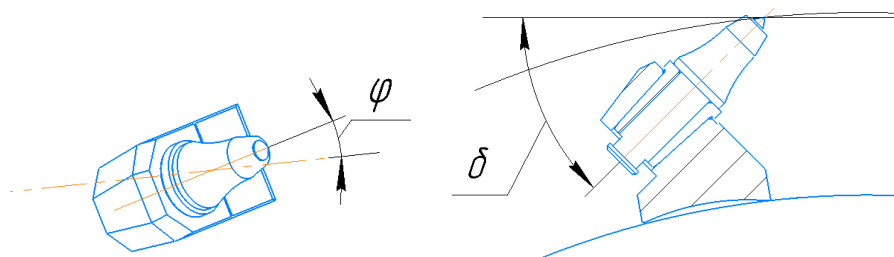


Рисунок 1. – Угол поворота φ и угол атаки δ

При оптимальном угле атаки достигается высокая эффективность выработки при низком потреблении энергии. Угол влияет на способность резца проникать в породу, что приводит к изменению мощности и энергопотребления. Кроме этого, во время работы резец подвергается изгибу в держателе и, следовательно, создает нагрузку.

На рисунке 2 видно, что при установке резца перпендикулярно к поверхности породы максимальная толщина стружки h такая же, как и максимальная глубина внедрения H резца в породу. Но при изменении угла атаки максимальная толщина стружки отличается от максимальной глубины внедрения H . В теории толщина стружки уменьшается, причем чем меньше угол, тем меньше толщина стружки. Однако на практике в связи с неподдающимся расчетам поведением разрушения забоя это, как правило, не учитывается.

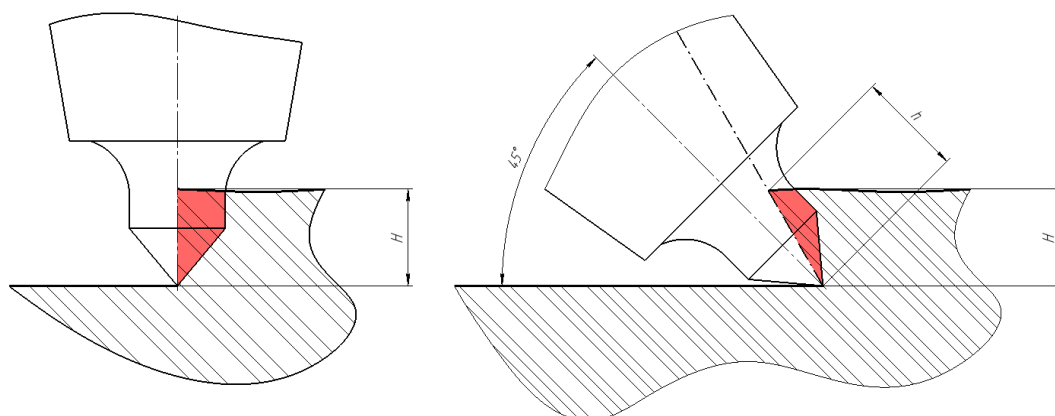


Рисунок 2. – Влияние угла атаки на глубину внедрения

² OPTIMIERUNG VON VORTRIEBSMASCHINEN // Kommission der Europäischen Gemeinschaften. – 1982. – № 3. – С. 14 – 19.

При оптимальном угле поворота резец вращается в процессе резки, что приводит к самозатачивающемуся эффекту и более благоприятному износу самого резца, а значит, увеличивает срок его службы. Неоптимальный угол поворота тормозит поворот, что может вызвать изнашивание с одной стороны. Это в некотором роде влияет на размер фракции, но не критично.

