

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

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

№ 1(51), 2025

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

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

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

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

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

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

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

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

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

Подписано к печати 27.02.2025. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84¹/₈. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 16,82. Тираж 50 экз. Заказ 50.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 658.512

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-2-12

**КЛАССИФИКАТОР КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
С ГРАНИЦАМИ ЗОН ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ОБРАБОТКИ
ОРИГИНАЛЬНЫХ НЕКРУГЛЫХ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)
канд. техн. наук, доц. Н.В. БЕЛЯКОВ, С.К. СЕЛЕЗНЁВ
(Витебский государственный технологический университет)
д-р техн. наук, проф. Б.М. БАЗРОВ
(Институт машиноведения имени А.А. Благодрава
Российской академии наук, Москва)

Предложено направление в развитии подготовки управляющих программ для обработки деталей на металлорежущих станках с ЧПУ на базе типизации параметров зон переходных процессов. Показана возможность создания каталога типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы с границами зон переходных процессов на основе анализа форм обрабатываемых конструктивных элементов, переходов их обработки, а также поверхностей входов-выходов инструментов и их режущих частей. Приводятся фрагменты такого каталога для обработки элементарных цилиндрических внутренних конструктивных элементов сверлением. Предложены соответствующие математические модели для определения параметров размерной настройки оборудования с учетом границ зон переходных процессов. Такой подход создает условия для теоретико-эмпирического имитационного моделирования процессов резания в зонах переходных процессов, обеспечивающего максимальную производительность обработки и стойкость инструментов с учетом воздействия различных факторов, а также сокращения длин рабочих ходов.

Ключевые слова: обрабатываемая поверхность, конструктивный элемент, классификатор, режущий инструмент, ЧПУ, САМ-система, переходный процесс, адаптивные системы, управляющая программа, машиностроение.

Введение. Программирование обработки заготовок деталей машин на металлорежущих станках с числовым программным управлением (ЧПУ) на современных машиностроительных предприятиях осуществляется следующими способами:

- 1) вручную – код программы вводится в текстовом редакторе на персональном компьютере и переносится с помощью носителя информации в управляющую систему станка;
- 2) на стойке – код вводится непосредственно на пульте управления станком, который оснащен клавиатурой и дисплеем для задания команд и визуализации имитации обработки;
- 3) с помощью специализированного программного обеспечения (САМ-систем – Computer Aided Manufactur) – по трехмерной модели детали формируются траектории перемещения инструментов, задаются режимы резания и прочие параметры, а далее с помощью постпроцессора формируется код программы для конкретного станка.

Первый и второй способы применяются на производствах, в основе которых лежат повторяющиеся однотипные переходы и операции обработки несложных по конфигурации заготовок деталей, не требующие больших затрат времени на расчет траекторий, математические и технологические расчеты, а также ввод полочных параметров в систему. Реализация таких операций осуществляется, как правило, на универсальных токарных, фрезерных, сверлильных и других станках с ЧПУ невысокой ценовой категории, а в интеграции станков в единую сеть управления по экономическим соображениям нет необходимости. К пользователям (технологам и операторам) предъявляется требование безусловного владения командами в виде G-кодов.

Третий способ находит применение на производствах сложных по конфигурации заготовок оригинальных некруглых деталей, требующих применения разнообразных переходов и операций. Для их реализации необходимо использовать обрабатывающие центры. Для таких деталей затраты времени на подготовку управляющих программ первым и вторым способами часто в разы превышают затраты времени на обработку. Современные САМ-системы (Mastercam, NX, Solidcam, Edgcam, PowerMill, T-Flex ЧПУ, Компас ЧПУ, Прамень ЧПУ и др.) позволяют значительно сократить время программирования станков с ЧПУ за счет возможности автоматизированного определения траекторий перемещений инструментов и определения ряда технологических параметров, а также объединить оборудование в единую сеть передачи данных.

При проектировании операций обработки на металлорежущих станках с ЧПУ важное значение имеет расчет границ и параметров режимов резания при врезании и выходе инструментов (переходных процессах), а также определение положения систем координат заготовки и инструмента в начальной, промежуточных и конечной точках траекторий резания. Во время врезания и выхода инструментов динамически меняются составляющие силы резания, наблюдаются нестабильность упругих деформаций технологической системы, возрастание уровня вибраций, что существенно влияет на качество обработанной поверхности, может приводить к затуплению, перегреву и поломке инструмента и снижению производительности обработки [1].

Основными направлениями снижения последствий указанных негативных явлений при переходных процессах являются: использование систем адаптивного управления; обеспечение постоянства ряда параметров с помощью изменения режимов резания.

В системах адаптивного управления при переходных процессах используются методы регистрации изменения сил резания и (или) крутящего момента, активной мощности, перемещения слоя металла заготовки, виброакустических сигналов и др. [2–4].

Однако предлагаемые решения адаптивного управления требуют использования специальных сложных и дорогих конструктивных решений, часто являются не в полной мере эффективными ввиду отсутствия математических моделей для управления процессами резания, недостаточности быстродействия механизмов станков, а также отсутствия и (или) невозможности установки из-за неприспособленности станков измерительных датчиков нужных размеров, точности и эффективности.

Параметрами, постоянство которых обеспечивается для снижения негативных последствий переходных процессов, являются: объемная производительность, подача на зуб, погрешность и др. [5; 6]. Особый интерес представляет высокоскоростная обработка, суть которой заключается в том, что при управлении станком при переходных процессах необходимо добиться постоянного малого сечения среза и высокой скорости (в 8–10 раз выше скорости традиционной обработки). При таком подходе из-за постоянной толщины среза уменьшаются колебания сил резания, а выделяющееся тепло переходит не в заготовку и инструмент, а в стружку.

Реализовать высокоскоростную обработку возможно только на самых современных станках с новыми типами приводов главного движения и подач, обеспечивающих соответствующие высокие значения частот вращения шпинделя, подач на рабочем и холостом ходах, дискретность перемещений, конструкциями направляющих, подшипниковых узлов, а также новыми конструкциями режущего и вспомогательного инструментов. Особенности систем ЧПУ для высокоскоростной обработки являются: короткий цикл определения траекторий; заложенные функции искусственного интеллекта (например, система контурного и наноконтурного управления (Modeler Control для Fanuk), система учета износа инструмента); реализация алгоритма просмотра кадров look-ahead со скоростью 100...200 кадров в секунду и др. Стоимость таких станков в сотни раз превышает стоимость традиционных станков с ЧПУ, составляющих по оценкам экспертов 85–95% отечественного станочного парка.

Подготовка управляющих программ для высокоскоростной обработки производится с использованием САМ-систем, что требует соответствующего инструментария. Как показал анализ САМ-систем, одним из лидеров в этом направлении является компания CNC Software (система Mastercam). В системе для обработки фрезерованием предлагается использовать технологию динамических перемещений Dynamic Motion, согласно которой снимаемый припуск разбивается на одинаковые микрообъемы. Далее назначаются режимы резания для удаления этих микрообъемов при каждом срезе материала, и таким образом формируется траектория перемещений инструмента. Схожие подходы предлагаются в системе NX (компания Siemens) в виде автоматической оптимизации подачи Automatic feed rate optimization. Система рассчитывает не микрообъемы снимаемого материала, а их усредненные значения, что позволяет использовать алгоритмы и для традиционной обработки.

Но технологии Dynamic Motion и Automatic feed rate optimization специализируются на обработке фрезями и не предусматривают использования других, например, осевых, инструментов. Так, для обработки сверлением при названных подходах невозможно прогнозировать влияние на качество обработки (точность размеров, шероховатость, допуски формы и расположения) следующих негативных факторов: наростообразование, изменение твердости поверхности заготовки, автоколебания, изменение векторов сил резания и деформация технологической системы, износ инструментов, температурные воздействия и др.

Таким образом, использование систем адаптивного управления, а также известные алгоритмы обеспечения постоянства параметров вносят существенный вклад в решение проблемы обеспечения качества, но имеют ограниченную специфическую область применения.

При подготовке управляющих программ для металлорежущих станков с ЧПУ технологи и операторы чаще всего решают задачи программирования обработки типовых элементарных поверхностей (плоскости, уступы, окна, открытые отверстия и т.п.). Для ускорения процесса их программирования широкое распространение получили стандартные циклы и специальные G-коды, а также калькуляторы режимов резания. Однако, кроме описанного инструментария, современные средства программирования станков с ЧПУ не позволяют для типовых конструктивных элементов и различных форм режущих частей инструментов в автоматическом режиме определять и (или) задавать длины врезаний, устойчивого резания и выходов, координаты начальных, промежуточных и конечных положений инструментов, а также обоснованно при этом менять режимы резания.

Для типовых конструктивных элементов зоны врезания и выхода инструментов можно классифицировать на основе учета форм обрабатываемых поверхностей и режущих частей инструментов, а также рассчитать геометрические параметры этих зон. Классификация и расчет геометрических параметров зон врезания и выхода инструментов позволяют теоретико-эмпирически имитационно моделировать процессы резания в зонах переходных процессов для обеспечения максимальной производительности обработки и стойкости инструментов с учетом воздействия различных негативных факторов.

Поэтому *целью работы* является разработка классификатора типовых решений и математических моделей расчета параметров зон переходных процессов при обработке оригинальных некруглых деталей для последующего управления станком с ЧПУ на их основе.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены задачи: проведен анализ признаков классификации и классификаторов конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы; разработан классификатор типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами переходных процессов для обработки поверхностей деталей; разработаны математические модели для определения параметров размерной настройки оборудования с учетом границ переходных процессов при обработке типовых элементов.

Основная часть. Для исследования и решения поставленных в работе задач использовались методы иерархической классификации, аналитической геометрии, математического моделирования и теории автоматизации. Были проанализированы чертежи деталей, технологические процессы их изготовления, а также каталоги режущих инструментов, литературных источников и интернет-изданий. Объект разработки – классификаторы конструктивно-технологических элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы с границами переходных процессов.

Выполненный анализ информационных источников по систематизации объектов производства и конструктивных элементов различных хронологических периодов показал, что в своем развитии их классификация прошла четыре основных этапа. На первом этапе (до 1940-х гг.) классификация деталей проводилась локально отдельными исследователями на некоторых предприятиях. В это время были заложены идеи типовой и групповой технологий, развиваемые на втором этапе (до 1970-х гг.) учеными А.П. Соколовским, С.П. Митрофановым, Ф.С. Демьянюком, А.Я. Малкиным, В.Б. Гокунном и др. К основным признакам классификации деталей относятся геометрическая форма, точность, габаритные размеры и материал. Этот этап характеризуется разнообразием в классификации деталей по геометрическому признаку. Так, А.П. Соколовский предлагает все многообразие деталей в зависимости от их конфигурации представлять пятнадцатью классами, Ф.С. Демьянюк – семью, а А.Я. Малкин – пятью. Внутри классов в зависимости от технологических особенностей выделяются подклассы, группы, виды, типы. При этом в отдельные классы выделяются некруглые детали сложной формы.

Третий этап (до 2000-х гг.) характеризуется унификацией решений типовой и групповой технологий для создания иллюстрированного определителя деталей общемашиностроительного применения, классификатора ЕСКД, конструкторско-технологического классификатора изделий машиностроения и приборостроения ОКРБ 500-94, а также технологического классификатора ОК 021-95 (разработаны под руководством Е.А. Панфилова, Ю.И., Блохина Н.В. Арбузовой и др.). В частности, классификатор ЕСКД содержит описания деталей шести классов: тела вращения, не относящиеся к телам вращения детали (корпусные, опорные, емкостные) и др. Классы имеют в структуре информацию о виде, подклассе, группе и подгруппе, различающиеся по специальным признакам. Указанные классификаторы решают задачу создания единой системы деталей машиностроения и создают основу работы САПР ТП адресации для несложных по конфигурации деталей типа валов, втулок, осей, зубчатых колес и т.п. (Г.К. Горанский, Н.М. Капустин, И.П. Норенков и др.).

Третий этап также характеризуется созданием основ универсальных САПР ТП синтеза, пригодных для оригинальных некруглых деталей сложной формы. Синтез технологии подразумевает декомпозицию детали на конструктивные элементы (линии, поверхности, симплексы, шестимерные векторы, функциональные модули, элементы конструкции и др.), которые далее объединяются в однородные группы с определением линейных и угловых связей между ними для последующего решения прикладных задач. Так, в работах В.Г. Старостина и В.Е. Лелюхина поверхности предлагается представлять в виде шестимерных векторных матричных форм. В работах В.Д. Цветкова рассматриваются вопросы синтеза единичных технологических процессов на основе многошагового итерационного поиска с помощью классификаторов элементарных поверхностей, согласно которому все конструктивные элементы делятся по кинематическому признаку на классы (вид направляющей), подклассы (вид образующей), группы (уточнение формы образующей), виды (форма по длине) и типы (отношение к материалу). В работах Б.М. Базрова для решения задач организации производства, инструментального обеспечения, проектирования приспособлений и др. впервые предлагается рассматривать деталь не как совокупность взаимосвязанных поверхностей, а как совокупность взаимосвязанных модулей поверхностей (функциональных модулей). Все модули поверхностей разделены на три класса по служебному признаку: базисные, рабочие и связующие. Полная классификация модулей содержит 26 наименований в зависимости от сочетания элементарных поверхностей. Введено понятие интегрального модуля поверхностей и соответствующего ему технологического блока [7–9].

Современный четвертый этап характеризуется разработкой классификаторов для решения прикладных задач кастомизации продукции, обеспечения гибкости производства и ремонта, создания новых методов обработки и нанесения покрытий, формализации, алгоритмизации и автоматизации процедур синтеза технологии и др. Например, в работах Е.А. Кудряшова классификация объектов производства по способу образования и обработки способствует решению задачи восстановления утраченной работоспособности деталей машин. В работах И.Л. Волчекевича предложенный классификатор деталей по схожести конструктивно-технологических признаков используется при планировании программ выпуска участков и цехов машиностроительных предприятий. В работах Ю.А. Харламова для разработки специализированной САПР ТП предложен технологический классификатор изделий машиностроения и их поверхностей с покрытиями, полученными методами газотермического напыления. В работах Д.А. Вишневого проведена систематизация и классификация деталей по условиям изнашивания для развития и совершенствования методов расчета и оценки износа основных видов деталей и узлов машин металлургического комплекса. В работах Ш.Х. Нгуенга классификация и параметризация поверхностей свободной формы призвана способствовать решению задач оптимизации обработки сложных деталей на станках с ЧПУ [10–12].

Однако для решения задач синтеза технологии отсутствуют классификаторы типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами переходных процессов для обработки поверхностей оригинальных некруглых деталей сложной формы, а также соответствующие математические модели для определения параметров размерной настройки оборудования, учитывающие границы этих процессов.

На основе проведенного анализа чертежей и технологических процессов изготовления оригинальных некруглых деталей сложной формы установлено, что все многообразие обрабатываемых элементарных конструктивных элементов таких деталей можно свести по кинематическому признаку их образования к трем основным классам: плоским, вращения и винтовым, а поверхностей врезаний и выходов инструментов – к двум: плоским и вращения. Для формальной идентификации обрабатываемых конструктивных элементов, а также поверхностей врезаний и выходов внутри классов выделен ряд иерархических признаков и определен состав. Так, в класс обрабатываемых поверхностей вращения предлагается включить подклассы: элементарные, продольные и торцовые канавки, а подкласс элементарные предлагается делить на цилиндры и конусы, которые в свою очередь делятся на два вида (с входом-выходом и закрытые) и два типа (наружные и внутренние). А в класс обрабатываемых плоских конструктивных элементов предлагается включить подклассы: плоскости, пазы, выступы и окна, а подкласс пазы предлагается делить на: прямоугольные, трапециевидные, Т-образные и наклонные, которые в свою очередь можно разделить на два вида (с входом-выходом и закрытые).

Установлены теоретически возможные и наиболее часто используемые варианты взаимного расположения обрабатываемых конструктивных элементов и поверхностей врезаний и выходов инструментов. К примеру, ось обрабатываемого элементарного цилиндрического внутреннего конструктивного элемента может пересекаться с осью наружной цилиндрической поверхности вращения под прямым углом и углом, отличным от прямого, скрещиваться под прямым углом и углом, отличным от прямого. Совместный анализ форм поверхностей входов-выходов инструментов, а также обрабатываемых поверхностей позволил предложить систему классификации их взаимных расположений (рисунок 1).

Разработан классификатор переходов обработки конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы, а также таблица соответствия их идентификаторов переходам обработки и видам режущих инструментов в зависимости от поверхностей входов-выходов.

Анализ каталогов фирм производителей режущих инструментов позволил свести все многообразие форм их режущих частей к ряду вариантов. Так, режущие части твердосплавных пластин современных торцовых фрез сводятся к четырем вариантам, а сверл – к восьми: спиральное, шнековое, эжекторное с одноплоскостной заточкой, спиральное с двухплоскостной заточкой; спиральное с закругленными режущими кромками; спиральное конструкции В.И. Жирова и др. [13; 14].

Совместный анализ форм обрабатываемых конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы, переходов их обработки, а также поверхностей входов-выходов инструментов и их режущих частей дает возможность создания каталога типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами зон переходных процессов. На рисунках 2 и 3 показаны фрагменты такого каталога для обработки элементарных цилиндрических внутренних конструктивных элементов сверлением.

На рисунках 2 и 3: L_{ep} – длина врезания $L_{вых}$ – длина выхода; W_n , W_k , E_n и E_n – системы координат заготовки и инструмента в начальных и конечных точках; $L_{нод}$ – длина подвода инструмента (принимается 2...3 мм); $L_{нер}$ – расстояние между системой координат заготовки и точкой начала врезания инструмента; $L_{квых}$ – расстояние между системой координат заготовки и точкой начала выхода инструмента; L_{ep2} – длина врезания, обусловленная геометрией заготовки; $L_{вых1} = L_{ep1}$ – длина врезания (выхода), обусловленная геометрией режущей части; $L_{нер}$ – длина перебега (принимается 2...3 мм); $L_{вых2}$ – длина выхода инструмента, обусловленная геометрией заготовки; $Z_{нер1}$, $Z_{нер2}$, $Z_{квых1}$, $Z_{квых2}$ – координаты начального и конечного положений инструмента в системе координат заготовки.

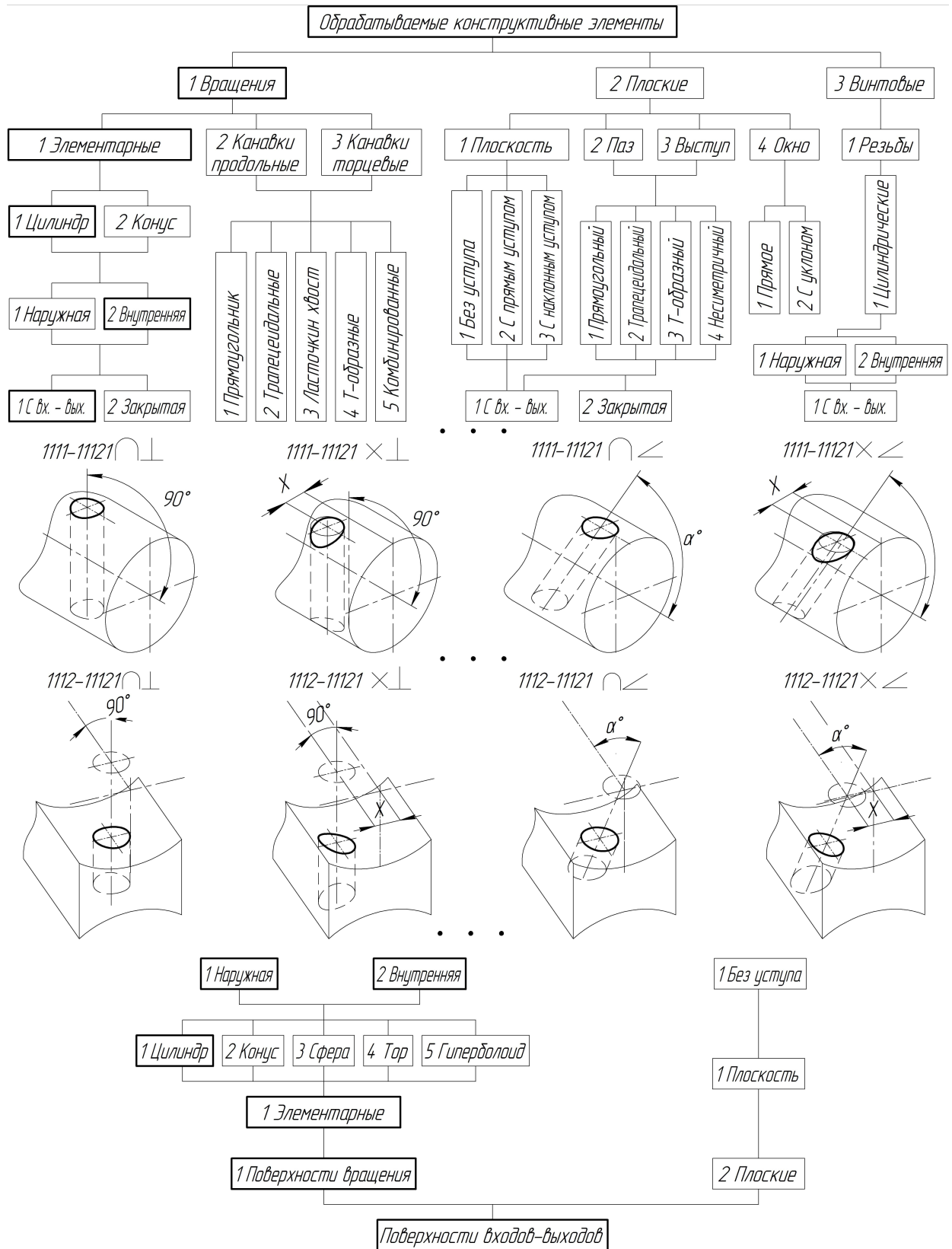


Рисунок 1. – Элементы системы классификации взаимных расположений обрабатываемых конструктивных элементов и поверхностей входов-выходов