Прочностные характеристики и хрупкость соляных пород (значения параметров приведены на рисунке 3) оказывают определяющее влияние на выбор геометрии режущего инструмента для горных комбайнов. Пределы прочности при сжатии, растяжении и изгибе образуют характерные соотношения: для каменной соли – 1:0,13:0,04; для сильвинита – 1:0,07:0,01; для карналлита – 1:0,1:0,01. На Старобинском месторождении прочность на сжатие варьируется в значительных пределах – от 25,0 МПа во втором калийном горизонте до 40,0 МПа в подкровной каменной соли. Такие показатели диктуют необходимость применения резцов с повышенной износостойкостью, особенно при работе с загрязненными глинистыми примесями породами, где прочностные характеристики снижаются на 15–20%.

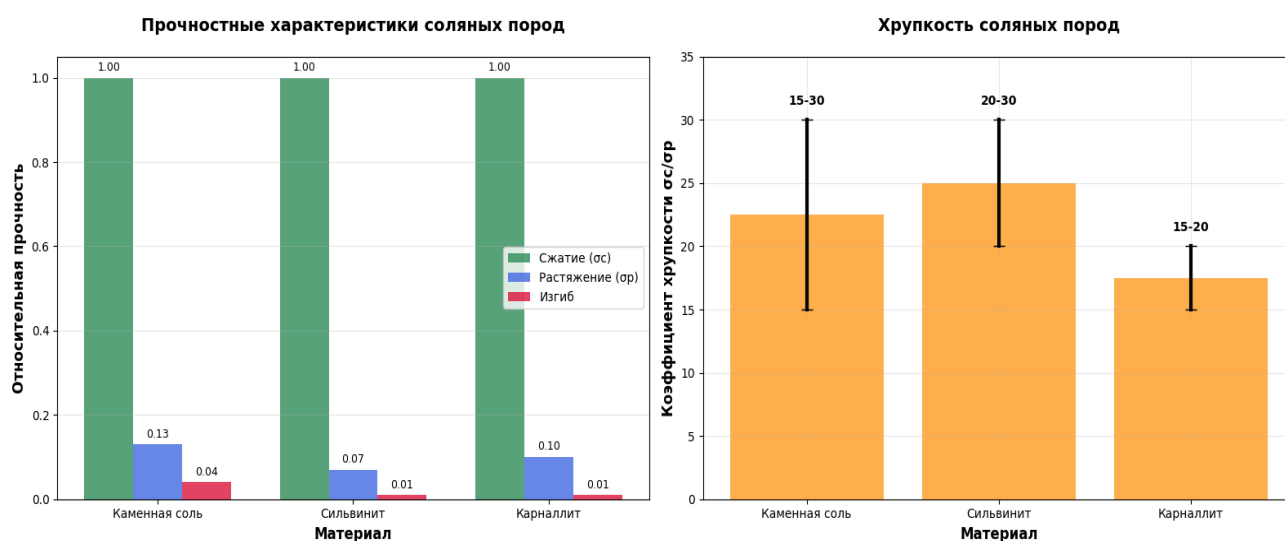


Рисунок 3. – Прочностные характеристики пород и их хрупкость

Упруго-деформационные свойства соляных пород, включая модуль упругости в диапазоне $E = (1,2–2,3) \cdot 10^4$ МПа и коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, непосредственно влияют на характер деформирования массива под нагрузкой режущего инструмента. Реологические особенности пород, проявляющиеся в явлениях ползучести, также играют существенную роль: относительная деформация достигает 0,8–2,5% для каменной соли, 2,3–3% для сильвинита и 2,5–5% для карналлита. Эти параметры требуют тщательного учета как при расчетах долговременной устойчивости забоев, так и при проектировании систем крепления горных выработок.