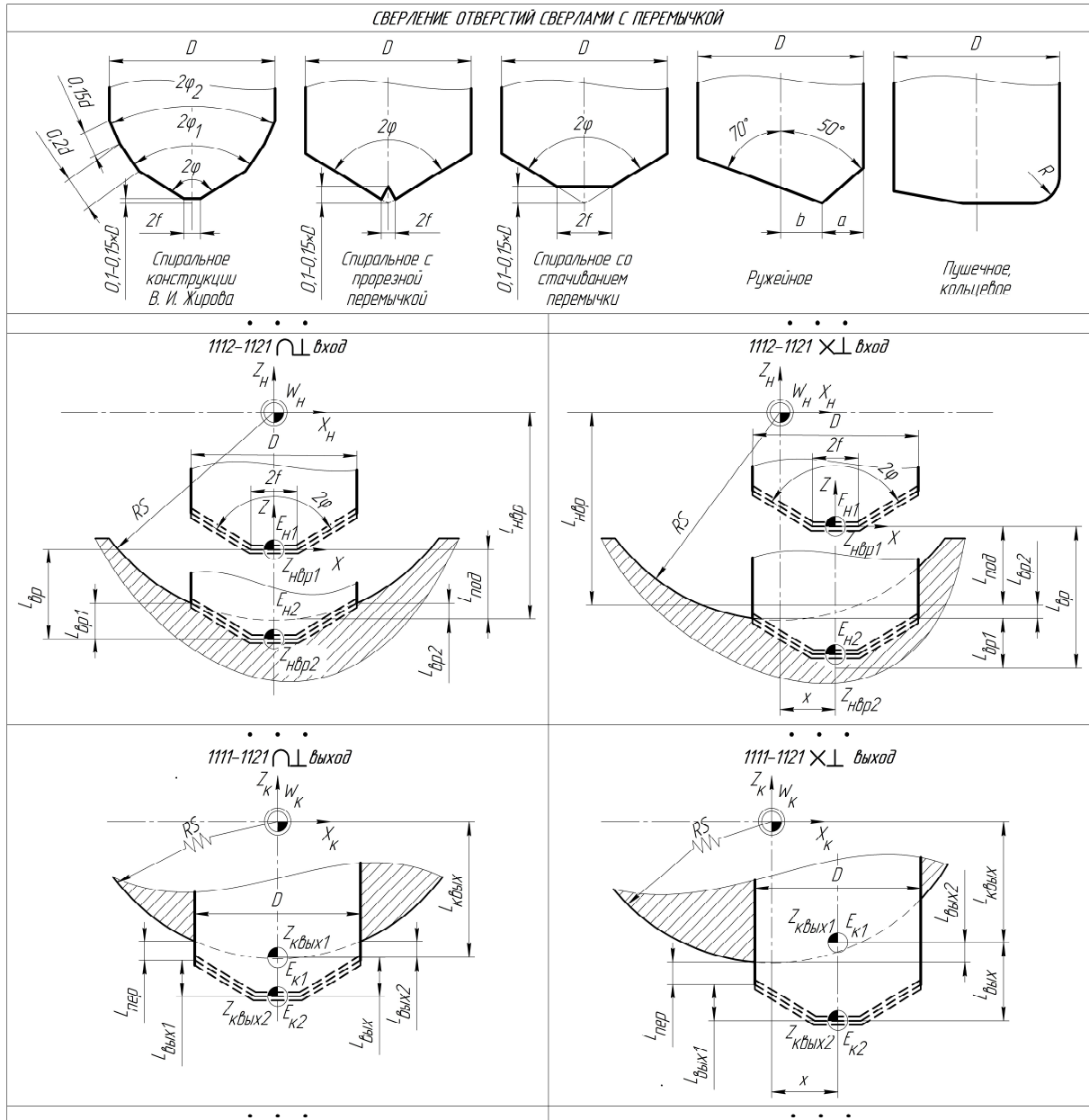


Рисунок 3. – Фрагменты каталога типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами зон переходных процессов (сверление сверлами с перемычкой, а также ружейным, пушечным и кольцевым)

Составлены модели для расчета указанных параметров. Так, например, для варианта «1111-1121 $\cap \perp$ вход» (см. рисунок 2):

$$L_{\text{пер}} = RS, L_{\text{вход}2} = RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, L_{\text{вход}} = L_{\text{под}} + L_{\text{вход}1} + RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$Z_{\text{вход}1} = RS + L_{\text{под}}, Z_{\text{вход}2} = RS - \left(RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - L_{\text{вход}1}.$$

Для варианта «1111-1121 $\times \perp$ вход» (см. рисунок 2):

$$L_{\text{пер}} = \sqrt{RS^2 - x^2}, L_{\text{вход}} = \sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2},$$

$$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + L_{\text{вп1}} + \sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2}, Z_{\text{вп1}} = \sqrt{RS^2 - x^2} + L_{\text{нод}},$$

$$Z_{\text{вп2}} = \sqrt{RS^2 - x^2} - \left(\sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2} \right) - L_{\text{вп1}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\cap \perp$ вход» (см. рисунок 2):

$$L_{\text{вп}} = RS, L_{\text{вп2}} = RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + L_{\text{вп1}} - RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$Z_{\text{вп1}} = -RS + L_{\text{нод}}, Z_{\text{вп2}} = -RS + \left(RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - L_{\text{вп1}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\times \perp$ вход» (см. рисунок 2):

$$L_{\text{вп}} = \sqrt{RS^2 - x^2}, L_{\text{вп2}} = \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2}, L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + L_{\text{вп1}} + \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2},$$

$$Z_{\text{вп1}} = -\sqrt{RS^2 - x^2} + L_{\text{нод}}, Z_{\text{вп2}} = -\sqrt{RS^2 - x^2} - \left(\sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2} \right) - L_{\text{вп1}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\cap \perp$ выход» (см. рисунок 2):

$$L_{\text{кввых}} = RS, L_{\text{кввых2}} = RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, L_{\text{кввых}} = L_{\text{вп}} + L_{\text{кввых1}} + RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$Z_{\text{кввых1}} = RS, Z_{\text{кввых2}} = -RS + \left(RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - L_{\text{вп1}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\times \perp$ выход» (см. рисунок 2):

$$L_{\text{кввых}} = \sqrt{RS^2 - x^2}, L_{\text{кввых2}} = \sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2}, L_{\text{кввых}} = L_{\text{вп}} + L_{\text{кввых1}} + \sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2},$$

$$Z_{\text{кввых1}} = \sqrt{RS^2 - x^2}, L_{\text{кввых2}} = \sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$Z_{\text{кввых2}} = \sqrt{RS^2 - x^2} - \left(\sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2} \right) - L_{\text{кввых1}} - L_{\text{вп}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\times \perp$ вход» (см. рисунок 3):

$$L_{\text{вп}} = \sqrt{RS^2 - (x+f)^2}, L_{\text{вп2}} = \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - (x+f)^2},$$

$$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + L_{\text{вп1}} + \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - (x+f)^2}, Z_{\text{вп1}} = -\sqrt{RS^2 - x^2} + L_{\text{нод}},$$

$$Z_{\text{вп2}} = -\sqrt{RS^2 - (x+f)^2} - \left(\sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - (x+f)^2} \right) - L_{\text{вп1}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\cap \perp$ выход» (см. рисунок 3):

$$L_{\text{кввых}} = \sqrt{RS^2 - f^2}, L_{\text{кввых2}} = BC = \sqrt{DE^2 - BE^2} - \sqrt{AD^2 - AC^2} = \sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$L_{\text{кввых}} = L_{\text{кввых1}} + L_{\text{вп}} - \sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, Z_{\text{кввых1}} = -\sqrt{RS^2 - f^2},$$

$$Z_{квых2} = -\sqrt{RS^2 - f^2} - L_{вых1} - L_{неп} + \left(\sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right).$$

Для варианта «1112-1121 × ⊥ выход» (см. рисунок 3):

$$L_{квых} = \sqrt{RS^2 - f^2}, L_{вых} = L_{вых1} + L_{неп} - \sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, Z_{квых1} = -\sqrt{RS^2 - f^2},$$

$$Z_{квых2} = -\sqrt{RS^2 - f^2} - L_{вых1} - L_{неп} + \left(\sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right).$$

Для спирального, шнекового и эжекторного сверл с одноплоскостной заточкой

$$L_{сп1} = \frac{D}{2 \operatorname{tg} \phi};$$

для спирального сверла с двухплоскостной заточкой

$$L_{сп1} = \frac{D - 0, 2D \cdot \sin \phi_1}{2 \operatorname{tg} \phi} + 0, 2D \cdot \cos \phi_1;$$

для сверла с закругленной режущей кромкой

$$L_{сп1} = R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}};$$

для спирального сверла конструкции В.И. Жирова

$$L_{сп1} = \left(\frac{D}{2} - f - 0, 2D \cdot \sin \phi_1 - 0, 15D \cdot \sin \phi_2 \right) \cdot \operatorname{ctg} \phi + 0, 2D \cdot \sin \phi_1 \cdot \operatorname{ctg} \phi_1 + 0, 15D \cdot \sin \phi_2 \cdot \operatorname{ctg} \phi_2;$$

для спирального сверла с прорезной перемычкой

$$L_{сп1} = \left(\frac{D}{2} - f \right) \cdot \operatorname{ctg} \phi;$$

для спирального сверла со стачиваемой перемычкой

$$L_{сп1} = \left(\frac{D}{2} - f \right) \cdot \operatorname{ctg} \phi;$$

для ружейного сверла

$$L_{сп1} = a \cdot \operatorname{ctg} \phi_1;$$

для пушечного, кольцевого, со сменными пластинками

$$L_{сп1} = R.$$

Заключение. Разбор современных тенденций в управлении металлорежущими станками с ЧПУ позволил предложить направление в развитии подготовки управляющих программ для обработки деталей на основе типизации параметров зон переходных процессов.

Проведенный анализ форм обрабатываемых конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы, переходов их обработки, а также поверхностей входов-выходов инструментов и их режущих частей дает возможность создания каталога типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами зон переходных процессов. Приводятся фрагменты такого каталога для обработки элементарных цилиндрических внутренних конструктивных элементов сверлением, а также соответствующие математические модели для определения параметров размерной настройки оборудования с учетом границ зон переходных процессов.

Классификация и типизация зон входов-выходов инструментов при программировании обработки деталей на станках с ЧПУ создает условия для сокращения затрат машинного времени за счет уменьшения длин рабочих ходов, а также для теоретико-эмпирического имитационного моделирования процессов резания в зонах переходных процессов, обеспечивающего максимальную производительность обработки и стойкость инструментов с учетом воздействия различных факторов.

Разработки могут использоваться: в IT-компаниях для совершенствования САМ-систем при создании фитчеров и макросов, а также развития стандартных циклов обработки; в технологических бюро предприятий

для программирования оборудования с ЧПУ и проектировании наладок станков; в учебном процессе для подготовки специалистов в области машиностроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солодков В.А., Карчаидзе А.А. Особенности единичного цикла процесса прерывистого резания // Вопросы науки и образования. – 2020. – № 20(104). – С. 4–10.
2. Козочкин М.П., Порватов А.Н., Дуйсенгали А. Система адаптивного управления станочным оборудованием по сигналам вибрации и активной мощности // Автоматизация и управление в машиностроении. – 2016. – № 1(23). – С. 17–25.
3. Мустафаев Г.А., Сидорчик Е.В. Использование датчиков адаптивного управления для повышения качества обработки деталей на станке с ЧПУ // Молодой ученый. – 2013. – № 9(56). – С. 60–62.
4. Каштальян И.А., Шелег В.К., Орукари Б. Дискретное управление процессами резания на токарных станках с числовым программным управлением // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 4. – С. 115–126.
5. Automated feed rate optimization with consideration of angular velocity according to workpiece shape / P. Vavruska, M. Pesice, P. Zeman et al. // Results in Engineering. – 2022. – Vol. 16. – 100762. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100762
6. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Параметрическое управление подачей при фрезеровании сложных поверхностей на станках с ЧПУ // Изв. Тул. гос. уни-та. Техн. науки. – 2017. – № 8-1. – С. 59–64.
7. Цветков В.Д., Ящерицын П.И. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. – Минск: Наука и техника, 1979. – 261 с.
8. Лелюхин В.Е. Классификация методов формообразования поверхностей при изготовлении детали // Вестн. инженер. школы ДВФУ. – 2012. – № 1(10). – С. 14–17.
9. Базров Б.М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства. – М.: КУРС, 2023. – 324 с.
10. Кудряшов Е.А., Алтухов А.Ю., Лунин Д.Ю. Технологический классификатор деталей и поверхностей, подлежащих обработке резанием // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2009. – № 4(45). – С. 3–8.
11. Волчкевич И.Л., Галий В.В. О задачах классификации деталей на ранних этапах проектирования технологических комплексов // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. – 2015. – № 10. – С. 100–107.
12. Нгуен Ш.Х. О классификации поверхностей свободной формы: обзор // Новая наука: Современное состояние и пути развития. – 2016. – № 12-4. – С. 99–105.
13. Беляков Н.В., Попок Н.Н. Основы автоматизированного проектного базирования в субтрактивном и аддитивном машиностроительных производствах. – Витебск: Витеб. гос. технол. ун-т, 2023. – 183 с.
14. Попок Н.Н., Беляков Н.В., Селезнёв С.К. Система поддержки принятия решений по определению параметров размерной настройки сверл для программирования обработки отверстий на станках с ЧПУ // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2023. – № 2(14) – С. 50–63.

REFERENCES

1. Solodkov, V.A. & Karchaidze, A.A. (2020). Osobennosti edinichnogo tsikla protsessa preryvistogo rezaniya. *Voprosy nauki i obrazovaniya*, 20(104), 4–10. (In Russ.).
2. Kozochkin, M.P., Porvatov, A.N. & Duisengali, A. (2016). Sistema adaptivnogo upravleniya stanochnym oborudovaniem po signalam vibratsii i aktivnoi moshchnosti. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashinostroenii*, 1(23), 17–25. (In Russ.).
3. Mustafae, G.A. & Sidorchik, E.V. (2013). Ispol'zovanie datchikov adaptivnogo upravleniya dlya povysheniya kachestva obrabotki detalei na stanke s ChPU. *Molodoi uchenyi*, 9(56), 60–62. (In Russ.).
4. Kashtal'yan, I.A., Sheleg, V.K. & Orukari, B. (2015). Diskretnoe upravlenie protsessami rezaniya na tokarnykh stankakh s chislovyim programmnyim upravleniem [Discrete control of cutting processes on lathes with numerical control]. *Vesti NAN Belarusi. Seryya fizika- tekhnicheskikh nauk [News of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Technology Series. Sci.]*, (4), 115–126. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Vavruska, P., Pesice, M., Zeman, P. & Kozlok, T. (2022). Automated feed rate optimization with consideration of angular velocity according to workpiece shape. *Results in Engineering*, (16), 100762. DOI 10.1016/j.rineng.2022.100762 (In Engl.).
6. Kozlov, A.M. & Maluyutin, G.E. (2017). Parametricheskoe upravlenie podachei pri frezerovani slozhnykh poverkhnostei na stankakh s ChPU [Parametric feed control when milling complex surfaces on CNC machines]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [News of Tula State University. Technical science]*, (8-1), 59–64. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Tsvetkov, V.D. & Yashcheritsyn, P.I (1979) *Sistemno-strukturnoe modelirovanie i avtomatizatsiya proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov*. Minsk: Nauka i tekhnika. (In Russ.).
8. Lelyukhin, V.E. (2012). Klassifikatsiya metodov formoobrazovaniya poverkhnostei pri izgotovlenii detali [Classification of methods for shaping surfaces in the manufacture of parts]. *Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU [Vestnik of the FEPU engineering school]*, 1(10), 14–17. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Bazrov, B.M. (2023). *Bazis tekhnologicheskoi podgotovki mashinostroitel'nogo proizvodstva*. Moscow: KURS. (In Russ.).
10. Kudryashov, E.A., Altukhov, A.Yu & Lunin, D.Yu (2009). Tekhnologicheskii klassifikator detalei i poverkhnostei, podlezhashchikh obrabotke rezaniem [Technological classifier of parts and surfaces subject to cutting] *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) [Metal processing (technology, equipment, tools)]*, 4(45), 3-8. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Volchkevich, I.L. & Galii, V.V. (2015). O zadachakh klassifikatsii detalei na rannikh etapakh proektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov [On the tasks of classifying parts at the early stages of designing technological complexes]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [News of Tula State University. Technical science]*, (10), 100–107. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Nguen, Sh. Kh. (2016). O klassifikatsii poverkhnostei svobodnoi formy. *Novaya nauka: Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya*, (12-4), 99–105. (In Russ.).

13. Belyakov, N.V., & Popok, N.N (2023) *Osnovy avtomatizirovannogo proektnogo bazirovaniya v subtraktivnom i additivnom mashinostroitel'nykh proizvodstvakh [Fundamentals of automated design basing in subtractive and additive engineering industries]*. Vitebsk: Vitebsk State Technological University. (In Russ.).
14. Popok N.N., Belyakov N.V. & Seleznev S.K. (2023) Sistema podderzhki prinyatiya reshenii po opredeleniyu parametrov razmernoj nastroyki sverl dlya programmirovaniya obrabotki otverstii na stankakh s ChPU [Decision support system for determining the parameters of dimensional adjustment of drills for programming the processing of holes on CNC machines]. *Vestnik BarGU. Seriya Tekhnicheskie nauki [Vestnik of BarSU. Series Technical science]*, 2(14), 50–63. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 26.11.2024

**CLASSIFIER OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL ELEMENTS
WITH BOUNDARIES OF TRANSITION ZONES FOR PROCESSING PROGRAMMING
ORIGINAL NON-ROUND PARTS ON CNC MACHINES**

N. ПОПОК

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

N. BELYAKOV, S. SELEZNEV

(Vitebsk State Technological University)

B. BAZROV

*(Mechanical Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences, Moscow)*

A direction in the development of the preparation of control programs for machining parts on CNC metal-cutting machines based on the typification of parameters of transient zones is proposed. The possibility of creating a catalog of typical parameterized structural and technological elements of original non-circular parts of complex shape with boundaries of transition zones based on the analysis of shapes of processed structural elements, transitions of their processing, as well as surfaces of inputs and outputs of tools and their cutting parts is shown. Fragments of such a catalog are given for processing elementary cylindrical internal structural elements by drilling. Appropriate mathematical models are proposed to determine the parameters of dimensional adjustment of equipment, taking into account the boundaries of transient zones. This approach creates conditions for theoretical and empirical simulation of cutting processes in transition zones, ensuring maximum processing performance and tool durability, taking into account the effects of various factors, as well as reducing the length of working strokes.

Keywords: *work surface, structural element, classifier, cutting tool, CNC, CAM system, transient process, adaptive systems, control program, mechanical engineering.*

УДК 629.3

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-13-19

**КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ
МОБИЛЬНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН****д-р техн. наук, доц. С.А. РЫНКЕВИЧ****(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;
Белорусско-Российский университет, Могилев)**

Рассмотрены вопросы, связанные с контролем и мониторингом механических и гидромеханических передач, которыми оснащены многие мобильные и технологические машины. Проанализированы факторы, влияющие на работоспособность зубчатых передач тех и других трансмиссий. Отмечено, что концентрация нагрузки по длине контактных линий зубчатых зацеплений возникает из-за погрешностей расположения зубьев, упругих деформаций зубьев, валов и их опор. С помощью метода конечных элементов, реализованного в программе конечно-элементного анализа, исследованы показатели, используемые при оценке технического состояния зубчатых зацеплений, входящих в состав гидромеханических передач. Установлено, что работа, затраченная на преодоление силы трения поверхностей зубчатых передач, в основном расходуется на выделение теплоты и изменение внутренней энергии деформируемого объема металла поверхностных слоев. При этом при трении поверхности сопряженных зубьев одновременно катятся и скользят одна относительно другой. Приведены полученные автором результаты анализа напряженно-деформированного состояния зубьев зубчатых зацеплений, которые показывают, что изменение нагрузки, ее неравномерность, перегрев и другие факторы приводят к деформациям зубьев и концентрациям максимальных напряжений в областях впадин и ножек зубьев. При этом постоянный процесс изнашивания снижает ресурс зубчатой передачи.

Ключевые слова: гидромеханическая передача, механическая передача, мобильная машина, технологическая машина, техническое состояние, зубчатое зацепление.

Введение. Для эффективного выполнения мобильными и технологическими машинами, оборудованными механическими и гидромеханическими передачами, транспортной или технологической работы, повышения долговечности и ресурса, а также обеспечения работоспособности необходимо непрерывно в режиме реального времени отслеживать их техническое состояние.

Условия эксплуатации машин с такими передачами являются довольно сложными и многообразными. Долговечность этих машин, т.е. их способность длительное время сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при определенных условиях эксплуатации, зависит от качества и своевременности контроля их технического состояния.

Основная часть. К мобильным машинам относятся автотранспортные средства (грузовые автомобили, легковые автомобили, автобусы), автомобили-самосвалы, автопоезда и т.п. К транспортным технологическим машинам относятся строительно-дорожная техника, подъемно-транспортные машины, путевые машины, машины для погрузки и перевозки различных сыпучих грузов, машины фрезерные, лесовозы, манипуляторы, форвардеры, контейнеры и т.д. Анализ состояния работоспособности мобильных и технологических машин в зависимости от условий функционирования и выбранных оценочных критериев производится на основе теоретических положений по оценке износа деталей и их прочности, а также герметичности и работоспособности гидравлических и гидромеханических устройств.

Рассмотрим параметры и показатели оценки технического состояния механических (МП) и гидромеханических (ГМП) передач.

Различные эксплуатационные факторы и нештатные ситуации вызывают возмущения, действующие на зубчатые зацепления в процессе работы МП и ГМП. Под воздействием этих возмущений изменяются параметры и характеристики МП и ГМП, причем случайный характер возмущений приводит к рассеянию этих характеристик.

Развитие отказа во времени показано на рисунке 1. Если в качестве обобщенного параметра, характеризующего работоспособность МП и ГМП, выбрать вектор $\vec{Y}(y_1, y_2, \dots, y_n)$ (его компонентами для фрикционных и зубчатых зацеплений коробок передач могут быть величины давления, расхода, частоты вращения, температуры, износа как результата изнашивания, интенсивности линейного изнашивания и т.д.), то возникновение внезапных и постепенных отказов определяется скоростью изменения i -го параметра $\frac{dy_i}{dt}$.

По графикам на рисунке 1 можно проследить процесс возникновения внезапных и постепенных отказов.

Момент времени t_0 характеризует длительность предыдущей работы элемента. Резкое, скачкообразное изменение значения параметра y_i приводит к тому, что в момент времени t_1 оно выйдет за пределы допустимых

значений, ограниченные соответствующими порогами (минимальным y_{\min} и максимальным y_{\max} значениями параметра). Произойдет внезапный отказ. Основным признаком внезапных отказов является независимость момента t_1 его возникновения от длительности предыдущей работы элемента. Примерами таких отказов могут служить отказы из-за возникновения трещин при неправильной эксплуатации или возникновения перегрузок, поломок и деформаций деталей в условиях работы, когда каждый параметр принимает экстремальные значения (наибольшая нагрузка, минимальная прочность материала, повышенная температура и т.д.).

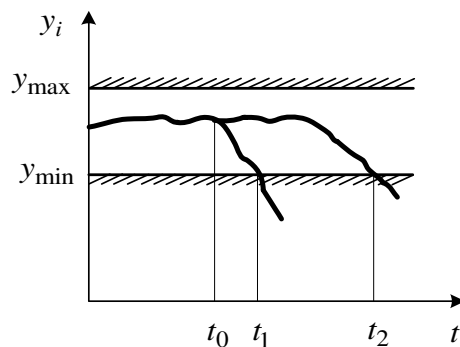


Рисунок 1. – Характеристики изменения параметра y_i во времени t

Условимся считать *параметрами* такие величины y_i , по которым можно судить о состоянии объекта. Рассмотрим типы параметров.

Номинальное (начальное) значение параметра y_n определяется проектно-конструкторской документацией и качеством изготовления изделия. Превышение предельного значения приводит к отказу изделия и недопустимо.

Предельно допустимое значение $y_{\text{пр}}$ предшествует предельному и сигнализирует о необходимости принятия мер по восстановлению технического состояния.

Текущее значение параметра y_i характеризует фактическое техническое состояние изделия. Параметров y_i , определяющих техническое состояние МП и ГМП, несколько (их, как правило, выбирают от 5 до 20).

В процессе эксплуатации МП и ГМП параметры технического состояния изменяются от номинального y_n до текущего, затем до предельно допустимого $y_{\text{пр}}$ и, наконец, до предельного значения под влиянием различных конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов.

Различают также прямые и косвенные параметры. Первые непосредственно характеризуют состояние объекта, а вторые связаны с прямыми параметрами функциональной зависимостью.

Параметры верхнего иерархического уровня детализации технического объекта будем считать *показателями*. Показатели (их еще называют критериями) бывают трех видов.

Технические показатели (критерии) характеризуют предельное состояние составных частей, когда они не могут больше выполнять свои функции по техническим причинам. Например, предельный износ зуба зубчатого колеса делает тонкой ножку этого зуба, что может привести к излому, или же предельный износ фрикционных дисков может привести к пробуксовке при включении передачи. Возможна также ситуация, когда дальнейшая эксплуатация объекта приведет к аварийному отказу (например, работа автомобиля при предельном износе тормозных колодок может привести к аварии).

Технико-экономические показатели (критерии), характеризующие предельное состояние, указывают на снижение эффективности использования объекта вследствие изменения технического состояния (например, при предельном износе цилиндропоршневой группы ДВС угар картерного масла увеличивается более чем на 4%, что указывает на нецелесообразность работы машины с таким двигателем).

Технологические показатели (критерии) характеризуют резкое ухудшение качества выполнения работ по причине предельного состояния рабочих органов машин. Примером может служить выход из строя гидравлической системы фронтального погрузчика, при котором он не может качественно загружать своим ковшем сыпучие грузы, при этом резко снижается производительность погрузчика.

Факторы, влияющие на работоспособность зубчатых передач трансмиссий. На работоспособность зубчатого зацепления, которое приобретает сложную форму в процессе изнашивания и старения, влияют внешние и внутренние факторы.

Внешние факторы:

- значение и характер прилагаемой нагрузки, т.е. сил и моментов;
- концентрация нагрузки по длине зубьев;
- экстремальные перегрузки ударного и статического действия;
- наличие абразивных частиц или веществ, вызывающих коррозию.

Внутренние факторы:

- неподвижность посадочных поверхностей зубчатого колеса и вала;
- характер взаимодействия контактирующих поверхностей;
- взаимное расположение деталей;
- накопление усталостных повреждений.

Концентрация нагрузки по длине контактных линий возникает из-за погрешностей расположения зубьев, упругих деформаций зубьев, валов и их опор. Наличие перечисленных факторов приводит к тому, что сопряженные профили зубьев без нагрузки контактируют не по всей длине. При нагружении зубья деформируются и контактируют по всей длине.

Переменные напряжения являются причиной усталостного разрушения зубьев. В результате происходит поломка зубьев от напряжений изгиба и выкрашивание поверхности от контактных напряжений (рисунок 2). Усталостный излом зубьев является одним из наиболее опасных видов повреждений. Такие изломы происходят в результате воздействия переменных напряжений, которые имеют достаточно большую продолжительность.

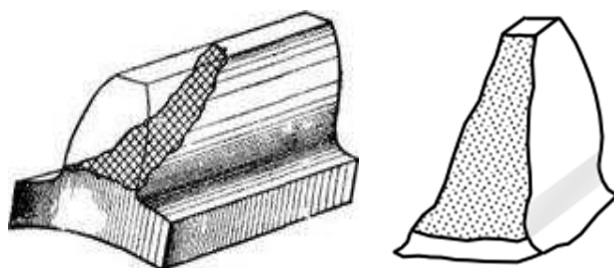
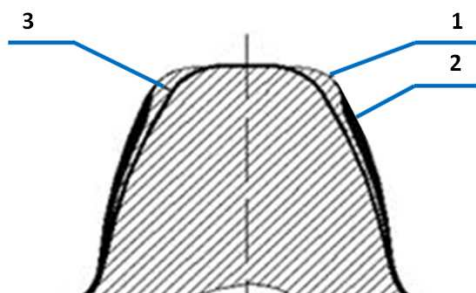


Рисунок 2. – Излом зубьев

Излом зубьев связан с напряжениями изгиба. Может происходить такое негативное явление, как выламывание углов зубьев вследствие концентрации нагрузки.

Изломы зубьев зачастую вызваны чрезмерными перегрузками, которые могут носить ударный или статический характер. Причиной может стать также усталость материала ввиду многократно повторяющихся нагрузок. При этом имеет место процесс накопления повреждений под действием переменных (часто циклических) напряжений с образованием и развитием трещин. Изломы зубьев в МП и ГМП зачастую возникают из-за воздействия динамических ударов. Излом зуба может привести к достаточно тяжким последствиям, вплоть до разрушения валов и подшипников.

Отслаивание твердого поверхностного слоя зубьев (рисунок 3) происходит при резком изменении температурного режима зацепления, когда рост внутренних напряжений приводит к тому, что хрупкая корка зубьев не имеет под собой достаточно прочной сердцевины. Отслаивание возникает из-за перегрузок. Отслаиванию способствует также то обстоятельство, когда под поверхностным слоем величина приведенных контактных напряжений становится достаточно большой. В результате периодического действия глубинных напряжений под упрочненным слоем могут возникнуть усталостные трещины, развитие которых приводит к отслаиванию отдельных участков поверхностного упрочненного слоя. Возможность появления отслаивания существенно зависит от соотношения толщины упрочненного слоя и величины приведенного радиуса кривизны соприкасающихся зубьев.



1 – первоначальный профиль зуба; 2 – разрушения поверхности зуба при заедании;
3 – профиль зуба после отслаивания

Рисунок 3. – Изменение форма профиля зубьев колеса

Разрушение поверхности зуба может происходить и в случае заедания зацепления (см. рисунок 3).

Условием возникновения заедания является разрушение пленки смазочного материала, разделяющей трущиеся металлические поверхности. Заедание зубьев, собственно говоря, – это местное молекулярное сцепление (микросварка) сопряженных поверхностей зубьев вследствие разрушения смазочной пленки и местного повышения температуры при относительном скольжении в зоне контакта.

Для предотвращения появления эффекта заедания зубьев следует повышать твердость поверхностей, а также правильно подбирать противозадирные масла.

Присутствие абразивных веществ, которые вызывают коррозию, порождают и такие явления, как абразивный износ, коррозия поверхности зубьев. Абразивные частицы могут также способствовать возникновению газовой или жидкостной эрозии. Основная причина коррозии, конечно же, – наличие воды в смазочном материале. Коррозия проявляется в виде равномерного (рисунок 4, а) или неравномерного слоя (рисунок 4, б) ржавчины на поверхности зубьев. Происходит самопроизвольное разрушение металла в результате химического и физико-химического взаимодействия с окружающей средой. Причиной коррозии служит термодинамическая неустойчивость используемых конструкционных материалов к воздействию веществ, находящихся в контактирующей с ними среде. Степень коррозии может быть различной – от незначительной местной точечной или контактной коррозии до сплошной общей коррозии.

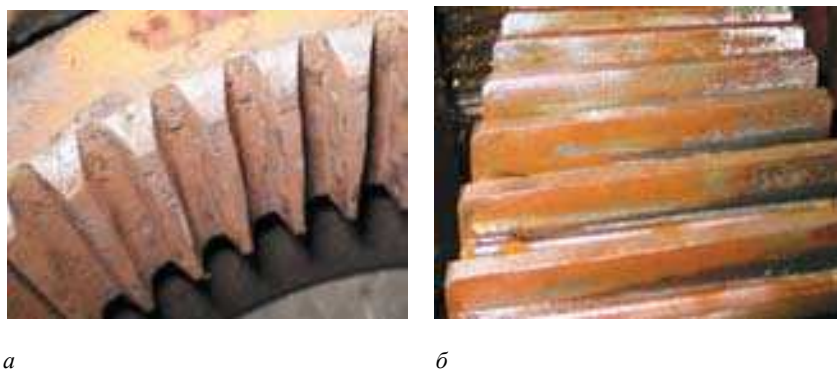


Рисунок 4. – Следы коррозии на поверхности зубьев на равномерном (а) и неравномерном (б) слоях

Факторы, влияющие на работоспособность зубчатых передач трансмиссий, можно выразить численно и использовать аналитически.

Например, для отслеживания характера (динамики) процесса изнашивания можно использовать показатели величины износа y_n (мм или мкм) и скорости износа $\frac{dy_n}{dt}$ (мкм/ч).

Для контроля и мониторинга геометрических и кинематических параметров зубчатых зацеплений МП и ГМП можно использовать показатели и коэффициенты, применяемые в дисциплинах «Основы проектирования машин» и «Детали машин», а также те, которые регламентируются стандартами.

Следует учесть, что проблемой оценки состояния зубчатых передач является кумулятивный эффект накопления дефектов. Степень опасности этих накопленных дефектов зависит как от свойств материала, из которого изготовлены зубчатые передачи, так и от сложности условий эксплуатации.

Анализ изменения параметров и показателей технического состояния механических и гидромеханических передач. Следует отметить, что на современном этапе существует ряд тенденций в изменении технологических и точностных требований к зубчатым колесам и их зацеплениям. Требования к зубчатым передачам становятся жестче, и это обстоятельство связано со сложностью условий эксплуатации и необходимостью увеличить КПД устройств и механизмов, куда входят детали с зубчатым венцом. Это, прежде всего, редукторы и коробки передач. Эти требования тесно связаны с необходимостью снижать стоимость, уровень шума, массу и габаритные размеры; повышать надежность; увеличивать передаваемые момент и мощность; улучшать динамические характеристики; повышать коэффициент полезного действия; увеличивать срок службы и ремонтно-пригодность.

Правильный выбор параметров, которые подвергаются анализу и мониторингу, позволяет выявить такие опасные дефекты и явления, как:

- появление значительного перегрева;
- появление чрезмерного шума;
- достижение предельных значений напряжений изгиба;
- появление критических размеров усталостной трещины;
- повышение контактного давления и нарушение работы передачи;

- значительное увеличение внешнего давления при работе передачи, при котором смазочный материал заходит в микротрещины, расклинивая их;
- нарушение условия образования сплошной масляной пленки;
- увеличение зазоров в зацеплении и потеря кинематической точности;
- возникновение зазора в подшипнике, при котором ось вращения зубчатого колеса смещается, и при замыкании фрикциона происходит неравномерный износ зубьев по диаметру делительной окружности;
- приваривание частиц материала одного зуба к другому, при котором разрушается смазочная пленка из-за местного нагрева, что происходит вследствие высоких давлений и скоростей скольжения в зоне контакта.

Исследованиями установлено, что для контроля и анализа перечисленных выше негативных состояний МГМП для рассмотренного выше вектора работоспособности \bar{Y} достаточно выбрать 12 текущих (изменяющих свои значения) параметров, т.е. Y_i , $i=1$ ¹². Эти параметры носят механическую, тепловую и электрическую природу,

позволяя современными средствами микроэлектроники фиксировать изменение частоты вращения валов, величину износа фрикционных дисков, изменения диаметра зазоров в подшипниковых узлах, температуру в коробке передач, вибрационные сигналы (виброперемещения, виброскорости и виброускорения) и т.д.

Совместными исследованиями с конструкторами завода «БелАЗ» установлено, что дефекты в зубчатых зацеплениях гидромеханических коробок передач возникают при возникновении таких неблагоприятных факторов и явлений, как повышенный износ в области контакта зубчатого зацепления при длительной эксплуатации; появление значительных следов деформации на рабочей поверхности зубчатой передачи; появление на площадках контакта напряжений, превышающих предел выносливости материала; превышение напряжений, действующих на площадках контактов, предела текучести, что вызывает пластические сдвиги на рабочей поверхности зубчатой передачи; возникновение динамических ударов, связанных с непостоянством частоты вращения и изменением направления вращения валов; появление абразивных частиц или веществ, вызывающих коррозию и абразивный износ.

С помощью метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в программе конечно-элементного анализа в ОКБ ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компании холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», были исследованы показатели, используемые при оценке технического состояния зубчатых зацеплений, входящих в состав гидромеханических передач.

На рисунке 5 показано распределение перемещений \bar{u} , возникающих в зубе колеса в процессе работы зацепления. Максимальный прогиб зуба, равный 0,17 мм (на рисунке отмечен стрелкой), соответствует вершине головки зуба. Таким образом, в процессе изнашивания поверхностей (ввиду непрерывного трения) имеет место некоторый изгиб со смещением, что влияет на точность расположения пятна контакта.

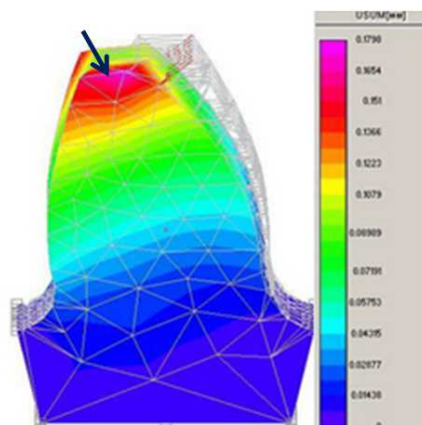


Рисунок 5. – Окно отклика программы МКЭ, отражающее перемещения, возникающие в зубе в процессе его работы

На рисунке 6 показано распределение напряжений в элементах зуба зубчатого колеса, которое приводит в движение механизм технологической машины. Видно, что максимальные напряжения сконцентрированы на поверхностях ножки зуба и его кромках. При этом изнашивание поверхностей зуба носит начальный характер, а напряжения распределены практически равномерно и не достигают опасных значений.

Следует отметить важную особенность зубчатых зацеплений МП и ГМП машин различного назначения. Эта особенность состоит в том, что при работе зубчатой передачи линия контакта зубьев перемещается по высоте зуба, и при этом меняется плечо силы. В процессе работы передачи пара зубьев входит в зацепление сразу

по всей длине линии контакта, что сопровождается ударом зубьев. После этого линия контакта перемещается по высоте зуба, оставаясь параллельной оси.

При составлении расчетной схемы работы зубчатого зацепления на изгиб (что важно при трехмерном моделировании) зуб можно представить как консольную балку с нагрузкой, распределенной по линии контакта.

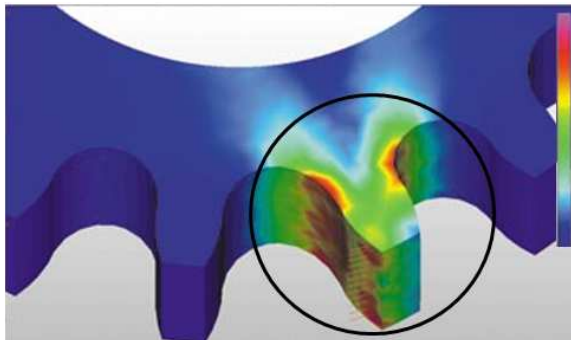


Рисунок 6. – Распределение напряжений в элементах зуба приводного колеса

Установлено, что работа, затраченная на преодоление силы трения поверхностей зубчатых передач, в основном расходуется на выделение теплоты и изменение внутренней энергии деформируемого объема металла поверхностных слоев. При этом при трении поверхности сопряженных зубьев одновременно катятся и скользят один относительно другой.

Приведенные выше результаты анализа напряженно-деформированного состояния зубьев зубчатых зацеплений показывают, что изменение нагрузки, ее неравномерность, перегрев и другие факторы приводят к деформациям зубьев и концентрациям максимальных напряжений в областях впадин и ножек зубьев. При этом постоянный процесс изнашивания снижает ресурс зубчатой передачи.

Передача нагрузки в зубчатом зацеплении осуществляется при касании боковых профилей сопряженных зубьев. Результатом этого взаимодействия (давление зубьев друг на друга) является сложнапряженное состояние. При этом нагружается и поверхность зубьев (имеет место линейный контакт), и весь объем зуба.

В связи с этим работоспособность зубчатой передачи следует оценивать по контактной прочности боковой поверхности зубьев и объемной прочности зуба в случае сложного нагружения. При этом следует учесть, что нагрузка на зуб непостоянна и изменяется она по пульсирующему прерывистому циклу. Другими словами, это нагрузка с установившимся во времени характером изменения, значения которой повторяются через определенный промежуток времени.

Практические исследования подтвердили, что при недостаточной контактной прочности поверхностей зубьев происходит усталостное выкрашивание рабочих поверхностей и излом зубьев (рисунок 7).

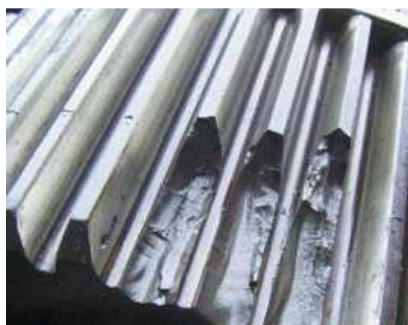


Рисунок 7. – Излом зубьев из-за воздействия динамических ударов

Такой вид дефекта возникает из-за действия повторно-переменных контактных напряжений. В местах постоянного контакта зубьев развивается наибольшая сила трения, при этом появляются микротрещины, что ведет к образованию маленьких ямок, переходящих в раковины.