Важной особенностью соляных пород является их хрупкость, оцениваемая по соотношению прочностных характеристик σ_c/σ_p . Для каменной соли этот показатель составляет 15–30, для сильвинита – 20–30, для карналлита – 15–20. При динамических нагрузках, характерных для горных ударов, даже относительно пластичные породы демонстрируют хрупкое разрушение, что существенно повышает риск обрушений. Данное обстоятельство подчеркивает важность применения резцов с оптимизированными углами, способствующими снижению ударных нагрузок. Экспериментально установлено, что увеличение переднего угла резца с 25° до 35° позволяет уменьшить средний размер фракции на 40%, однако превышение оптимальных значений приводит к интенсивному износу инструмента. Для соляных пород рекомендуется использовать резцы с углом резания 50° и задним углом 10° , аналогичные применяемым в приборе ДКС-2 для измерения сопротивляемости. Ширина режущей части 20 мм и трансиевидная форма кромки обеспечивают стабильность процесса резания.

Гигроскопичность соляных пород, особенно выраженная у мелких фракций, приводит к образованию раскислов на поверхностях горного оборудования, что значительно ускоряет коррозионные процессы. Для защиты механизмов необходимы материалы с повышенной устойчивостью к агрессивным средам, а также регулярная очистка ответственных узлов. Абразивные свойства сильвинита (0,14–7,4 мкм) и калийной соли (6,5–30,5 мкм) вызывают интенсивное истирание режущих кромок, сокращая ресурс инструмента. Компенсация абразивного износа достигается применением композитных сплавов и систем автоматической регулировки углов в реальном времени. Практический опыт внедрения адаптивных систем на горных предприятиях показал увеличение межремонтного периода комбайнов на 25–30% при одновременном снижении затрат на замену резцов.

Сопротивляемость резанию, определяемая как $A = P_p/h$, где P_p – усилие резания, а h – толщина стружки, представляет собой интегральный показатель, непосредственно влияющий на энергопотребление процесса. Для соляных пород Старобинского месторождения этот параметр составляет 350–450 кН/м, что требует примене-

ния комбайнов с повышенной мощностью. Проведенные эксперименты с различными геометриями режущего инструмента показали, что оптимизация углов резцов позволяет снизить удельное энергопотребление на 15–20%. Установлено, что резцы с углом заострения 60–65°, разработанные для угольных пластов, демонстрируют высокую эффективность и при работе с силвинитом, обеспечивая получение однородной фракции 6–10 мм. Особое значение имеет квалификация операторов: машинисты, обученные выбирать рациональные схемы отработки забоя, существенно снижают вероятность заштыбовки и неравномерного износа инструмента.

Технологические свойства соляных пород, включая насыпную плотность 1,3–1,5 т/м³ и угол естественного откоса 39°, оказывают непосредственное влияние на проектирование систем транспортировки горной массы. Коэффициент трения соляной породы по стали, составляющий 0,4, требует использования конвейеров с усиленными приводными механизмами. Склонность горной массы к слеживанию при длительном хранении повышает риск закупорки оборудования, что делает критически важным своевременное удаление отработанного материала из забоя. Современные технические решения, включающие датчики контроля засорения и системы пневмоочистки, позволяют минимизировать простои технологического оборудования.

Ключевыми преимуществами оптимизации являются снижение энергопотребления на 15–20% за счет уменьшения сопротивления резанию, увеличение ресурса резцов на 20–25% благодаря снижению абразивного износа и рост производительности на 10–15% за счет стабилизации процесса дробления.

Подобное достигается комплексным подходом:

- мониторингом состояния резцов с использованием приборов типа ДКС-2. Регулярный контроль позволяет своевременно выявлять износ и корректировать углы, предотвращая перегрузки;
- автоматической регулировкой углов в зависимости от типа породы. Системы на основе датчиков давления и вибрации адаптируют геометрию резцов в реальном времени, минимизируя энергозатраты;
- применением износостойких материалов (карбид вольфрама, керамические покрытия) и антикоррозионных сплавов. Это особенно важно для работы с гигроскопичными соляными породами, где коррозия сокращает срок службы инструмента.

Результаты. Теоретические расчеты велись согласно ОСТ 12.44.258-84-1³. В расчете использовался планетарный исполнительный орган с тремя резцовыми дисками, на каждом из которых находилось 15 поворотных резцов РК-1. Технические данные этого исполнительного органа – по технической документации комбайна «Урал-61». Данные о свойствах породы – по Старобинскому месторождению (данные «Беларуськалия»). Расчеты велись при углах атаки 30°, 35°, 40° и 45°. Угол поворота резца составлял 16° и не менялся. Угол заострения резца был взят из данных резца РК-1. Скорость подачи – исходя из производительности.

В ходе расчетов было выявлено, что уменьшение угла атаки резцов влияет на энергоэффективность и толщину получаемой стружки. По данным расчетов составлена таблица 1.

Таблица 1. – Влияние углов атаки

Параметры	Угол атаки			
	30°	35°	40°	45°
Средняя толщина стружки $h_{ср}$, см	0,47	0,54	0,61	0,67
Средний размер фракции $d_{ср}$, см	1,44	1,5	1,56	1,61
Средняя мощность резания относительного вращения, кВт	48,55	68,56	86,7	101,17
Средняя мощность переносного вращения, кВт	9,27	11,45	13,4	14,93
Удельная энергоемкость, (кВт*ч)/т	0,32	0,44	0,56	0,64

На основании данных таблицы можно сделать следующие выводы:

1. Влияние угла атаки на толщину стружки и размер фракции.

С увеличением угла атаки от 30° до 45° наблюдается рост средней толщины стружки (с 0,47 до 0,67 см) и среднего размера фракции (с 1,44 до 1,61 см). Это указывает на то, что увеличение угла атаки способствует образованию более крупной стружки и фракций.

2. Влияние угла атаки на мощность резания.

Мощность, затрачиваемая на резание, существенно возрастает с увеличением угла атаки:

- мощность относительного вращения увеличивается с 48,55 кВт до 101,17 кВт;
- мощность переносного вращения также растет, но менее значительно: с 9,27 кВт до 14,93 кВт.

3. Влияние угла атаки на энергоемкость.

Удельная энергоемкость процесса увеличивается с 0,32 до 0,64 (кВт*ч)/т, т.е. почти в два раза. Это свидетельствует о том, что при больших углах атаки процесс резания становится менее энергоэффективным.

³ ОСТ 12.44.258-84-1. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. – М., 1984. – С. 3–98.

Общий вывод. Уменьшение угла атаки резцов в исследованном диапазоне (30° – 45°) положительно влияет на энергоэффективность процесса: снижаются удельная энергоёмкость и требуемая мощность резания. Однако при этом уменьшается толщина стружки и размер фракции, что может быть связано с более мелким дроблением материала. Таким образом, выбор оптимального угла атаки требует баланса между качеством дробления (размер фракции) и энергозатратами.

Помимо этого, в ходе расчетов с учетом старых экспериментальных данных испытаний комбайна «Урал-61» было получено теоретическое приблизительное соотношение размеров фракций (таблица 2).

Таблица 2. – Теоретическая массовая доля фракций

Граничные размеры фракции	Массовое содержание фракций, %			
	30°	35°	40°	45°
≥ 5	70,59	71,7	72,59	73,32
3...5	10,55	10,21	9,92	9,69
1...3	12,13	11,659	11,28	10,97
0,5...1	3,31	3,17	3,05	2,96
0,25...0,5	1,7	1,62	1,56	1,52
$\leq 0,25$	1,73	1,65	1,59	1,54

Согласно таблице 2 и рисунку 4, с увеличением угла атаки резцов с 30° до 45° массовая доля крупной фракции (≥ 5 см) возрастает с 70,59% до 73,32%, в то время как содержание всех более мелких фракций последовательно уменьшается. Это указывает на то, что большие углы атаки обеспечивают более грубое дробление материала с преобладанием крупных частиц. Вместе с тем, как показывают предыдущие данные, такой режим работы сопровождается повышенными энергозатратами. Таким образом, выбор оптимального угла атаки представляет собой компромисс между получением более крупной фракции продукта и энергоэффективностью процесса.