Заключение. Для контроля и анализа возникающих дефектов в механических и гидромеханических передачах мобильных и технологических машин следует использовать определенную совокупность диагностических параметров (в количестве 10–12), которые могут носить механическую, гидромеханическую, тепловую и электрическую природу. Такой контроль позволяет современными средствами микроэлектроники фиксиро-

вать изменение частоты вращения валов, величину износа фрикционных дисков, изменения диаметра зазоров в подшипниковых узлах, температуру в коробке передач, степень износа зубьев зубчатых зацеплений, а также вибрационные сигналы (виброперемещения, виброскорости и виброускорения). Выявлено, что причиной коррозии служит термодинамическая неустойчивость используемых конструкционных материалов к воздействию веществ, находящихся в контактирующей с ними среде. Установлено, что работа, затраченная на преодоление силы трения поверхностей зубчатых передач, в основном расходуется на выделение теплоты и изменение внутренней энергии деформируемого объема металла поверхностных слоев. При недостаточной контактной прочности поверхностей зубьев происходит усталостное выкрашивание рабочих поверхностей и излом зубьев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рынкевич С.А. Автоматизация диагностирования механических и гидромеханических трансмиссий // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. В 2 т. / отв. ред. Д.В. Капский [и др.]. – Минск: БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 46–50.
2. Рынкевич С.А. Управление и диагностирование гидрофицированных трансмиссий: состояние, проблемы и перспективы развития // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 77–88.
3. Рынкевич С.А. Активный мониторинг сложных элементов гидромеханических передач мобильных машин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 1(49). – С. 71–78. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78
4. Рынкевич С.А. Классификация дефектов передач мобильных машин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 2(50). – С. 19–24. DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-19-24

REFERENCES

1. Rynkevich, S.A. (2020). Avtomatizatsiya diagnostirovaniya mekhanicheskikh i gidromekhanicheskikh transmissii [Diagnostic Automation Mechanical and Hydromechanical Transmissions]. In D. Kapsky (Ed.). *Avtotraktorostroenie i avtomobil'nyi transport: sb. nauch. tr. V 2 t. T. 1* (46–50). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Rynkevich, S.A. (2021). Upravlenie i diagnostirovanie gidrofitsirovannykh transmissii: sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya [Control and Diagnosis of Hydraulic Transmissions: State of The Problem and Prospects for Development]. *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii: sb. nauch. st. (77–88)*. Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Rynkevich, S.A. (2024). Aktivnyi monitoring slozhnykh elementov gidromekhanicheskikh peredach mobil'nykh mashin [Active Monitoring of Complex Elements of Hydromechanical Transmissions of Mobile Machines]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 1(49), 71–78. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78 (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Rynkevich, S.A. (2024). Klassifikatsiya defektov peredach mobil'nykh mashin [Classification of Defects in Mobile Machine Transmissions]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 2(50), 19–24. DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-19-24 (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 05.12.2024

CONTROL OF MECHANICAL AND HYDROMECHANICAL GEARS MOBILE AND TECHNOLOGICAL MACHINES

S. RYNKEVICH

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

The issues related to the control and monitoring of mechanical and hydromechanical gears, which are equipped with many mobile and technological machines, are considered. The factors that affect the performance of gears of those and other transmissions are analyzed. It is noted that the concentration of the load along the length of the contact lines of the gears occurs due to errors in the location of the teeth, elastic deformations of the teeth, shafts and their supports. Using the method of finite elements implemented in the finite element analysis program, the indicators used in assessing the technical condition of gears included in hydraulic gears are studied. It is established that the work spent on overcoming the friction force of the gear surfaces is mainly spent on the release of heat and on changing the internal energy of the deformable volume of the metal of the surface layers. At the same time, during friction, the surfaces of the mating teeth simultaneously roll and slide one relative.

Keywords: *hydromechanical transmission, mechanical transmission, mobile machine, technological machine, technical condition, gearing.*

УДК 621.91.01/02

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-20-28

УНИВЕРСАЛИЗАЦИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК, канд. техн. наук, доц. Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ,
В.С. АНИСИМОВ, Д.А. БАШЛАЧЁВ*
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Цель исследований – повышение производительности обработки поверхностей деталей путем универсализации фрез. Для достижения цели решаются задачи разработки конструкций торцевой и дисковой фрез со взаимозаменяемыми режцовыми блоками и зажимными модулями и анализируется их работоспособность. Используются аналитический и экспериментальный методы исследований, позволившие установить геометрические параметры срезаемого слоя при торцевом и периферийном фрезеровании, зависимости коэффициентов усадки стружки, мощности резания и шероховатости обработанной поверхности при изменении подачи, глубины и скорости резания. Результаты исследований могут быть использованы при обработке плоских и криволинейных поверхностей деталей на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: универсальная фреза, фрезерование, мощность и сила резания, коэффициент усадки стружки, шероховатость поверхности.

Введение. В связи с тенденцией производства изделий широкой номенклатуры и в небольшом количестве все большее распространение получает изготовление деталей с использованием многоцелевых станков [1–3]. Например, на одном рабочем месте с использованием «гибридных» станков производится наплавка заготовок (аддитивные технологии) и их механическая обработка (субтрактивные технологии) или реализуются различные виды обработки: токарные, фрезерные и т.д. на станках с инструментальными магазинами, в которых размещаются различные типы режущих инструментов. При этом основное внимание уделяется универсализации конструкций применяемых режущих инструментов с целью сокращения их типов и емкости инструментальных магазинов.

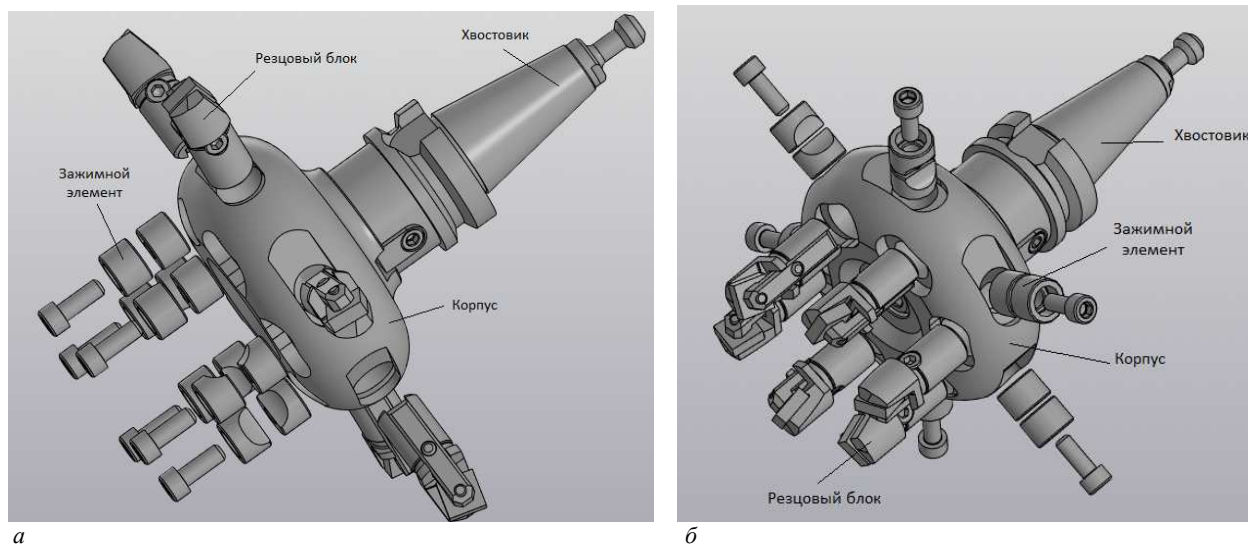
В развитии универсализации режущих инструментов прослеживается несколько направлений [4]:

- создание модульных сборных конструкций, включающих режцовые вставки, картриджи и т.п. При этом в разных типах режущих инструментов используются различные конструкции картриджей;
- применение комбинированных инструментов типа «два в одном», «три в одном», например, сверло–зенкер–развертка. Использовании комбинированных инструментов на станках с ЧПУ зачастую предусматривает уравнивание стойкости каждого типа инструмента за счет ступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя;
- использование одних и тех же типов инструментов для различных видов обработки за счет изменения движения резания, например, концевая фреза при отсутствии ее вращения применяется как проходной резец;
- оформление режущей части инструмента (выбор главной и вспомогательной режущих кромок, углов в плане) таким образом, чтобы инструмент мог работать, например, при токарных, осевых, фрезерных и других видах обработки: комбинирование сверла и резбовой фрезы, совершающих вращательные движения вокруг собственной оси при сверлении отверстия и планетарное движение вокруг оси отверстия при фрезеровании резьбы; плунжерное фрезерование с осевой подачей фрезы; трохоидальное фрезерование с поступательным и вращательным движениями подачи фрезы и др.;
- дополнительное перемещение режущих лезвий за счет встроенных зубчатых механизмов в корпусе режущих инструментов, например, план-суппорты при одновременном поступательном движении режущей кромки перпендикулярным ее вращательному движению;
- использование унифицированного режцового блока, соответствующее расположение которого в разных модулях корпусных и сообщении движения резания характерного для данного вида обработки, обеспечивает реализацию обтачивания, нарезания резьбы, растачивания, зенкования, периферийного, торцевого и охватывающего фрезерования и других видов на одном рабочем месте.

Рассмотрим одно из направлений развития универсализации режущих инструментов на примере торцово-дисковой фрезы.

Основная часть. Конструктивной особенностью универсальной торцово-дисковой фрезы является выполнение отверстий на периферийной и торцевой частях корпуса одинакового размера, что позволяет устанавливать в них как унифицированный режцовый блок, так и зажимающие его элементы. Так, например, на рисунке 1, а представлена конструкция, в которой режцовые блоки устанавливаются со стороны периферийной поверхности корпуса, а зажимные элементы – со стороны торцевой поверхности. На рисунке 1, б, наоборот,

резцовые блоки размещаются со стороны торцевой поверхности корпуса, а зажимные элементы – со стороны периферийной поверхности.



а – дисковая; *б* – торцевая

Рисунок 1. – 3D-модели универсальной фрезы

Резцовый блок включает державку, зажимные элементы в виде клиноприхвата и винта и пластину режущую¹. Поверхности державки для установки в корпусе выполняются цилиндрическими, а для установки пластины режущей и клиноприхвата – плоскими «на проход». Конструкция зажимного модуля включает два клиновидных сухаря, устанавливаемых в отверстия корпуса фрезы, охватывающих цилиндрическую часть державки блока резцового и стягиваемых винтом, вворачиваемым в резьбовое отверстие одного из сухарей. Корпус фрезы выполняется обтекаемым в виде сочетания двух торцовых поверхностей. В связи с ограничениями конструктивных габаритов корпуса фрезы при переустановке резцовых блоков и зажимных элементов с торцевой типа на дисковый тип фрезы предусматривается реверс направления вращения фрезы. Для установки инструмента в гнездо инструментального магазина используется хвостовик типа BT30.

Изготовлены экспериментальные образцы комбинированных фрез как из металлических материалов (сталь 40X), так и «гибридной» конструкции, включающей корпус из пластикового материала марки ABS, отпечатанный на 3D-принтере, и блок резцовый с зажимными элементами из стали марки 40X. Хвостовик изготавливается из стали 40X (рисунок 2).



Рисунок 2. – Внешний вид универсальной фрезы из металлических (а) и «гибридных» (б) материалов

¹ Способ установки сменной режущей пластины в режущем инструменте: пат. ВУ 19260 / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикович, И.Я. Сопиков – Выд. 12.12.2014.

В резцовые блоки устанавливаются пластины твердосплавные типа CNMG 05125-120404. Могут использоваться и другие типоразмеры и материалы пластины режущей в зависимости от обрабатываемого материала, размеров обрабатываемых конструктивных элементов и поверхностей детали, режима резания, применения смазочно-охлаждающей технологической среды и т.д.

Для проверки работоспособности фрез был проведен классический эксперимент, в котором диапазоны изменения скорости v , подачи на зуб S_z и глубины резания t выбирались по справочнику [5]. Диапазоны изменения элементов режима резания следующие: $v = 230\text{--}305$ м/мин, $S_z = 0,06\text{--}0,1$ мм/зуб, $t = 0,5\text{--}1,5$ мм. Последовательность проведения опытов и значения элементов режима резания в каждом опыте представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. – Диапазоны изменения элементов режима резания при торцевом фрезеровании

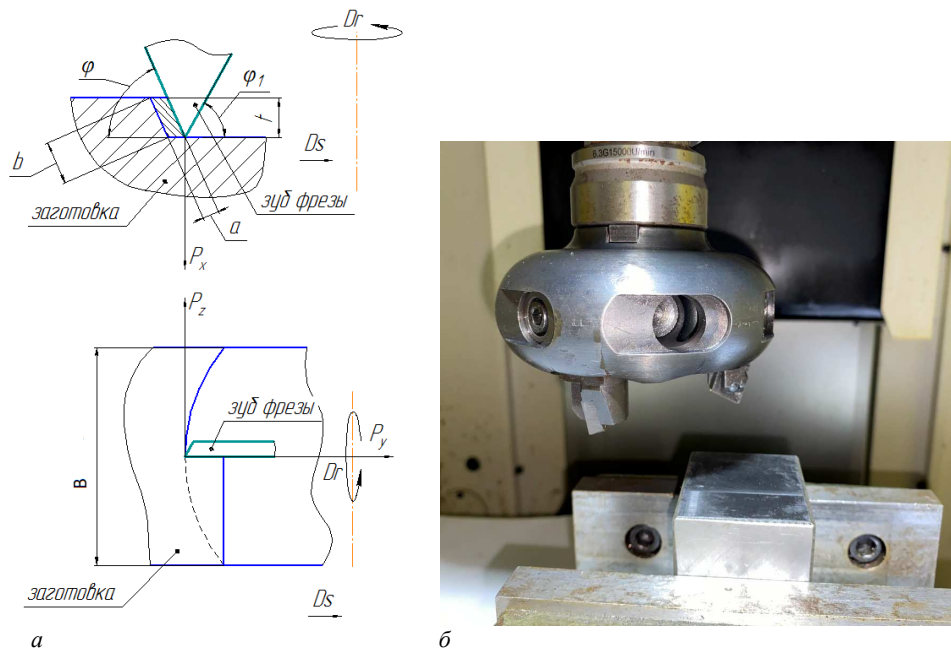
Номер опыта	t , мм	S_z , мм/зуб	v , м/мин
1	0,5	0,06	230
2	1	0,06	230
3	1,5	0,06	230
4	1	0,06	230
5	1	0,08	230
6	1	0,1	230
7	1	0,06	230
8	1	0,06	285
9	1	0,06	305

Таблица 2. – Диапазоны изменения элементов режима резания при дисковом фрезеровании

Номер опыта	t , мм	S_z , мм/зуб	v , м/мин
1	0,5	0,06	230
2	0,5	0,08	230
3	0,5	0,1	230
4	0,5	0,06	230
5	0,5	0,06	285
6	0,5	0,06	305

Обрабатывались заготовки в форме параллелепипеда с размерами $45 \times 58 \times 58$ мм из стали 45 по ГОСТ 1050 на вертикальном обрабатывающем центре модели Robodrilл серии $a\text{-D21LiV}$ фирмы Fanuc.

На рисунке 3 представлены схема и вид торцевого фрезерования.

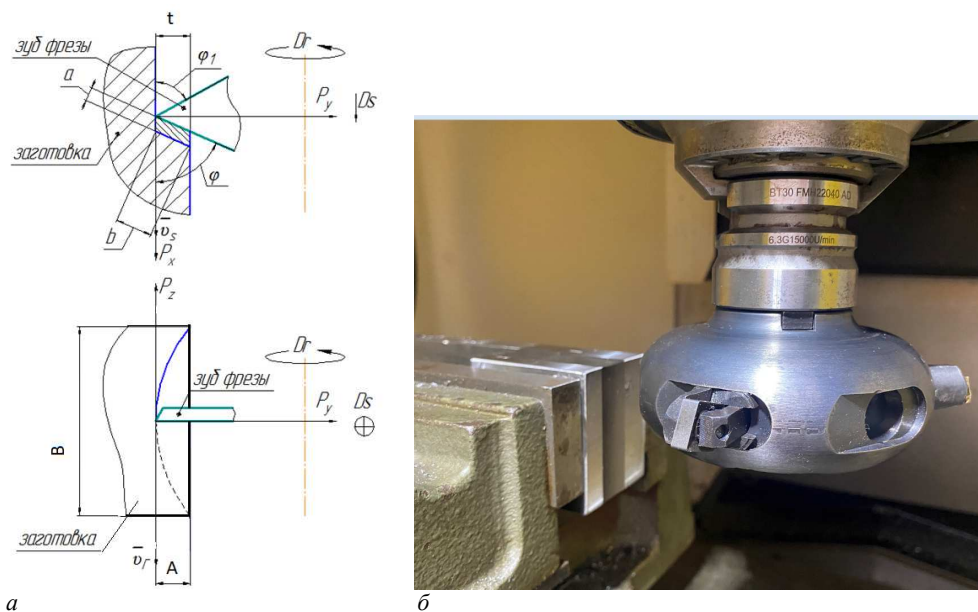


a и b – толщина и ширина сечения срезаемого слоя; t – глубина резания; ϕ и ϕ_1 – главный и вспомогательный углы в плане; P_x , P_y и P_z – осевая, радиальная и тангенциальная составляющая силы резания; D_r и D_s – главное движение и движение подачи; B – ширина фрезерования

Рисунок 3. – Схема (а) и вид (б) торцевого фрезерования

Движение подачи D_s направлено перпендикулярно оси главного вращательного движения D_r . Глубина резания t – размер снимаемого слоя в движении подачи по нормали к рабочей плоскости, которая проходит через векторы скоростей главного движения и движения подачи. Размеры сечения срезаемого слоя определяются его толщиной a , шириной b и углом в плане φ . Глубина врезания A фрезы в заготовку равна ширине фрезерования B (в данном случае $B = 58$ мм). Составляющие силы резания направлены: тангенциальная P_z – по касательной к поверхности резания противоположно вектору скорости главного движения, радиальная P_y – по радиусу фрезы, осевая P_x – вдоль оси главного вращательного движения фрезы.

При дисковом (периферийном) фрезеровании (рисунок 4) в отличие от торцевого фрезерования движение подачи D_s направлено вдоль оси главного вращательного движения D_r , глубина врезания фрезы A определяется шириной фрезерования B ($B = 19$ мм), не равной размеру (ширине) заготовки ($B = 58$ мм).



a и b – толщина и ширина сечения срезаемого слоя; t – глубина резания; φ и φ_1 – главный и вспомогательный углы в плане; P_x , P_y и P_z – осевая, радиальная и тангенциальная составляющая силы резания; D_r и D_s – главное движение и движение подачи; B – ширина фрезерования; A – глубина врезания фрезы; \bar{v}_r и \bar{v}_s – векторы линейных скоростей главного движения и движения подачи

Рисунок 4. – Схема (а) и вид (б) обработки дисковой (периферийной) фрезой

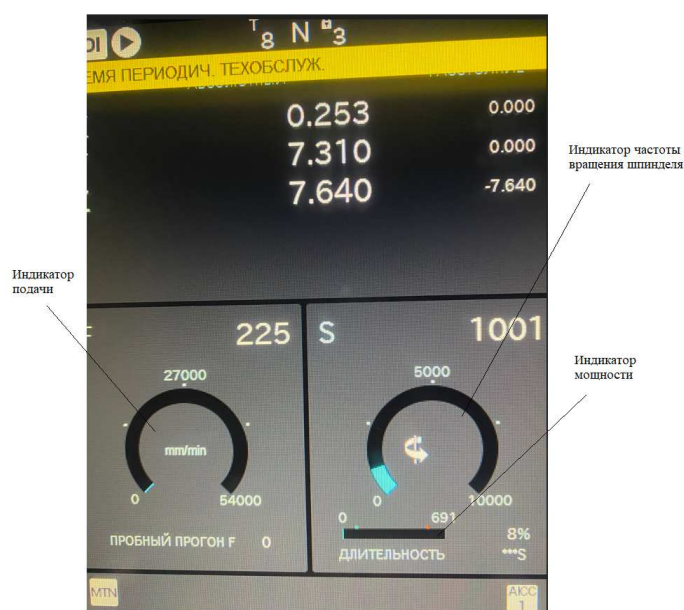


Рисунок 5. – Фрагмент дисплея стойки станка

Были проведены экспериментальные исследования работоспособности фрез, в которых фиксировались на дисплее стойки станка минимальные N_{\min} и максимальные N_{\max} значения потребляемой мощности (рисунок 5), определялась методом непосредственных измерений величина усадки стружки (коэффициенты утолщения k_a , уширения k_b и укорочения стружки k_l) и измерялась шероховатость обработанной поверхности (параметр Ra) на профилографе-профилометре модели «Abris-7P».

Также с использованием справочника [5] рассчитывались сила и мощность резания. Результаты расчетов и опытов представлены в таблицах 3, 4.