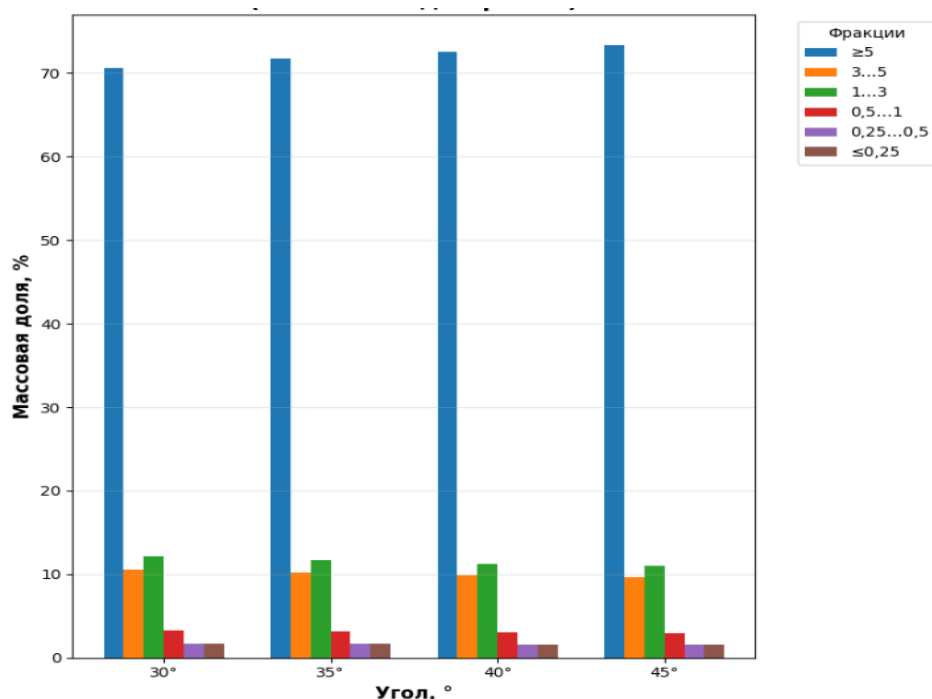


Рисунок 4. – Теоретическая массовая доля фракций

Безопасность производства и риски. В ходе изучения вопроса о влиянии углов было также выявлено, что затупленные резцы с неправильными углами увеличивают трение, и в газовых шахтах это может привести к взрыву. Система мониторинга в реальном времени (например, датчики температуры и вибрации) позволяет своевременно выявлять износ. Некорректные углы ускоряют износ в 1,5–2 раза. Например, при угле 45° на твердых породах ресурс резцов сокращается до 50 ч против 120 ч при 35° . Крупные обломки (более 15 мм) увеличивают нагрузку на дробилки и конвейеры, повышая риск поломок. Оптимизация углов резцов снижает долю некондиционной фракции до 5%.

Заключение. Безопасная и эффективная добыча соляных пород требует глубокого понимания их физико-механических свойств и адаптации режущего инструмента под конкретные условия.

На основании проведенного анализа можно сделать общий вывод о комплексном влиянии угла атаки резцов на процесс резания. С увеличением угла атаки от 30° до 45° четко прослеживается тенденция к укрупнению получаемого продукта: средняя толщина стружки возрастает на 43%, средний размер фракции увеличивается на 12%, а массовая доля наиболее крупной фракции (≥ 5 см) прогрессивно растет с 70,59% до 73,32%. Параллельно наблюдается сокращение всех более мелких фракций, что свидетельствует о более грубом дроблении материала при больших углах атаки.

Однако достижение такого качества продукта сопряжено со значительным ростом энергозатрат. Мощность резания возрастает более чем вдвое – с 48,55 до 101,17 кВт, а удельная энергоемкость процесса увеличивается на 100% – с 0,32 до 0,64 (кВт·ч)/т. Это указывает на существенное снижение энергоэффективности технологического процесса при использовании больших углов атаки.

Таким образом, при выборе оптимального режима работы необходимо находить компромисс между качественными характеристиками продукта и экономической эффективностью процесса. Уменьшение угла атаки обеспечивает существенную экономию энергоресурсов при некотором ухудшении гранулометрического состава продукта, в то время как увеличение угла атаки позволяет получить более крупную фракцию, но требует значительно больших энергозатрат. Оптимальное значение угла атаки должно определяться исходя из конкретных производственных требований к качеству продукта и допустимому уровню энергопотребления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.П., Дронченко В.А. Охрана труда рабочих и защита окружающей среды от вредного влияния нефтесодержащих отходов. – Новополоцк: ПГУ, 2016. – 248 с.
2. Утилизация нефтесодержащих сточных вод эмульгированием и сжиганием / В.П. Иванов, В.А. Дронченко, Т.В. Вигерина и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 1. – С. 27–33.
3. Иванов В.П., Лялякин В.П., Дронченко В.А. Защита окружающей среды от нефтесодержащих отходов с наличием дизельного топлива и мазута // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 1(49). – С. 122–127. DOI: 10.52928/2070-1616-2024-49-1-122-127
4. Дронченко В.А., Задохин Д.Д. Повышение безопасности в шахтах за счет оптимизации углов резцов исполнительного органа комбайна // Инновационные технологии в машиностроении: электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Новополоцк (22–23 апр. 2025 г.) / Полоц. гос. ун-т; под ред. В.К. Шелега, Н.Н. Попок. – Новополоцк, 2025. – С. 70–71. – URL: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/47963/1/70-71.pdf> (дата обращения: 15.05.2026).
5. Прокопенко С.А., Шлапаков П.А. Повышение безопасности и эффективности отбойки горной массы в шахтах // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 2. – С. 27–31.
6. Литвинский Г.Г. Основы теории резания и разрушения горных пород // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2017. – № 8(51). – С. 5–15.
7. Пути развития теории разрушения углей и горных пород резцовым инструментом / А.Б. Жабин, А.В. Поляков, Е.А. Аверин и др. // Уголь. – 2019. – № 9(1122). – С. 24–28. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-9-24-28
8. Геллер Ю.А. Факторы, влияющие на процесс разрушения грунтового и горного массива // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2021. – Т. 27. – № 5. – С. 17–25. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-5-17-25

Поступила 06.07.2026

ENVIRONMENTAL IMPACT AND MINE SAFETY DUE TO CHANGES IN THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF THE ROCK MAS BY ADJUSTING THE INSTALLATION ANGLES OF CUTTERS

V. DRONCHENKO, D. ZADOKHIN
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The relevance of the work is determined by the necessity to reduce the hazard class concerning the dust factor in coal mines. One of the promising methods is managing the fraction size of the mined rock directly during its extraction by optimizing the parameters of the cutting tool. This article investigates the influence of cutter installation angles on the granulometric composition of the destruction product. As a result, optimal ranges of angle values are established, under which the yield of the most finely dispersed dust fraction decreases. The obtained data allow substantiating the selection of parameters for the miner's actuating mechanism to minimize dust formation and improve sanitary and hygienic conditions in the longwall face.

Keywords: *geoecology, environmental protection, mine safety, mining industry, cutter angles, fraction size, granulometric composition, optimization, roadheader.*

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Попок Н.Н., Беляков Н.В., Махаринский Ю.Е., Якушев М.А., Станкевич А.П.</i> Система автоматизированного синтеза схем установки заготовок для серийного производства некруглых деталей на обрабатывающих центрах	2
<i>Гедроить Г.И., Варфоломеева Т.А., Занемонский С.В., Рынкевич С.А.</i> Эксплуатационные качества мобильных энергонасыщенных сельскохозяйственных средств	12
<i>Рынкевич С.А.</i> Тесты по особенностям конструкции и эксплуатации электрического транспорта при изучении дисциплины «Электрооборудование и силовая электроника электрических и автономных транспортных средств»	17
<i>Парфиевич А.Н., Сокол В.А., Дарчич Б.С.</i> Интегральные диагностические показатели оценки технического состояния зубчатых передач по акустическому сигналу	26
<i>Патапаў У.А., Русан С.І., Сівачэнка Л.А.</i> Удакладненне мадэлі рабочей камеры ланцужага тэхналагічнага аграгата	34