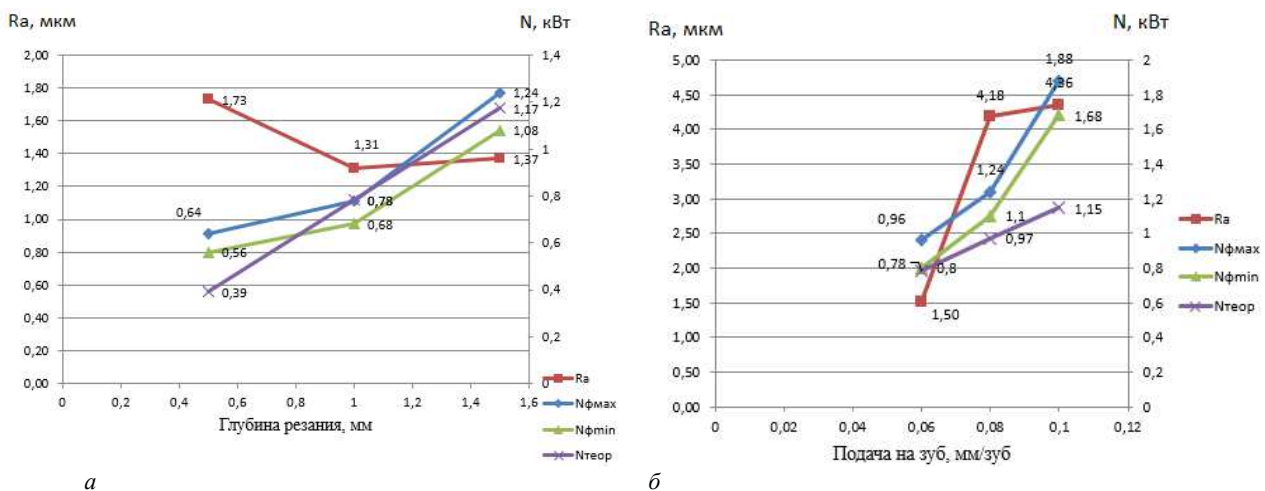
Таблица 3. – Результаты расчетов и экспериментальных исследований при обработке торцевой фрезой

Характеристика / № опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_z , Н	104,06	208,13	312,20	208,13	258,25	305,30	208,13	199,29	196,79
$N_{\text{теор}}$, кВт	0,39	0,78	1,17	0,78	0,97	1,14	0,78	0,92	0,98
$N_{\text{ф min}}$, кВт	0,56	0,68	1,08	0,8	1,1	1,68	0,84	0,86	1,22
$N_{\text{ф max}}$, кВт	0,64	0,78	1,24	0,96	1,24	1,88	0,98	0,96	1,34
Ra	1,729	1,313	1,368	1,504	4,181	4,359	1,808	1,655	1,44
k_a	2,5	2,85	2,64	2,71	2,26	2,0	3	2,64	1,92
k_b	1,4	0,89	0,7	0,86	1,08	1,19	0,98	1,0	0,84
k_l	3,5	2,5	1,84	2,33	2,44	2,38	2,94	2,64	1,61

Таблица 4. – Результаты расчетов и экспериментальных исследований при обработке дисковой фрезой

Характеристика / № опыта	1	2	3	4	5	6
P_z , Н	22,38	28,17	33,68	22,38	21,90	21,76
$N_{\text{теор}}$, кВт	0,08	0,11	0,13	0,08	0,10	0,11
$N_{\text{ф min}}$, кВт	0,16	0,3	0,36	0,16	0,14	0,18
$N_{\text{ф max}}$, кВт	0,22	0,44	0,56	0,2	0,18	0,24
Ra	2,551	3,969	4,84	2,738	1,455	1,527
k_a	2,64	2,16	2,17	2,64	2,5	2,5
k_b	1,59	2,25	2,32	1,54	1,86	1,79
k_l	4,20	4,86	5,03	4,07	4,65	4,48

Полученные результаты измерений и расчетов характеристик мощности привода и шероховатости поверхности от режимов резания представлены в виде графиков на рисунках 6–9.



а – от глубины резания; **б** – от подачи на зуб; **в** – от скорости резания

Рисунок 6. – Зависимости мощности привода и шероховатости поверхности при обработке торцевой фрезой (начало)

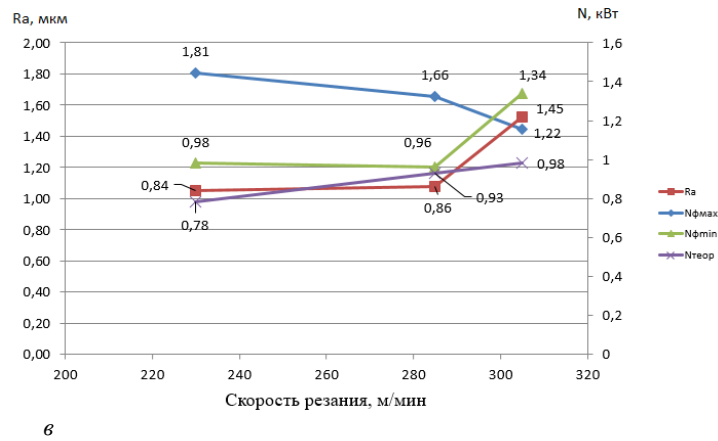
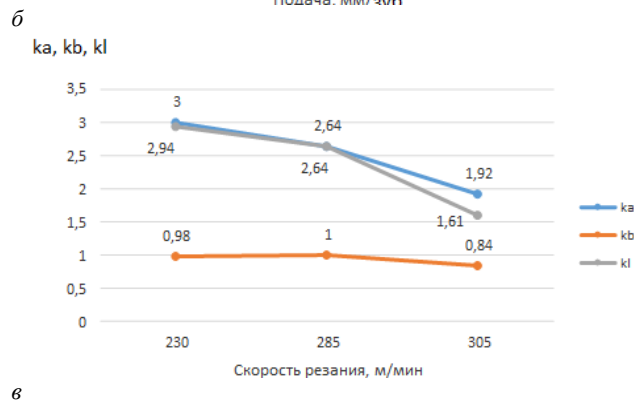
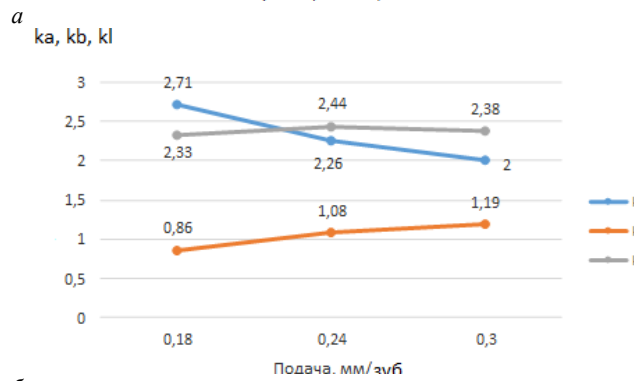
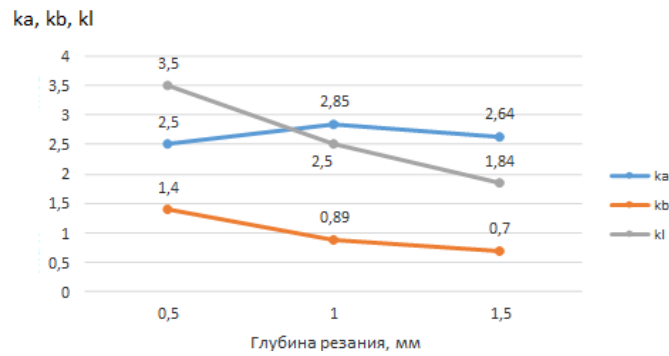
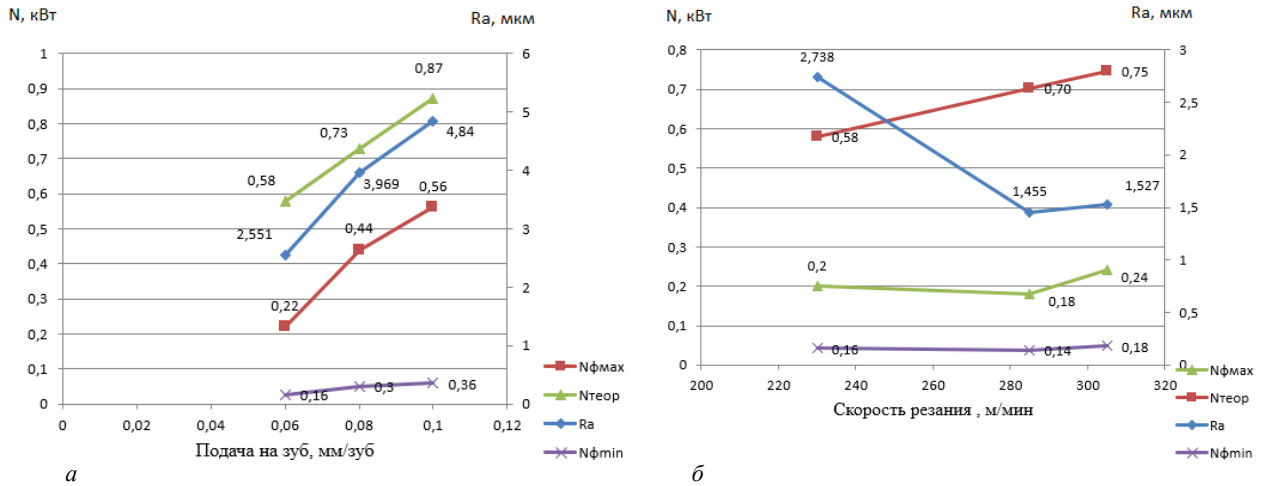


Рисунок 6. – Зависимости мощности привода и шероховатости поверхности при обработке торцевой фрезой (окончание, начало на с. 24)



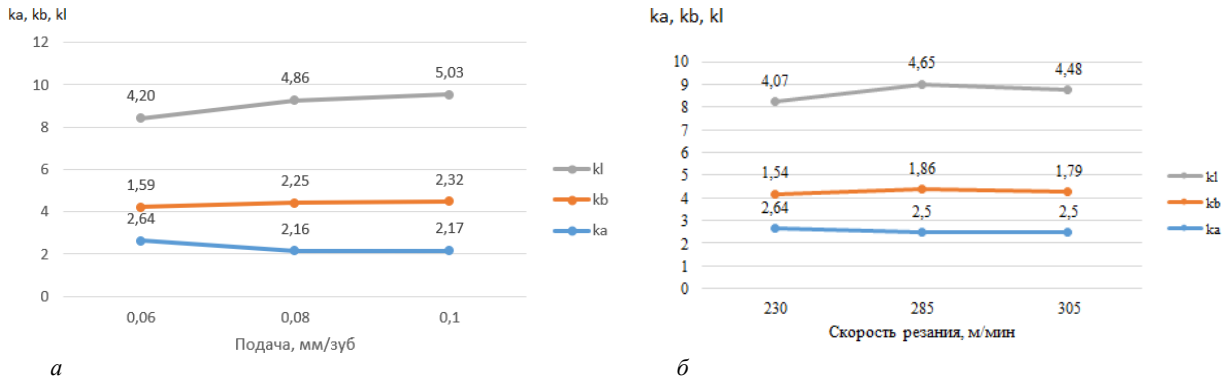
a – от глубины резания; *б* – от подачи на зуб; *в* – от скорости резания

Рисунок 7. – Зависимости коэффициентов усадки стружки *ka*, *kb*, *kl* при обработке торцевой фрезой



а – от подачи на зуб; **б** – от скорости резания

Рисунок 8. – Зависимости мощности привода и шероховатости поверхности при обработке дисковой фрезой



а – от подачи на зуб; **б** – от скорости резания

Рисунок 9. – Зависимости коэффициентов усадки стружки ka, kb, kl при обработке дисковой фрезой

Как видно из графиков, изменения деформационных и динамических характеристик обработки и параметра шероховатости поверхности Ra соответствуют классическим представлениям теории резания. При торцевом фрезеровании с увеличением глубины резания t минимальные $N_{\text{мин}}$ и максимальные $N_{\text{макс}}$ значения фактической мощности резания увеличиваются и близки к теоретическим значениям $N_{\text{теор}}$; показатели деформации ka, kb, kl и параметр шероховатости Ra поверхности уменьшаются незначительно. С увеличением подачи S_z значения мощности $N_{\text{мин}}, N_{\text{макс}}, N_{\text{теор}}$ и параметра шероховатости Ra возрастают, а значения ka, kb, kl – практически не изменяются. Рост скорости v приводит к увеличению мощности резания $N_{\text{мин}}, N_{\text{макс}}$, снижению коэффициентов усадки стружки ka, kb, kl и параметра шероховатости поверхности Ra .

При периферийном фрезеровании с увеличением подачи S_z значения мощности резания $N_{\text{мин}}, N_{\text{макс}}$ и параметра Ra шероховатости поверхности возрастают, показатели деформации изменяются незначительно. С увеличением скорости резания v значения мощности резания $N_{\text{мин}}, N_{\text{макс}}$ возрастают, а значения параметра Ra снижаются, значения ka, kb, kl практически не изменяются. С увеличением подачи S_z мощность резания возрастает, т.к. увеличивается толщина сечения срезаемого слоя. При этом ее значение меньше, чем при фрезеровании торцевой фрезой (рисунок 10), т.к. меньше ширина фрезерования B (примерно в 3 раза).

При увеличении линейной скорости вращения фрезы мощность резания практически не изменяется, т.к. величины снижения силы резания и увеличения скорости резания сопоставимы и их влияние на изменение мощности резания несущественно.

При периферийном фрезеровании за счет направления движения подачи вдоль оси вращения фрезы D_s снижается радиальное отжатие фрезы по сравнению с торцевым фрезерованием, когда движение подачи D_s направлено перпендикулярно оси главного вращательного движения D_r .

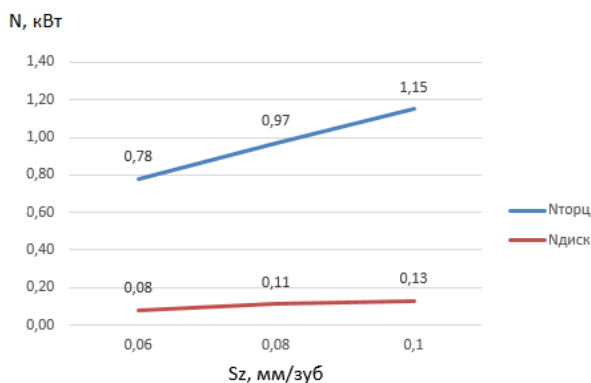


Рисунок 10. – Зависимости мощности торцевого и периферийного фрезерования от подачи на зуб

Шероховатость поверхности оценивалась следующими параметрами: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм; R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля, мкм; Sm – средний шаг неровностей, мкм. Результаты измерения параметров шероховатости Ra , Rz , R_{max} , Sm при торцевом фрезеровании представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Результаты измерения параметров шероховатости при торцевом фрезеровании

Серия опытов с изменением глубины резания t , мм		
Опыт №1 $t = 0,5$ мм	Опыт № 2 $t = 1$ мм	Опыт № 3 $t = 1,5$ мм
$Ra = 1,729$ мкм, $Rz = 6,697$ мкм, $R_{max} = 7,573$ мкм, $Sm = 82,71$ мкм	$Ra = 1,313$ мкм, $Rz = 5,154$ мкм, $R_{max} = 5,909$ мкм, $Sm = 86,83$ мкм	$Ra = 1,368$ мкм, $Rz = 5,595$ мкм, $R_{max} = 6,320$ мкм, $Sm = 84,80$ мкм
Серия опытов с изменением подачи S , мм/зуб		
Опыт № 4 $S = 0,06$ мм/зуб	Опыт № 5 $S = 0,08$ мм/зуб	Опыт № 6 $S = 0,1$ мм/зуб
$Ra = 1,504$ мкм, $Rz = 7,023$ мкм, $R_{max} = 8,113$ мкм, $Sm = 80,78$ мкм	$Ra = 4,181$ мкм, $Rz = 12,808$ мкм, $R_{max} = 15,973$ мкм, $Sm = 130,58$ мкм	$Ra = 4,359$ мкм, $Rz = 20,051$ мкм, $R_{max} = 16,600$ мкм, $Sm = 288,43$ мкм
Серия опытов с изменением скорости резания v , м/мин		
Опыт № 7 $v = 230$ м/мин	Опыт № 8 $v = 285$ м/мин	Опыт № 9 $v = 305$ м/мин
$Ra = 1,808$ мкм, $Rz = 8,304$ мкм, $R_{max} = 11,313$ мкм, $Sm = 82,64$ мкм	$Ra = 1,655$ мкм, $Rz = 8,170$ мкм, $R_{max} = 10,684$ мкм, $Sm = 56,55$ мкм	$Ra = 1,447$ мкм, $Rz = 7,416$ мкм, $R_{max} = 8,415$ мкм, $Sm = 47,85$ мкм

Значения параметра Ra шероховатости поверхности соответствует чистовой обработке. Некоторый рост характеристик шероховатости при торцевом фрезеровании в опытах 5 и 6 (см. таблицу 5) связан с увеличением глубины резания, подачи и износа режущей пластины.

Результаты измерения параметров шероховатости Ra , Rz , R_{max} , Sm при периферийном фрезеровании представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Результаты измерения параметров шероховатости при периферийном фрезеровании

Серия опытов с изменением подачи S , мм/зуб		
Опыт № 1 $S = 0,06$ мм/зуб	Опыт № 2 $S = 0,08$ мм/зуб	Опыт № 3 $S = 0,1$ мм/зуб
$Ra = 2,551$ мкм, $Rz = 10,154$ мкм, $R_{max} = 11,999$ мкм, $Sm = 124,19$ мкм	$Ra = 3,969$ мкм, $Rz = 23,417$ мкм, $R_{max} = 14,993$ мкм, $Sm = 215,54$ мкм	$Ra = 4,840$ мкм, $Rz = 28,556$ мкм, $R_{max} = 18,719$ мкм, $Sm = 159,49$ мкм
Серия опытов с изменением скорости резания v , м/мин		
Опыт № 4 $v = 230$ м/мин	Опыт № 5 $v = 285$ м/мин	Опыт № 6 $v = 305$ м/мин
$Ra = 2,738$ мкм, $Rz = 10,773$ мкм, $R_{max} = 12,654$ мкм, $Sm = 157,38$ мкм	$Ra = 1,455$ мкм, $Rz = 7,838$ мкм, $R_{max} = 8,929$ мкм, $Sm = 53,09$ мкм	$Ra = 1,572$ мкм, $Rz = 7,528$ мкм, $R_{max} = 9,939$ мкм, $Sm = 48,25$ мкм

Некоторое увеличение параметра Ra шероховатости обработанной поверхности при периферийном фрезеровании по сравнению с торцевым объясняется биением режущих кромок фрез: при периферийном фрезеровании – 0,2–0,4 мм, при торцевом фрезеровании – 0,1–0,2 мм.

Анализируя результаты данных таблиц 5 и 6, можно сделать вывод, что высота неровностей зависит в большей степени от величины подачи. При увеличении подачи до значений $S_z = 0,1$ мм/зуб параметры шероховатости возрастают до 2 раз. Влияние глубины резания на шероховатость поверхности незначительно. Увеличение скорости резания приводит к уменьшению высоты микронеровностей.

Заключение. Для повышения производительности обработки поверхностей деталей предложены конструкции универсальных торцово-дисковых фрез, включающие взаимозаменяемые блоки резцовые и зажимные модули, устанавливаемые со стороны периферийной и торцевой поверхностей корпуса и позволяющие производить как торцевое, так и дисковое фрезерование поверхностей деталей при переустановке блоков резцовых и зажимных модулей.

По результатам расчетов и экспериментов установлены зависимости мощности и силы резания, коэффициентов усадки стружки и шероховатости обработанной поверхности от режимов торцевого и дискового фрезерования, что обеспечивает выбор оптимального вида обработки для соблюдения требуемых значений физических и технологических характеристик процесса резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маклоренс Э. Многоцелевые станки // Мировая металлообработка. – 2006. – № 2. – С. 12–13.
2. Черпаков Б.И. Тенденции развития мирового станкостроения в начале XXI века / СТИН. – 2003. – № 9. – С. 3–7.
3. Черпаков Б.И. Тенденции развития мирового станкостроения в начале XXI века / СТИН. – 2003. – № 10. – С. 3–7.
4. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 316 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сусллова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2. – 944 с.

REFERENCES

1. Maklorens, E. (2006). *Mnogotsel'evye stanki. Mirovaya metalloobrabotka*, (2), 12–13. (In Russ.).
2. Cherpakov, B.I. (2003). *Tendentsii razvitiya mirovogo stankostroeniya v nachale XXI veka. STIN*, (9), (3–7). (In Russ.).
3. Cherpakov, B.I. (2003). *Tendentsii razvitiya mirovogo stankostroeniya v nachale XXI veka. STIN*, (10), (3–7). (In Russ.).
4. Rusetskii, A.M. (2014). *Konstruirovaniye i osnashcheniye tekhnologicheskikh kompleksov*. Minsk: Belpruskaya navuka. (In Russ.).
5. Dal'skii, A.M., Kosilova, A.G., Meshcheryakov, R.K. & Suslov, A.G. (Eds.). (2001). *Spravochnik tekhnologa mashinostroitel'ya. V 2 t. T. 2*. Moscow: Mashinostroeniye. (In Russ.).

Поступила 12.03.2024

UNIVERSALIZATION OF ROTATING CUTTING TOOLS BASED ON UNIFIED CONSTRUCTION MODULES

N. POPOK, R. KHMELNITSKY, V. ANISIMOV, D. BASHLACHEV
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The purpose of the work is to increase the productivity of surface treatment of parts by universalizing cutters. To achieve the goal, the problems of developing designs of end and disk cutters with interchangeable cutting blocks and clamping modules and studying their performance are solved. Analytical and experimental research methods are used, which made it possible to establish the geometric parameters of the cut layer during end and peripheral milling, the dependence of the chip shrinkage coefficients, cutting power and roughness of the machined surface when changing the feed, depth and cutting speed. The research results can be used in machining flat and curved surfaces of parts on CNC machines.

Keywords: *universal milling cutter, milling, cutting power and force, chip shrinkage coefficient, surface roughness.*

УДК 330.131.7:631.3

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-29-32

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РИСКОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

канд. техн. наук Ал-й Л. МИСУН, А.В. ГАРКУША
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)

Выполнен логистический регрессионный анализ производственных рисков при эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники (на примере кормоуборочных комбайнов). Рассмотрено логит-преобразование риска как одномерной величины, описываемой вероятностью, проведено табулирование полученных зависимостей.

Ключевые слова: вероятность, логистический регрессионный анализ, производственный риск, эксплуатация, мобильная сельскохозяйственная техника.

Введение. Анализ ранее проведенных исследований [1–4] позволил установить, что на долю мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ) приходится свыше 80% случаев производственного травматизма, а наибольшие простои МСХТ имеют место при устранении эксплуатационных отказов. Для обоснования факторов производственного риска при эксплуатации МСХТ использовался статистический метод с программным комплексом «STATISTICA 6.0» [5]. Достоверность полученных результатов оценивалась методом сравнения среднеарифметических и относительных значений эмпирических совокупностей [6]. За достоверный принимался результат, когда степень вероятности безошибочного прогноза составляла не менее 95%, что соответствует $P < 0,05$ [7]. Взаимосвязь между факторами производственного риска и его негативными последствиями (отказом кормоуборочного комбайна и его простоем) определялась посредством парной корреляции. Величина коэффициента корреляции ($r = 1,0 \dots 0,1$) служила показателем силы связи между изучаемыми признаками. Достоверность коэффициента корреляции рассчитывалась по критерию Стьюдента [8; 9].

Основная часть. Результаты предварительного анализа эксплуатации МСХТ позволили выделить (на примере кормоуборочных комбайнов) наиболее характерные факторы, влияющие на производственный риск (количество текущих ремонтов по устранению отказов 2-й и 3-й групп сложности, ремонтов с применением сварки, срок эксплуатации и др.), связанные с техническим состоянием комбайнов, а также факторы риска, обусловленные негативным влиянием изменяющейся природно-техногенной среды при эксплуатации кормоуборочных комбайнов. Для обоснования связи между несколькими независимыми переменными (предикторами) и зависимой переменной непрерывного типа был выбран метод логистического регрессионного анализа [6; 10]. Применительно к рассматриваемой задаче роль предикторов выполняют факторы риска, а в качестве зависимой переменной выступает вероятность. Использование программного комплекса «STATISTICA 6.0» [5] позволило выполнить логит-преобразование риска как одномерной величины, описываемой вероятностью (зависимости (1)–(3)):

- риск отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна:

$$P = \frac{\exp(1,54 + (-0,47)x_1)}{(1 + \exp(1,54 + (-0,47)x_1))}, \quad (1)$$

(хи-квадрат = 24,98; $p \leq 0,001$),

где x_1 – количество проведенных текущих ремонтов за срок эксплуатации кормоуборочного комбайна;

- риск отказов приборов и устройств безопасности, электрооборудования кормоуборочного комбайна:

$$P = \frac{\exp(0,32 + (-0,35)x_1)}{(1 + \exp(0,32 + (-0,35)x_1))}, \quad (2)$$

(хи-квадрат = 15,35; $p \leq 0,001$),

- риск отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна:

$$P = \frac{\exp(-0,29 + 0,24x_2)}{(1 + \exp(-0,29 + 0,24x_2))}, \quad (3)$$

(хи-квадрат = 24,76; $p \leq 0,001$),

где x_2 – количество ремонтов с применением сварки за срок эксплуатации кормоуборочного комбайна.

Табуляция зависимостей (1–3) представлена в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. – Зависимость риска возникновения отказов кормоуборочного комбайна от количества текущих ремонтов

Риск возникновения отказов P , %	Количество текущих ремонтов кормоуборочного комбайна N_T									
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Механизмы и элементы привода рабочих органов кормоуборочного комбайна	81,75	73,34	64,26	51,28	40,82	28,90	19,46	12,95	8,26	5,28
Приборы и устройства безопасности, электрооборудования кормоуборочного комбайна	56,23	48,41	39,74	31,80	25,68	18,92	14,22	9,39	6,18	4,25

Таблица 2. – Зависимость риска возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна от количества ремонтов с применением сварки

Риск возникновения отказов P , %	Количество ремонтов с применением сварки за срок эксплуатации кормоуборочного комбайна N_c												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Металлоконструкция кормоуборочного комбайна	18,3	47,84	53,8	58,41	64,77	70,29	75,03	78,70	83,30	86,12	88,23	91,17	92,96

Условия эксплуатации кормоуборочного комбайна и связанные с этим факторы риска, прежде всего, обусловлены режимом его работы. Проведенный нами статистический анализ позволил получить соответствующие зависимости вероятности как количественной меры риска с действием различных факторов:

– риск возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, обусловленный продолжительностью работы комбайна в году:

$$P = \frac{\exp(-0,69 + 0,14x_p)}{(1 + \exp(-0,69 + 0,14x_p))}, \quad (4)$$

(хи-квадрат = 18,75; $p \leq 0,001$),

где x_p – продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году;

– риск возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна, обусловленный продолжительностью работы комбайна в году:

$$P = \frac{\exp(0,81 + 0,21x_p)}{(1 + \exp(0,81 + 0,21x_p))}, \quad (5)$$

(хи-квадрат = 14,18; $p \leq 0,001$).

Для удобства практического использования полученных результатов (выражения (4)–(5)) выполнена табуляция расчетных зависимостей, результаты которой представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Зависимость риска возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, механизмов и элементов привода его рабочих органов от продолжительности работы комбайна в году

Риск возникновения отказов P , %	Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году N_T , дн.					
	1	25	50	100	150	200
Металлоконструкция кормоуборочного комбайна	14,45	33,42	36,81	42,13	52,84	64,73
Механизмы и элементы привода рабочих органов кормоуборочного комбайна	27,42	71,30	78,00	81,24	84,22	86,12

Используемый метод регрессионного анализа также позволяет получить зависимости для расчета риска возникновения отказов кормоуборочного комбайна при совместном действии двух факторов риска.

Например:

– риск возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, обусловленный фактическим режимом его эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица табуляции 4):

$$P = \frac{\exp(0,94 + 0,005x + 0,16y)}{(1 + \exp(0,94 + 0,005x + 0,16y))}, \quad (6)$$

(хи-квадрат = 13,20; $p \leq 0,001$),

где y – режим эксплуатации кормоуборочного комбайна: с подборщиком (первый), жаткой для уборки трав (второй), жаткой для уборки высокостебельных культур (третий),

Таблица 4. – Зависимость риска возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна от режима его эксплуатации и продолжительности работы в году

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Риск возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, %						
	Первый	17	63	76	80	85	86
	Второй	22	67	79	82	87	89
	Третий	24	71	83	85	90	92
	1	25	50	100	150	200	
Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году N_T , дн.							

– риск возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна, обусловленный режимом эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица табуляции 5):

$$P = \frac{\exp(0,30 + 0,0005x + 0,15y)}{(1 + \exp(0,30 + 0,0005x + 0,15y))}, \quad (7)$$

(хи-квадрат = 16,84; $p \leq 0,001$),

Таблица 5. – Зависимость риска возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна от режима эксплуатации и продолжительности работы комбайна в году

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Риск возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна, %						
	Первый	12	61	61	73	75	79
	Второй	16	63	66	78	78	83
	Третий	19	67	70	80	84	85
	1	25	50	100	150	200	
Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году N_T , дн.							

– риск возникновения отказов приборов и устройств безопасности кормоуборочного комбайна, электрооборудования, обусловленный режимом эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица табуляции 6):

$$P = \frac{\exp(-0,06 + 0,0008x_p + 0,14y)}{(1 + \exp(-0,06 + 0,0008x_p + 0,14y))}, \quad (8)$$

(хи-квадрат = 10,57; $p \leq 0,001$),

Таблица 6. – Зависимость риска возникновения отказов приборов и устройств безопасности кормоуборочного комбайна, электрооборудования от режима эксплуатации и продолжительности работы комбайна в году

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Риск отказов приборов и устройств безопасности, электрооборудования кормоуборочного комбайна, %						
	Первый	17	46	48	49	54	56
	Второй	19	49	52	52	58	59
	Третий	22	56	55	57	61	62
	1	25	50	100	150	200	
Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году N_T , дн.							

– риск возникновения отказов питающе-измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна, обусловленный режимом эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица табуляции 7):

$$P = \frac{\exp(-2,97 + 0,002x_p + 0,30y)}{(1 + \exp(-2,97 + 0,002x_p + 0,30y))}, \quad (9)$$

(хи-квадрат = 105,19; $p \leq 0,001$).

Таблица 7. – Зависимость риска возникновения отказов питающе-измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна от режима его эксплуатации и продолжительности работы комбайна в году

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Риск возникновения отказов питающе-измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна, %						
	Первый	6	18	28	36	51	66
	Второй	8	26	36	48	63	84
	Третий	11	33	46	60	81	92
	1	25	50	100	150	200	
Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году N_T , дн.							

Приведенные таблицы (1–7), содержащие табулированные значения риска возникновения отказов кормоуборочного комбайна, обусловленных действием разных факторов и их сочетаний, позволяют не только произвести количественную оценку риска, но и упростить осуществление контроля расчетных значений различных его видов.

Заключение. По результатам проведенных исследований разработано математическое описание расчета производственных рисков при эксплуатации МСХТ (на примере кормоуборочных комбайнов), основанное на использовании метода логистического регрессионного анализа и включающее разработку и табулирование полученных зависимостей по рассматриваемым видам риска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Организационно-технические мероприятия для повышения безопасности и улучшения условий труда операторов мобильной сельскохозяйственной техники / Л.В. Мисун, В.А. Агейчик, А.Л. Мисун и др. – Минск: БГАТУ, 2012. – 192 с.
2. Мисун А.Л. Прогнозируемая травмоопасность при восстановлении работоспособности кормоуборочных комбайнов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2016. – № 3. – С. 179–185.
3. Орда А.Н., Мисун А.Л. Исследование безопасности и эффективности функционирования технологической системы «оператор–комбайн–транспорт» на уборке кормовых культур // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2023. – № 1(130). – С. 91–94. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-130-1-91-94
4. Мисун Л.В., Мисун Ал-й Л., Мисун Ал-р Л. Техносферная безопасность: пособие. – Минск: БГАТУ, 2023. – 212 с.
5. Реброва О.Ю. Статистический анализ данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. – М.: Медиа Сфера, 2003. – 312 с.
6. Пушенко С.Л. Структура методологии управления рисками в повышении эффективности организации охраны труда на предприятиях стройиндустрии // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 1. – С. 161–165.
7. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. В 2 т.: [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1980. – Т. 1: Методы обработки данных. – 610 с.
8. Петри А., Сабин К. Наглядная медицинская статистика / пер. с англ. В.П. Леонова. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2003. – 141 с. – (Экзамен на отлично).
9. Леонов А.Н., Дечко М.М., Ловкис В.Б. Основы научных исследований и моделирования. – Минск: БГАТУ, 2010. – 276 с.
10. Владимиров В.А., Малинецкий Г.Г., Махутов Н.А. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. – М.: Наука, 2000. – 432 с.

REFERENCES

1. Misun, L.V., Ageichik, V.A., Misun, A.L., Gurina, A.N. & Misun, A.L. (2012). *Organizatsionno-tekhnicheskie meropriyatiya dlya povysheniya bezopasnosti i uluchsheniya uslovii truda operatorov mo-bil'noi sel'skokhozyaistvennoi tekhniki*. Minsk: BGATU. (In Russ.).
2. Misun, A.L. (2016). *Prognoziruemaya travmoopasnost' pri vosstanovlenii rabotosposobnosti kormouborochnykh kombainov* [The Predicted Injury Risk at Maintenance of Forage Harvesters]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science], (3), 179–185. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Orda, A. N. & Misun, A.L. (2023). *Issledovanie bezopasnosti i effektivnosti funktsionirovaniya tekhnologicheskoi sistemy «operator–kombain–transport» na uborkе kormovykh kul'tur* [Study of the Safety and Efficiency of the Functioning of the Technological System "operator–Harvester–Transport" in Forage Crops Harvesting]. *Vestnik BarGU. Seriya Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of BarSU. Series Technical science], 1(130), 91–94. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Misun, L.V., Misun, Al-i L. & Misun, Al-r L. (2023). *Tekhnosfernaya bezopasnost': posobie*. Minsk: BGATU. (In Russ.).
5. Rebrova, O.Yu. (2003). *Statisticheskii analiz dannykh. Primenenie paketa prikladnykh programm STATISTICA*. Moscow: Media Sfera. (In Russ.).
6. Pushenko, S.L. (2012). *Struktura metodologii upravleniya riskami v povyshenii effektivnosti organizatsii okhrany truda na predpriyatiyakh stroindustrii*. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, (1), 161–165. (In Russ.).
7. Dzhonson, N. & Lion, F. (1980). *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke* [Statistics and Experimental Design in Engineering and Physical Science]. V 2 t.: [per. s angl.]. T. 1: *Metody obrabotki dannykh* [Data Processing Methods]. Moscow: Mir. (In Russ.).
8. Petri, A. & Sabin, K. (2003). *Naglyadnaya meditsinskaya statistika* [Visual medical statistics] [per. s angl. V.P. Leonova]. Moscow: GEOTAR-Media. (In Russ.).
9. Leonov, A.N., Dechko, M.M. & Lovkis, V.B. (2010). *Osnovy nauchnykh issledovaniy i modelirovaniya*. Minsk: BGATU. (In Russ.).
10. Vladimirov, V.A., Malinetskii, G.G. & Makhutov, N.A. *Upravlenie riskom: Risk. Ustoichivoe razvitie. Sinergetika*. Moscow: Nauka. (In Russ.).

Поступила 12.03.2024

FORECASTING PRODUCTION RISKS WHEN USING MOBILE AGRICULTURAL MACHINERY

AI-I MISUN, A. GARKUSHA
(Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk)

A logistic regression analysis of production risks during the operation of mobile agricultural machinery (using forage harvesters as an example) was performed. The logit transformation of risk as a one-dimensional value described by probability was considered, and the resulting dependencies were tabulated.

Keywords: probability, logistic regression analysis, production risk, operation, mobile agricultural machinery.

УДК 62-1/-9

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-33-38

**ОЧИСТКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОАО «МОТОВЕЛО»***канд. техн. наук Н.С. ЯНКЕВИЧ**(Центр системного анализа и стратегических исследований НАН Беларуси, Минск)**С.Н. ЯНКЕВИЧ**(ОАО «МотоВело», Минск)*

В настоящее время наиболее универсальным методом снижения содержания вредных примесей в отработавших газах признано каталитическое дожигание. Известны каталитические системы для дожига всех нормируемых компонентов или их комбинаций (трехмаршрутные катализаторы). Вместе с тем вопрос создания новых конструкторско-технологических решений по-прежнему остается актуальным в связи с тем, что применение штатной системы на конкретном двигателе внутреннего сгорания, как правило, сопровождается рядом затруднений.

В статье рассматриваются исследования по разработке каталитического нейтрализатора для бензиновых мотоциклетных двигателей.

Ключевые слова: *каталитическая очистка, нейтрализатор, носитель, двигатель внутреннего сгорания.*

Введение. Необходимость сохранения окружающей среды в пригодном для жизни будущих поколений виде осознается все большим числом населения промышленно развитых стран. Основную роль в загрязнении атмосферы играют выбросы автотранспорта (60%), промышленности (17%) и энергетики (14%). Как видно, проблема снижения токсичности отработавших газов автотранспорта остается достаточно актуальной.

Радикальное снижение токсичности отработавших газов в 10 и более раз может быть достигнуто только путем каталитической нейтрализации. Уже с середины 1970-х годов в США и Японии, а позднее в Австралии каталитические преобразователи были признаны универсальным методом очистки.

Срок службы современных катализаторов двигателей внутреннего сгорания определяется главным образом термической дезактивацией [1], т.к. химическую дезактивацию можно значительно уменьшить путем использования тетраэтилсвинца. Степень дезактивации зависит не только от максимальной температуры, действию которой подвергался катализатор, но и от диапазона изменения соотношения воздух–топливо (A/F) при высокотемпературном воздействии во время выхлопа.

Чтобы удовлетворить предполагаемым стандартам эмиссии, необходимо рассмотреть различные стратегии использования катализаторов. Первый метод состоит в увеличении содержания благородного металла в катализаторе, а также возможном увеличении объема катализатора. По второму способу следует использовать трехмаршрутные катализаторы, близко присоединенные к коллектору двигателя для обеспечения лучших характеристики зажигания. Третий – в использовании стартового (пускового) катализатора вблизи коллектора, соединенного с катализатором. Возможно также использование традиционной каталитической технологии с применением улучшенных составов катализаторов.

Основная часть. *Разработка каталитически активного наноматериала для очистки отработавших газов мотоциклетных двигателей внутреннего сгорания.* Был разработан каталитически активный композиционный наноматериал для низкотемпературной очистки отработавших газов от CO без содержания драгоценных металлов. Следует отметить, что наиболее очевидный (и самый дорогой) метод, удовлетворяющий более строгим стандартам по CN и NO_x, состоит в увеличении благородного металла в катализаторе, поэтому предложенный подход является актуальным. При этом необходимым условием получения суспензии с максимально возможным равномерным распределением составляющих ее компонентов является высокая дисперсность последних. С целью выбора наиболее подходящей для этой цели соли меди в Институте физико-органической химии НАН Беларуси были проведены эксперименты по нанесению на никелевый пеноблок составов, состоящих:

- из меди (II) азотнокислой основной (Cu(NO₃)₂, Cu(OH)₂);
- меди (II) углекислой основной (малахита, CuCO₃, Cu(OH)₂);
- оксида меди, полученного разложением меди азотнокислой основной и, соответственно, отходов церита, бентонита и оксида алюминия.

Уже на стадии приготовления суспензий было видно, что малахит не следует брать в качестве источника оксида меди, поскольку он, несмотря на свою хорошую сыпучесть, имеет недостаточно высокую дисперсность. Вследствие большой плотности его частички опускались на дно стакана, и равномерную суспензию получить не удавалось. Наиболее подходящим исходным соединением меди для получения суспензии с равномерным распределением компонентов является азотнокислая медь основная.

Основываясь на данных выполненных исследований [2], при выборе количественных соотношений компонентов в суспензии остановились на таком, который позволял получать на никелевом блоке после прокалики вторичный (каталитический) слой следующего состава: Cu – 20%, отходы церита – 20%, Al₂O₃ – 35%, бентонит – 25%.

С целью изучения химических взаимодействий, имеющих место в каталитическом слое и ответственных за формирование активной поверхности катализатора, было синтезировано 7 образцов, состоящих из азотнокислой меди основной, отходов церита, оксида алюминия и бентонита с различным соотношением компонентов, а также двойные составы: азотнокислой меди двойной и оксида алюминия; азотнокислой меди основной и отходов церита; азотнокислой меди основной и бентонита.

Последние три смеси были прокалены при 760–780°C, первые же три образца прокаливали соответственно при 600, 700 и 780 °С. Полученные образцы исследовали методом рентгенофазного анализа (РФА) на приборе ДРОН-3 на медном излучении с хроматором и методом электронной спектроскопии диффузного отражения (таблицы 1–3).

Таблица 1. – Данные РФА вторичного каталитического слоя после его термообработки при 600 °С на воздухе

№ п/п	2θ	θ	α, Å	I, %	Фазовый состав
1	21,6	10,80	4,10	17	Бентонит
2	28,1	14,05	3,17	100	CeO ₂ , бентонит
3	32,9	16,45	2,71	62	
4	35,3	17,65	2,54	65	CuO, бентонит
5	38,6	19,30	2,33	72	CuO
6	47,2	23,60	1,92	10	
7	53,4	26,70	1,71	7	CuO
8	56,3	28,15	1,63	90	
9	58,0	29,00	1,59	8	CuO
10	59,0	29,50	1,56	15	
11	61,4	30,07	1,51	16	CuO
12	66,1	33,05	1,41	7	CuO, Al ₂ O ₃
13	67,6	33,80	1,382	10	Al ₂ O ₃
14	69,2	34,60	1,354	18	CeO ₂
15	75,0	37,50	1,260	8	CuO
16	76,7	38,35	1,239	29	CeO ₂
17	79,0	38,50	1,208	23	
18	88,3	44,15	1,103	27	CeO ₂
19	95,2	46,10	1,041	26	CeO ₂
20	107,2	53,60	0,955	11	

Таблица 2. – Данные РФА вторичного каталитического слоя после его термообработки при 700 °С на воздухе

№/п/п	2θ	θ	α, Å	I, %	Фазовый состав
1	21,2	10,60	4,18	8	Бентонит
2	28,4	14,20	3,13	100	CeO ₂
3	32,7	16,35	2,73	28	CeO ₂
4	35,2	17,60	2,54	25	CuO
5	38,4	19,20	2,34	24	CuO
6	47,0	23,50	1,93	59	CeO ₂
7	48,5	24,25	1,87	5	CuO
8	53,2	26,60	1,72	2	
9	56,0	28,00	1,64	41	CeO ₂
10	58,6	29,30	1,57	8	CeO ₂
11	61,4	30,70	1,505	5	
12	65,7	32,90	1,417	7	CuO
13	67,5	33,80	1,384	5	CuO
14	69,2	34,60	1,354	8	CeO ₂
15	76,4	38,20	1,243	12	CeO ₂
16	78,8	39,90	1,198	9	
17	88,2	44,10	1,105	14	CeO ₂
18	95,2	47,60	1,041	13	CeO ₂
19	107,4	53,60	0,955	5	CeO ₂

Таблица 3. – Данные РФА вторичного каталитического слоя после его термообработки при 800 °С на воздухе

№/п/п	2θ	θ	α, Å	I, %	Фазовый состав
1	21,2	10,60	4,18	12	Бентонит
2	28,2	14,10	3,17	100	CeO ₂
3	31,0	15,50	2,86	14	CeO ₂
4	32,5	16,20	2,75	25	
5	36,5	18,20	2,45	32	
6	44,6	22,30	2,03	8	
7	47,2	23,60	1,92	55	CeO ₂
8	55,9	27,90	1,64	44	CeO ₂
9	59,0	29,50	1,56	15	
10	65,0	32,50	1,431	18	
11	76,4	38,20	1,243	13	CeO ₂
12	79,0	39,50	1,208	10	CeO ₂
13	88,0	44,00	1,107	14	CeO ₂
14	95,2	47,60	1,041	12	CeO ₂
15	107,4	53,70	0,954	5	

Из сопоставления рентгенограмм следует, что уже при прокаливании при 600 °С начинается взаимодействие между оксидами меди и алюминия, которое существенно усиливается при прокаливании при более высоких температурах. На рентгенограммах регистрируются рефлексы от CeO₂ и бентонита, а также неидентифицированного соединения (800 °С). Неидентифицированным соединением, вероятнее всего, является медноалюминиевая шпинель. Этот вывод подтверждают и спектры диффузного отражения (рисунок 1) образца, имеющего состав, указанный выше, после его прокаливания при 800 °С (кривая 1) и смеси азотнокислой основной после термообработки при 780 °С (кривая 2). Спектры отражения образцов близки между собой, что свидетельствует об одинаковом электронном состоянии ионов меди в обоих образцах. Значительные количества меди в рассматриваемых образцах обусловили недостаточную разрешаемость полос поглощения.