ТРАНСПОРТ

<i>Коржова А.В., Иванов В.П., Баханович А.Г., Сонич О.А., Мозалевский Д.В.</i> Исследование организации дорожного движения на основе минимизации социально-экономических потерь	42
<i>Коржова А.В., Иванов В.П., Баханович А.Г., Сонич О.А., Мозалевский Д.В.</i> Инфраструктурная приоритетизация маршрутного пассажирского транспорта как паттерн минимизации макроэкономических потерь	48
<i>Кустенко А.А., Капский Д.В.</i> Сравнительный анализ конструкций трамвайных остановочных пунктов	55
<i>Кустенко А.А., Капский Д.В.</i> Математические основы автономного управления движением трамвая в условиях совместного городского трафика	59
<i>Зеньков В.А.</i> Разрешающая способность и технический уровень виброакустического диагностирования автомобильных агрегатов	64
<i>Зеньков В.А.</i> Закономерности взаимосвязей диагностических и структурных параметров при диагностировании автомобильных двигателей	69
<i>Капский Д.В., Богданович С.В.</i> Методологические следствия использования транспортных средств в качестве подвижных датчиков для мониторинга дорожного движения	73
<i>Гурский А.С.</i> Повышение точности результатов при проведении дистанционной диагностики высоковольтной аккумуляторной батареи	80
<i>Изоитко В.М., Буйкус К.В.</i> Разработка технологии фрикционного нагрева поверхности детали перед газотермическим напылением покрытия	87
<i>Лю Юйвэй</i> Совершенствование методики оценки целесообразности устройства выделенных полос для маршрутных пассажирских транспортных средств с учетом неоднородности транспортного потока	91
<i>Лю Юйвэй</i> Совершенствование метода обеспечения пространственно-временного приоритета маршрутных пассажирских транспортных средств на регулируемых перекрестках в условиях неоднородного транспортного потока	95
<i>Лю Юйвэй</i> Повышение эффективности пространственно-временного приоритета маршрутного Пассажирского транспорта методами адаптивного светофорного регулирования и беспроводной детекции ...	100

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Зильберглейт М.А., Николайчик И.В., Мидуков Н.П.</i> Анализ цветовых характеристик макулатуры марок МС-1А – МС-4А методами многомерного статистического анализа	105
<i>Азаров С.М., Дробыш А.А., Гришель О.В., Павловская К.В., Михасик Е.И., Фомихина И.В.</i> Структура и свойства высокопористых материалов, полученных спеканием керамических волокон Е-стекла, модифицированных соединениями бора	112
<i>Азаров С.М., Дробыш А.А., Янецкая А.С., Астапчик Н.И.</i> Моделирование условий сохранения заданной пористости в материалах на основе смесей алюмосиликатных частиц и волокон	119
<i>Шатило В.И., Холод А.А.</i> Получение монокалийфосфата на основе технических продуктов	125
<i>Гребенчук П.С., Душкевич Д.В., Котович Д.В.</i> Применение центробежно-ударных измельчителей для переработки полимерных материалов в производстве RDF-топлива	132
<i>Булавка Ю.А., Жизневская В.С.</i> Использование ГИС-технологий для анализа условий труда и безопасности производственной среды	139
<i>Дронченко В.А., Задохин Д.Д.</i> Влияние на окружающую среду и безопасность шахт изменения гранулометрического состава горной массы за счет корректировки углов установки резцов	144