Поэтому на экспериментальный образец каталитического блока (3 штуки) был нанесен следующий состав (масс. %): Cu – 45, отходы церита – 10, Al₂O₃ – 20, бентонит – 25.

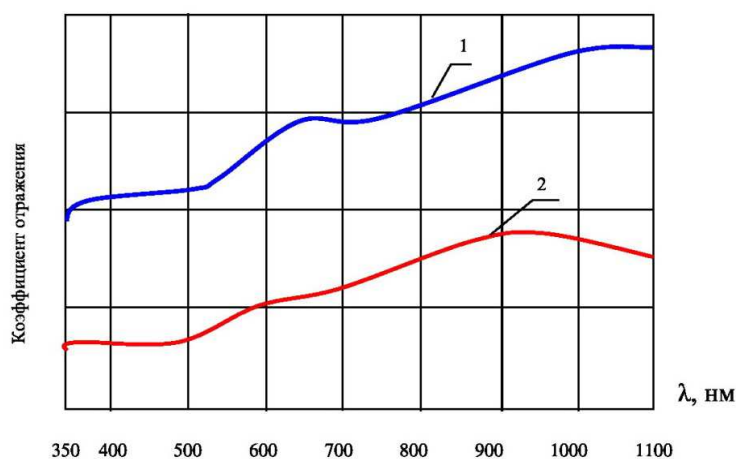


Рисунок 1. – Спектры диффузного отражения образца, соответствующего по составу вторичному слою, после его прокаливания при 800 °С (1) и смеси, состоящей из азотнокислой меди основной и оксида алюминия, после термообработки при 780 °С (2)

Таким образом, поверхностный каталитический слой на никелевых блоках состоит из CeO₂, алюмосиликата и медноалюмоникелевой шпинели. Возможно, протекают и другие твердофазные реакции с образованием новых химических образований, однако для более глубокого изучения этих реакций необходимо проведение исследований методами ИК- и ЭПР-спектроскопии.

По описанной выше технологии были синтезированы три образца оксидных медноцериевых катализаторов на подложке из дробленого пористого никеля, имеющего следующие составы (масс. %):

- 1,0 – CuO; 5,5 – Al₂O₃; 1,0 – отходы церита; 2,5 – алюмосиликат; 90 – Ni_{мер};
- 2,0 – CuO; 3,5 – Al₂O₃; 2,0 – отходы церита; 2,5 – алюмосиликат; 90 – Ni_{мер};
- 2,0 – CuO; 4,5 – Al₂O₃; 1,0 – отходы церита; 2,5 – алюмосиликат; 90 – Ni_{мер}.

Все образцы на воздухе были прокалены (800 °С) и испытаны (таблица 4). Как видно, катализаторы испытывались в достаточно жестких условиях на газовых составах с высоким содержанием СО (3,54–8,28 об. %) и циклогексана (0,36–0,43 об. %) и на объемных скоростях, превышающих 10 000 ч⁻¹.

Таблица 4. – Результаты исследования оксидных медноцериевых на пористом никеле катализаторов в процессе окисления монооксида углерода, циклогексана и их смеси кислородно-азотной смесью

Объемная скорость газового потока – 11 250 м³/ч. Температура прокалики образцов на воздухе 800 °С.

Температура в реакторе, °С	Состав газовой смеси, % об.									Конверсия, %	
	на входе в реактор				на выходе из реактора						
	O ₂	N ₂	CO	C ₆ H ₁₂	O ₂	N ₂	CO ₂	CO	C ₆ H ₁₂	CO	C ₆ H ₁₂
Образец 1											
400	19,56	74,72	5,72	–	17,13	78,38	4,14	0,38	–	93,4	–
480	17,64	73,66	8,28	0,42	15,49	77,83	5,16	1,25	0,27	85,0	35,7
500	20,77	78,86	–	0,37	15,82	82,19	1,90	–	0,04	–	89,2
Образец 2											
400	18,91	75,18	5,91	–	16,9	79,12	3,97	0,01	–	99,83	–
410	17,84	75,75	6,44	–	16,44	78,78	4,78	–	–	100,0	–
402	17,84	77,67	4,12	0,37	15,38	79,54	4,67	0,25	0,16	93,9	56,8
405	18,80	74,05	6,78	0,37	14,14	78,30	6,68	0,68	0,20	90,0	46,0
400	19,25	80,37	–	0,38	18,65	80,47	0,62	–	0,26	–	31,6
500	19,51	80,15	–	0,37	16,10	81,58	2,28	–	0,04	–	88,2
Образец 3											
403	20,59	75,87	3,54	–	18,46	78,37	3,12	0,05	–	98,6	–
406	19,80	72,46	7,36	0,38	14,65	79,40	5,67	0,16	0,12	97,8	68,4
500	18,29	81,28	–	0,43	16,82	80,94	2,21	–	0,03	–	93,5

Анализ данных показывает, что циклогексан как один из трудноокисляемых соединений превращается в диоксид углерода на 8–93% при 500 °С. Монооксид углерода сгорает полностью при температуре 400 °С (на используемой каталитической установке изучение процесса окисления газовых смесей при более низких температурах не предусмотрено).

Сопоставление полученных значений с данными научных публикаций для такого известного катализатора очистки отработавших газов от СО, как меднооксидный¹, позволяет считать каталитический состав даже при столь малом содержании активного компонента существенно более активным.

Тем не менее, учитывая необходимость, с одной стороны, не увеличить существенно динамическое сопротивление потоку газов при насаивании на носитель из пористого никеля вторичного слоя, с другой – увеличить активность вторичного (каталитического) слоя при получении опытной партии катализатора, и исходя из представленных результатов испытаний, во вторичном слое надо было увеличить содержание активных компонентов не менее, чем вдвое, сохранив содержание алюмосиликата на том же уровне.

Разработка конструкции каталитического блока для очистки отработавших газов мотоциклетных двигателей внутреннего сгорания. Исследования были выполнены на блоках двух типов (из пеноникеля и из двух слоев фольги). При этом вследствие значительной плотности пеноникеля особый интерес представляет именно конструкция блока на основе металлической фольги. Такие конструкции известны, причем наиболее близким к предлагаемой конструкции по технической сущности является каталитический блок, образованный чередующимися плоскими и рифлеными металлическими полосами, которые образуют каналы сквозного протекания газа, проходящие через подложку в осевом направлении². Охватывающая подложку оболочка изготовлена из листа, толщина которого равна толщине плоских и рифленых металлических полос или незначительно превосходит ее.

Однако такое исполнение нейтрализатора отработавших газов ДВС не позволяет организовать процесс очистки отработавших газов максимально эффективно, поскольку практически полностью исключает явление турбулентности при прохождении через него отработавших газов. Кроме того, незначительно отличающаяся толщина стенок каналов и охватывающей их оболочки при малой толщине применяемого обычно металлического листа (порядка 20 мкм) и больших объемных скоростях, создаваемых современными двигателями внутреннего сгорания, может отрицательно сказаться на жесткости, а значит, и долговечности конструкции нейтрализатора.

Решение поставленной задачи достигается в нейтрализаторе для очистки отработавших газов двигателя внутреннего сгорания, содержащем корпус с входным и выходным патрубками и каталитический блок, образованный плоскими и гофрированными металлическими полосами, тем, что в плоских металлических полосах выполнена перфорация. При этом в целях повышения жесткости конструкции нейтрализатора охватывающая каталитиче-

¹ Катализатор АОК-78-52 ЛОС // СКТБ «Катализатор». URL: <https://www.katcom.ru/tehnologii-i-materialy/promyshlennaya-ekologiya/kataliticheskoe-okislenie-los-i-so/katalizator-aok-78-52/>

² Носитель катализатора на основе металла (варианты) и способ его приготовления (варианты): пат. RU 2234978C1 / С.Ф. Тихов, В.А. Садыков, В.Ю. Ульяницкий, С.Н. Павлова, О.И. Снегуренко. – Оpubл. 27.08.2004.

ский блок металлическая оболочка изготовлена из листа, толщину которой целесообразно выбрать в 5...8 раз превышающей толщину плоских и рифленых полос (рисунок 2).



Рисунок 2. – Каталитические блоки для мотоциклетного двигателя, изготовленные из металлической фольги

Такое исполнение нейтрализатора отработавших газов ДВС позволяет организовать турбулентность при протекании через него отработавших газов, а, следовательно, увеличить и эффективность их очистки от вредных примесей. При этом наличие жесткой оболочки, особенно при малой толщине применяемой при изготовлении нейтрализатора металлической фольги и больших объемных скоростях, создаваемых современными двигателями внутреннего сгорания, положительно скажется на его долговечности.

Нейтрализатор работает следующим образом. При попадании отработавших газов через входной патрубок в нейтрализатор часть газовых потоков пройдет по сквозным каналам, образованным плоскими перфорированными и рифлеными сплошными металлическими полосами. Однако часть потоков, будучи направленной через перфорацию в сплошных металлических полосах, образует турбулентное газовое течение, что повысит степень очистки отработавших газов от вредных примесей. Турбулентный газовый поток после очистки в каталитическом блоке выходит из нейтрализатора через выходной патрубок.

Разработанная каталитическая композиция наносилась уже на изготовленный блок при непрерывной его продувке, т.к. при предварительном нанесении катализатора на металлическую фольгу и последующем ее свертывании возможно осыпание слоя Al_2O_3 с нанесенным катализатором.

Измерение концентрации окиси углерода (CO) в отработавших газах выполнялись на мотоцикле ММВЗ-3.114:

- с серийной выпускной системой и предложенной системой подачи воздуха в выхлопную трубу;
- с выпускной системой, оборудованной экспериментальным катализатором и системой подачи воздуха в выхлопную трубу (рисунок 3).

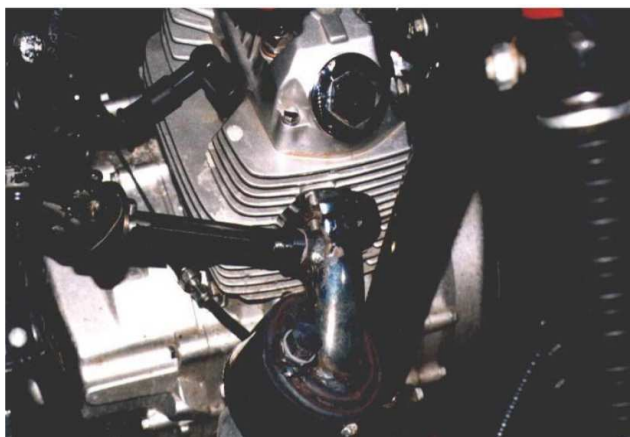


Рисунок 3. – Мотоцикл с выпускной системой, оборудованной экспериментальным нейтрализатором и системой подачи воздуха в выпускную трубу

На испытания были представлены два варианта сотовых катализаторов со следующими геометрическими размерами: диаметр $\varnothing 60$ мм, длина $L 60$. Катализаторы условно помечены: № 1 – с мелкой ячейкой; № 2 – с крупной ячейкой.

Испытания проводились поочередно с двумя вариантами катализатора (см. рисунок 3). Результаты испытаний приведены в таблице 5.

Таблица 5. – Сравнительные замеры содержания СО и СН в отработавших газах бензинового двигателя, установленного на мотоцикле ММВЗ-3.114

Выпускная система, оборудованная экспериментальным катализатором и системой подачи воздуха в выхлопную трубу			Выпускная система с подачей дополнительного воздуха в выпускной трубопровод			Серийная выпускная система					
Катализатор № 1			Катализатор № 2			Катализатор № 1			Катализатор № 2		
<i>n</i> , об/мин	СО, %	СН, ppm концентрации гексана	<i>n</i> , об/мин	СО, %	СН, ppm концентрации гексана	<i>n</i> , об/мин	СО, %	СН, ppm концентрации гексана	<i>n</i> , об/мин	СО, %	СН, ppm концентрации гексана
1000	0,00	001	1050	0,24	000	Замер не проводился			Замер не проводился		
1600	0,16	001	1580	0,27	000	1600	1,2	137	1600	2,1	138
1880	0,16	001	2130	0,63	000	2100	2,1	151	2100	3,5	151
2550	0,30	001	2670	0,86	000	2500	2,5	258	2500	3,75	278
3050	0,60	001	3130	1,07	000	Замер не проводился			Замер не проводился		

При этом установлено, что установка каталитического блока в комплексе с системой подачи воздуха в выпускной трубопровод мотоцикла позволяет добиться значительного снижения концентрации СО и СН в отработавших газах двигателя.

Незначительное увеличение концентрации СО образца № 2 в сравнении с образцом № 1 обусловлено более крупной ячейкой каталитического блока № 2.

Заключение. Проведенные исследования показывают, что применение катализатора в комплексе с системой подачи воздуха позволяет добиться значительного снижения концентрации СО в отработавших газах двигателя мотоцикла. Для уточнения функциональных возможностей комплекса катализатор – система подачи воздуха необходимо провести дополнительные испытания с применением обратных клапанов системы подачи воздуха различного проходного сечения или принудительной подачи воздуха в выпускной тракт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попова Н.М. Катализаторы очистки газовых выбросов промышленных производств. – Алма-Ата: Наука, Каз. ССР, 1991. – 176 с.
2. Янкевич Н.С., Климук А.С., Кравчук Л.С. Снижение содержания вредных примесей в отработавших газах ДВС // Двигателестроение. – 2006. – № 1. – С. 35–37.

REFERENCES

1. Popova, N.M. (1991). *Katalizatory ochistki gazovykh vybrosov promyshlennykh proizvodstv*. Alma-Ata: Nauka, Kaz. SSR. (In Russ.).
2. Yankevich, N.S., Klimuk, A.S. & Kravchuk, L.S. (2006). Snizhenie sodержaniya vrednykh primesei v otrabotavshikh gazakh DVS. *Dvigatellestroenie*, (1), 35–37. (In Russ.).

Поступила 20.01.2025

EXHAUST GAS CLEANING OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE MANUFACTURED BY JSC “MOTOVELO”

N. YANKEVICH

*(Center for System Analysis and Strategic Research
of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk)*

S. YANKEVICH

(Public Corporation “MotoVelo”, Minsk)

Currently, catalytic afterburning is considered to be the most versatile method for reducing harmful impurities in exhaust gases. There are known catalytic systems for burning all regulated components or their combinations (three-way catalysts). However, the issue of developing new design and technological solutions remains relevant due to the fact that the application of a standard system on a specific internal combustion engine usually involves several difficulties.

The article discusses research on the development of a catalytic converter for gasoline motorcycle engines.

Keywords: catalytic cleaning, catalyst, carrier, internal combustion engine.

ТРАНСПОРТ

УДК 625.7

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-39-48

ВЛИЯНИЕ ДОРОЖНОЙ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ К КЛАССИФИКАЦИИ РИСКОВ

*д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ**(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск)**канд. техн. наук, доц. С.В. БОГДАНОВИЧ, М.Г. БУРОВА**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Представлен новый подход к классификации и оценке рисков на загородных автомобильных дорогах, основанный на многомерном анализе системы «Водитель–Автомобиль–Дорога–Среда». Разработана методика оценки рисков с использованием комплексного индекса, учитывающего степень воздействия факторов, типы взаимодействия между элементами системы и компоненты транспортной системы. Особое внимание уделено роли дорожной инфраструктуры и возможностям интеллектуальных транспортных систем в управлении рисками. Предложены инновационные решения по повышению безопасности движения, включая применение «умных» покрытий, систем автомобильной коммуникации и технологий «дорожных цифровых двойников». Показано, что комплексное внедрение современных технологий может снизить количество дорожно-транспортных происшествий на 20–30% в течение 5–10 лет. Представлен анализ социально-экономических эффектов от внедрения предложенных решений.

Ключевые слова: *безопасность дорожного движения, классификация рисков, дорожная инфраструктура, интеллектуальные транспортные системы, комплексный индекс риска.*

Введение. Безопасность дорожного движения остается одной из наиболее острых проблем современного общества. Несмотря на значительные усилия, направленные на снижение аварийности, дорожно-транспортные происшествия (ДТП) продолжают наносить существенный ущерб экономике и обществу. Особую озабоченность вызывает ситуация на загородных автомобильных дорогах с одной проезжей частью, где высокие скорости движения в сочетании с ограниченной инфраструктурой создают повышенные риски для участников движения.

Традиционные подходы к классификации и оценке рисков на автомобильных дорогах, основанные преимущественно на статистических методах и анализе аварийности, не всегда позволяют учесть динамичный характер современных транспортных систем. В условиях стремительного развития технологий и изменения характера дорожного движения возникает потребность в новых, более гибких и адаптивных методах оценки и управления рисками.

Особую роль в обеспечении безопасности дорожного движения играет дорожная инфраструктура. Однако существующие классификации рисков зачастую недостаточно детализируют инфраструктурные факторы, что затрудняет разработку эффективных мер по повышению безопасности. В этом контексте интеграция интеллектуальных транспортных систем (ИТС) в дорожную инфраструктуру открывает новые возможности для мониторинга и оценки опасности узловых пунктов загородных автомобильных дорог в реальном времени.

Цель данной статьи – предложить классификацию рисков на загородных автомобильных дорогах, уделяя особое внимание инфраструктурным факторам и их взаимосвязи с безопасностью дорожного движения. Предлагаемая классификация основана на многофакторном анализе системы «Водитель–Автомобиль–Дорога–Среда» (ВАДС) и учитывает динамический характер взаимодействия между этими компонентами. Особое внимание уделяется адаптивности системы к изменяющимся внешним условиям, включая изменения дорожных покрытий, поведения водителей и внедрение новых технологий. Представленный в статье подход призван способствовать более глубокому пониманию природы рисков на загородных автомобильных дорогах и разработке эффективных стратегий повышения безопасности дорожного движения с учетом современных технологических возможностей.

Основная часть. Оценка рисков на загородных дорогах традиционно основывалась на анализе статистических данных о дорожно-транспортных происшествиях и их последствиях. Эти подходы, сформировавшиеся во второй половине XX в., сыграли значительную роль в понимании факторов, влияющих на безопасность дорожного движения, и разработке мер по снижению аварийности.

Стандартные категории рисков, рассматриваемые в традиционных моделях, включают человеческий фактор, технические неисправности транспортных средств, состояние дорожной инфраструктуры и погодные условия. Такая классификация позволяет выделить основные направления работ по повышению безопасности, но имеет ряд ограничений.

Одним из наиболее распространенных методов оценки рисков является анализ статистики ДТП [1]. Этот метод предполагает изучение данных о количестве, тяжести и обстоятельствах аварий на конкретных участках дорог или в определенных регионах. На основе этой информации рассчитываются различные показатели аварийности, такие как количество ДТП на 1000 автомобилей или на 1 км дороги, которые используются для оценки уровня риска.

Другой распространенный подход – метод конфликтных ситуаций [2]. Этот метод основан на наблюдении и анализе потенциально опасных ситуаций на дороге, которые не приводят к ДТП, но могут указывать на повышенный риск их возникновения. Преимущество данного метода заключается в возможности выявления опасных факторов до того, как произойдет реальное ДТП.

Можно назвать также концепцию «пирамиды безопасности», предложенную Хайнрихом для промышленной безопасности и адаптированную для дорожного движения [3]. Согласно этой концепции, на каждое серьезное ДТП приходится множество менее серьезных инцидентов и еще большее число потенциально опасных ситуаций. Анализ этой «пирамиды» позволяет выявлять и устранять факторы риска на ранних стадиях.

Для оценки безопасности дорог и выявления рисков, связанных с движением по ним, широко используется методика IRAP (International Road Assessment Programme)¹. Однако у нее есть несколько недостатков:

1. Ограниченная гибкость. Методика может не учитывать специфические особенности отдельных регионов или стран, что приводит к недостаточной точности в оценках для определенных условий.
2. Сложность и ресурсоемкость. Оценка по IRAP требует значительных временных и материальных ресурсов, что может ограничивать возможность ее применения в менее обеспеченных регионах.
3. Зависимость от данных. Эффективность методики зависит от качества и полноты данных о дорожном движении и авариях, что не всегда доступно.
4. Недостаток учета человеческого фактора. Методика может недостаточно фокусироваться на аспектах, связанных с поведением водителей и пешеходов, что является важным для комплексной оценки рисков.
5. Отсутствие универсальности. Разные типы дорог (городские, загородные, автомагистрали) могут требовать разных подходов, и методика IRAP может не учитывать их в полной мере.
6. Нехватка оперативности. Метод недостаточно быстро реагирует на изменения в дорожной обстановке или внедрение новых технологий, что может снижать его актуальность.

Эти недостатки ограничивают эффективность IRAP в некоторых ситуациях и требуют дополнительных методов и подходов для комплексной оценки дорожной безопасности.

Традиционные подходы не всегда хорошо применимы и имеют ряд ограничений, особенно в контексте современных автомобильных дорог. Во-первых, они часто не учитывают динамику транспортных потоков, которая может существенно меняться в зависимости от времени суток, дня недели или сезона. Во-вторых, на автомобильных дорогах наблюдается более высокая средняя скорость движения, что увеличивает тяжесть последствий ДТП и требует особого внимания к факторам, влияющим на скоростной режим.

Кроме того, традиционные модели часто не учитывают такую специфику автомобильных дорог, как низкая плотность пешеходов и велосипедистов, ограниченное освещение, возможность появления диких животных на дороге. Эти факторы могут существенно влиять на уровень риска, но не всегда адекватно отражаются в стандартных классификациях.

Еще одним ограничением является недостаточный учет влияния современных технологий как в автомобилях, так и в дорожной инфраструктуре. Системы помощи водителю – автоматическое торможение, адаптивный круиз-контроль, удержание полосы – могут существенно влиять на поведение водителей и уровень риска, но не находят отражения в традиционных моделях оценки.

Таким образом, несмотря на значительный вклад традиционных моделей в понимание рисков на дорогах, современные условия требуют разработки новых подходов к оценке и управлению рисками.

Учитывая ограничения традиционных подходов к оценке рисков, возникает необходимость в разработке новой, более комплексной и адаптивной классификации. Предлагаемая классификация рисков призвана учесть динамический характер современных транспортных систем, особенности автомобильных дорог и влияние новых технологий на безопасность дорожного движения.

Новая методика классификации рисков основывается на многомерном подходе, учитывающем различные аспекты взаимодействия в системе ВАДС (рисунок 1).

Если говорить о предлагаемой классификации более подробно, следует пояснить следующее. К существенным рискам относятся факторы, которые непосредственно приводят к возникновению ДТП или значительно увеличивают их вероятность. Например, гололед на дороге или засыпание водителя за рулем. К значимым рискам относятся факторы, которые косвенно влияют на вероятность ДТП или увеличивают тяжесть их последствий. К ним можно отнести недостаточное освещение дороги или отсутствие барьерного ограждения. Второстепенные риски – это факторы, которые в обычных условиях оказывают минимальное влияние на безопасность движения, но могут стать существенными при определенных обстоятельствах. Например, легкий боковой ветер или небольшие неровности дорожного покрытия.

¹ For a world free of high-risk roads. [Electronic resource] – Mode of access: <https://irap.org/>. – Date of access: 08.11.2024.

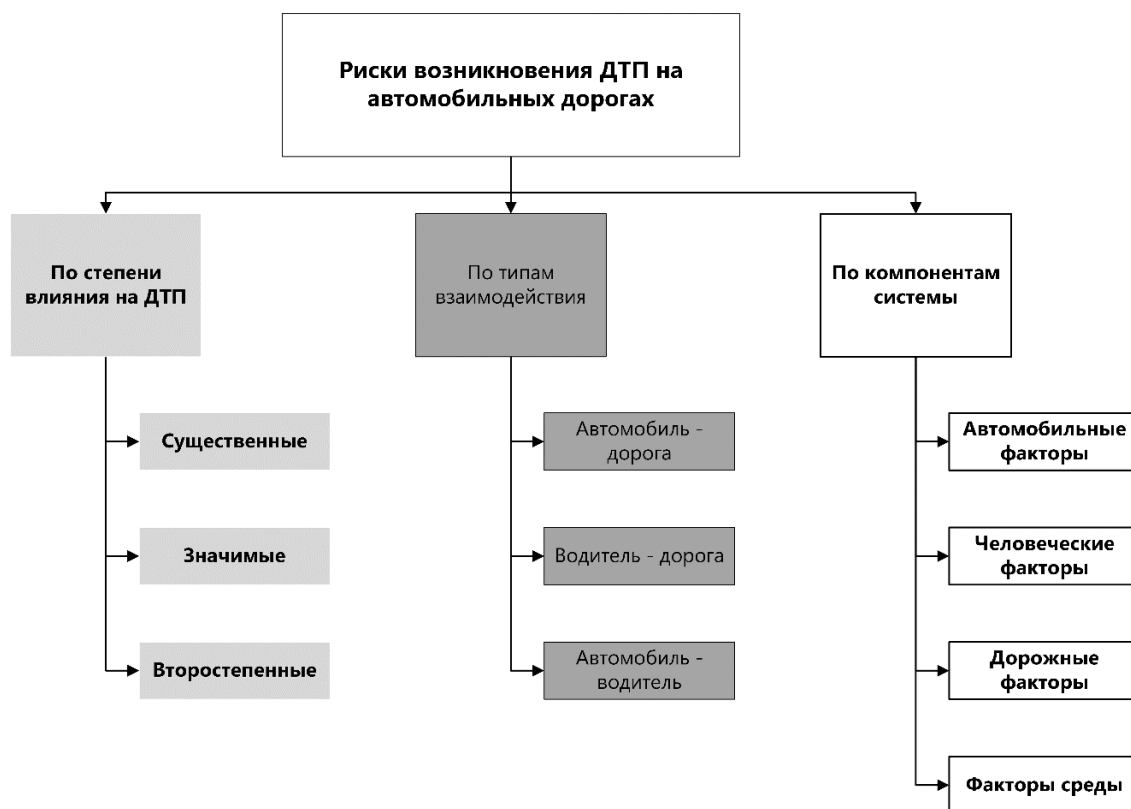


Рисунок 1. – Многомерный подход к классификации рисков

Классификация по типам взаимодействия фокусируется на взаимодействиях между основными элементами дорожной системы. Риски взаимодействия «автомобиль–дорога» включают факторы, связанные с влиянием дорожной инфраструктуры на движение транспортных средств. Например, сцепление шин с дорожным покрытием или видимость дорожной разметки. Риски взаимодействия «водитель–среда» охватывают аспекты восприятия дороги водителем и его реакции на дорожные условия. Сюда можно отнести читаемость дорожных знаков или психологическое воздействие ландшафта на поведение водителя. Риски взаимодействия «автомобиль–водитель» включают факторы, связанные с управлением транспортным средством и использованием его систем. Например, эргономика салона или интерфейс бортовых систем помощи водителю.

Классификация по компонентам системы рассматривает риски в контексте четырех основных компонентов системы ВАДС. Особое внимание уделяется адаптивности системы к внешним условиям. Автомобильные факторы включают технические характеристики транспортных средств, их состояние и оснащение современными системами безопасности. Человеческие факторы охватывают физическое и психологическое состояние водителя, его навыки и опыт, а также поведенческие паттерны. Дорожные факторы включают все аспекты дорожной инфраструктуры – от качества покрытия до наличия и состояния защитных сооружений. Факторы среды охватывают погодные условия, время суток, сезонные изменения и другие внешние факторы.

Влияние каждой категории рисков на безопасность и аварийность предлагается оценивать с помощью комплексного индекса риска (CRI, Comprehensive Risk Index), который учитывает все три измерения классификации:

$$CRI = C_{\text{в}} * T_{\text{в}} * K_{\text{ф}},$$

где $C_{\text{в}}$ – коэффициент степени воздействия;

$T_{\text{в}}$ – коэффициент типа взаимодействия;

$K_{\text{ф}}$ – коэффициент компонента системы.

Предлагаемый комплексный индекс риска представляет собой мультипликативную модель, учитывающую три ключевых измерения оценки рисков: степень воздействия, тип взаимодействия и компонент системы. Мультипликативный характер модели обусловлен следующими соображениями.

1. Синергетический эффект факторов риска. Взаимодействие различных факторов риска носит нелинейный характер, при котором совместное влияние факторов может существенно превышать сумму их индивидуальных воздействий. Мультипликативная модель позволяет учесть этот синергетический эффект, т.к. произведение коэффициентов более точно отражает усиливающее взаимодействие факторов риска по сравнению с их простым суммированием.

2. Принцип критического звена. В системе безопасности дорожного движения действует принцип «критического звена», согласно которому общий уровень риска определяется наиболее слабым компонентом системы. Мультипликативная модель естественным образом реализует этот принцип: низкое значение любого из коэффициентов существенно снижает итоговый показатель CRI, что соответствует реальному влиянию критических факторов на безопасность движения.

3. Использование произведения коэффициентов находит подтверждение в теории вероятностей. Если рассматривать риск как вероятность неблагоприятного события, то при независимых событиях общая вероятность определяется произведением вероятностей отдельных событий. Хотя факторы риска в дорожном движении не являются полностью независимыми, мультипликативная модель позволяет более адекватно отразить их взаимосвязь по сравнению с аддитивной моделью.

Рассмотрим отдельные коэффициенты более детально.

Коэффициент степени воздействия (C_{σ}) изменяется в диапазоне от 0,1 до 1 и отражает интенсивность влияния фактора риска на безопасность движения. Значения, близкие к 1, соответствуют существенным рискам (например, гололед, засыпание водителя). Значения около 0,5 соответствуют значимым рискам (недостаточное освещение, отсутствие барьерного ограждения). Значения, близкие к 0,1, соответствуют второстепенным рискам (легкий боковой ветер, небольшие неровности).

Коэффициент типа взаимодействия (T_{σ}) также изменяется от 0,1 до 1. Коэффициент характеризует взаимодействие между элементами системы ВАДС и учитывает взаимодействие «автомобиль–дорога» (сцепление шин с покрытием), взаимодействие «водитель–среда» (восприятие дорожной обстановки) и взаимодействие «автомобиль–водитель» (эргономика управления).

Коэффициент компонента системы (K_{σ}) изменяется от 0,1 до 1 и отражает влияние конкретного компонента системы ВАДС: автомобильные факторы (техническое состояние ТС), человеческие факторы (опыт и состояние водителя), дорожные факторы (состояние инфраструктуры), факторы среды (погодные условия).

Значение нижней границы коэффициентов на уровне 0,1 позволяет сохранить достаточную чувствительность индекса даже при минимальных значениях коэффициентов, при этом не обнуляя полностью влияние фактора. Даже минимальное влияние фактора риска не может быть полностью проигнорировано в системе безопасности дорожного движения, поэтому нулевое значение нецелесообразно. Кроме того, диапазон от 0,1 до 1 (с шагом 0,1) создает удобную десятибалльную шкалу для экспертной оценки факторов риска, а сохранение минимального значения 0,1 позволяет учитывать кумулятивный эффект даже малозначительных факторов при их совместном влиянии.

Для определения коэффициентов комплексного индекса риска (CRI) можно предложить следующую методику.

1. Коэффициент степени воздействия (C_{σ}) определяется экспертным путем на основе статистических данных об аварийности, результатов моделирования дорожных ситуаций и анализа последствий ДТП. Процедура оценки может быть следующей:

- а) сбор исторических данных о ДТП на исследуемом участке;
- б) анализ причинно-следственных связей;
- в) оценка тяжести последствий;
- г) присвоение значения по шкале:
 - 0,8–1,0 – существенные риски (гололед, засыпание водителя);
 - 0,4–0,7 – значимые риски (недостаточное освещение);
 - 0,1–0,3 – второстепенные риски (легкий боковой ветер).

2. Коэффициент типа взаимодействия (T_{σ}) определяется на основе анализа характера взаимодействия элементов системы ВАДС, данных с датчиков и систем мониторинга и результатов моделирования. Процедура оценки в этом случае:

- а) идентификация типа взаимодействия;
- б) анализ интенсивности взаимодействия;
- в) оценка критичности взаимодействия;
- г) присвоение значения по шкале:
 - 0,8–1,0 – критическое взаимодействие;
 - 0,4–0,7 – значимое взаимодействие;
 - 0,1–0,3 – некритическое взаимодействие.

3. Коэффициент компонента системы (K_{σ}) определяется путем анализа технического состояния компонентов, результатов инструментальных обследований, данных мониторинга. Процедура оценки:

- а) оценка состояния компонента;
- б) анализ его влияния на безопасность;
- в) учет условий эксплуатации;
- г) присвоение значения по шкале:
 - 0,8–1,0 – критическое состояние/влияние;
 - 0,4–0,7 – удовлетворительное состояние;
 - 0,1–0,3 – хорошее состояние.

Предложенная классификация позволяет более точно оценивать и прогнозировать риски на автомобильных дорогах, учитывая их специфику и современные технологические факторы. Она создает основу для разработки более эффективных стратегий управления рисками и повышения безопасности дорожного движения.

Важно отметить, что данная классификация достаточно гибкая и может быть адаптирована к конкретным условиям и задачам. Например, при анализе рисков на определенном участке дороги можно добавить дополнительные параметры, такие как интенсивность движения или наличие опасных поворотов.

Применение этой классификации в сочетании с современными методами сбора и анализа данных, включая использование ИТС, открывает новые возможности для повышения безопасности на загородных дорогах.

Дорожная инфраструктура играет фундаментальную роль в обеспечении безопасности движения, а инфраструктурные риски являются одним из важнейших факторов, влияющих на аварийность. Исследования показывают, что около 30% всех ДТП так или иначе связаны с недостатками дорожной инфраструктуры [4; 5].

Рассмотрим основные категории инфраструктурных рисков и их влияние на безопасность движения.

1. Качество дорожного покрытия. Состояние дорожного покрытия напрямую влияет на управляемость транспортного средства и, следовательно, на безопасность движения. Неровности, выбоины, колейность могут привести к потере контроля над автомобилем, особенно при высоких скоростях, характерных для загородных дорог [6]. Кроме того, качество покрытия влияет на сцепление шин с дорогой, что особенно важно при торможении и маневрировании.

Для оценки влияния качества дорожного покрытия на безопасность движения в условиях Республики Беларусь может быть использован международный индекс ровности (IRI), являющийся интегральным показателем состояния покрытия. В настоящее время существует достаточное количество исследований влияния ровности покрытия на безопасность движения, однако для условий нашей страны подобные исследования не проводились и вопрос требует дополнительного изучения.

2. Обочины, барьерные ограждения и разделительные полосы.

Отсутствие или неудовлетворительное состояние обочин (рисунок 2), барьеров и разделительных полос значительно увеличивает риск серьезных ДТП на автомобильных дорогах, в т.ч. таких видов происшествий, как опрокидывание². Исследования показывают, что наличие укрепленных обочин может снизить количество ДТП на 5–10% [7]. Разделительные барьеры на дорогах с одной проезжей частью могут уменьшить количество лобовых столкновений на 65–80% [8].



Рисунок 2. – Неудовлетворительное состояние обочины может способствовать ДТП

3. Разметка и дорожные знаки. Четкая и хорошо видимая разметка, а также правильно расположенные и легко читаемые дорожные знаки играют решающую роль в информировании водителей об условиях движения и потенциальных опасностях. Исследования показывают, что улучшение видимости разметки может снизить количество ДТП на 10–20% [9].

4. Освещение. Недостаточное освещение на загородных дорогах значительно повышает риск ДТП, особенно в темное время суток. Установка качественного освещения может снизить количество ночных ДТП на 30–50% [10; 11].

² Справочник по безопасности дорожного движения: справ. пособие. – М.: Росавтодор, 2010. – 384 с.

5. Средства сдерживания скорости. Неадекватные средства сдерживания скорости на опасных участках загородных дорог могут привести к серьезным ДТП. Применение таких мер, как шумовые полосы, сужение полос движения или установка камер контроля скорости, может снизить количество ДТП, связанных с превышением скорости, на 20–30% [12].

Для снижения инфраструктурных рисков можно предложить следующие меры:

- регулярный мониторинг и своевременный ремонт дорожного покрытия с использованием современных материалов и технологий;
- внедрение интеллектуальных транспортных систем для мониторинга состояния дорог и транспортных потоков в реальном времени;
- использование адаптивных систем освещения, которые автоматически регулируют интенсивность в зависимости от условий видимости и наличия транспортных средств;
- применение дорожных знаков переменной информации, изменяющих отображаемую информацию в зависимости от дорожной ситуации.

Внедрение этих мер в сочетании с использованием предложенной классификации рисков позволит существенно повысить безопасность движения на автомобильных дорогах. Однако важно отметить, что эффективное управление инфраструктурными рисками требует комплексного подхода, учитывающего взаимодействие всех элементов системы ВАДС.

Развитие инновационных технологий открывает новые возможности для повышения безопасности движения на автомобильных дорогах. Интеллектуальные транспортные системы играют все более значимую роль в управлении дорожным движением и предотвращении аварийных ситуаций. Применение ИТС на автомобильных дорогах имеет свою специфику, связанную с особенностями инфраструктуры и характера движения.

Одним из ключевых направлений применения ИТС является использование автоматизированных систем управления движением для мониторинга и прогнозирования аварийных ситуаций. Такие системы могут включать в себя датчики, камеры видеонаблюдения, метеостанции и другие устройства, собирающие данные о дорожной обстановке в режиме реального времени. Анализ этих данных с помощью алгоритмов машинного обучения позволяет выявлять потенциально опасные ситуации и предпринимать превентивные меры [13].

Интеллектуальные системы сдерживания скорости также демонстрируют высокую эффективность в повышении безопасности на загородных дорогах. К таким системам можно отнести:

- адаптивные камеры контроля скорости, способные автоматически корректировать допустимый скоростной режим в зависимости от дорожных и погодных условий;
- адаптивные дорожные знаки, отображающие информацию о рекомендуемой скорости движения с учетом текущей дорожной обстановки. Исследования показывают, что внедрение таких систем может снизить количество ДТП, связанных с превышением скорости, на 20–30% [14].

Инновационные решения для снижения инфраструктурных рисков также включают в себя:

1. «Умные» покрытия дорог, способные собирать и передавать информацию о своем состоянии и дорожных условиях. Например, покрытия с встроенными сенсорами могут детектировать образование льда или появление трещин, передавая эту информацию в центр управления дорожным движением и непосредственно водителям через системы автомобильной коммуникации.

2. Экосистемы «зеленых» дорог, использующие экологические технологии для создания устойчивой инфраструктуры. Такие решения могут включать в себя системы отвода и очистки дождевой воды, снижающие риск аквапланирования, или специальные покрытия, поглощающие вредные выбросы и снижающие уровень шума [15].

3. Технологии «дорожных цифровых двойников», позволяющие создавать виртуальные модели дорог для симуляции и анализа потенциально опасных участков. Эти технологии дают возможность проводить виртуальные испытания различных сценариев движения и оценивать эффективность предлагаемых мер по повышению безопасности [16].

Особое внимание следует уделить интеграции систем автомобильной коммуникации (V2X – Vehicle-to-Everything) с дорожной инфраструктурой. Эти системы позволяют автомобилям обмениваться информацией друг с другом и с объектами дорожной инфраструктуры, что существенно повышает ситуационную осведомленность водителей и позволяет предотвращать потенциально опасные ситуации [17].

Важно отметить, что эффективное внедрение инновационных технологий требует комплексного подхода, учитывающего взаимодействие всех элементов системы ВАДС. Кроме того, необходимо учитывать возможные риски, связанные с внедрением новых технологий, такие как кибербезопасность и надежность систем в различных условиях эксплуатации. Можно сделать вывод, что инновационные технологии открывают широкие возможности для повышения безопасности движения на автомобильных дорогах. Однако их эффективное применение требует тщательного планирования, учета местных условий и постоянного мониторинга результатов внедрения.

В эпоху цифровизации информационные технологии и умные системы становятся ключевыми инструментами в управлении рисками на автомобильных дорогах. Эти технологии позволяют не только собирать

и анализировать огромные массивы данных, но и принимать оперативные решения на их основе, что существенно повышает эффективность мер по обеспечению безопасности дорожного движения.

Развитие информационных технологий для управления дорожными потоками и предсказания рисков идет по нескольким ключевым направлениям:

1. Большие данные (Big Data) и аналитика: современные системы способны обрабатывать огромные объемы данных из различных источников, включая датчики на дорогах, метеостанции, GPS-треки автомобилей [18] и даже социальные сети. Анализ этих данных с помощью алгоритмов машинного обучения позволяет выявлять скрытые закономерности и прогнозировать потенциально опасные ситуации [13].

2. Искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение: ИИ-системы могут анализировать сложные взаимосвязи между различными факторами риска и предлагать оптимальные решения для их минимизации. Например, ИИ может оптимизировать режимы работы светофоров или рекомендовать оптимальные маршруты для снижения загруженности дорог.

3. Интернет вещей (IoT): сеть взаимосвязанных устройств на дорогах и в автомобилях позволяет собирать данные в режиме реального времени и мгновенно реагировать на изменения дорожной обстановки [19].

Интеграция данных об инфраструктуре, движении транспортных средств, метеоусловиях и операциях дорожных служб в единую систему управления рисками является ключевым фактором повышения безопасности на загородных дорогах. Такая интеграция позволяет создать целостную картину дорожной обстановки и принимать более обоснованные решения.

Влияние автоматизированных и интеллектуальных систем на предоставление водителям оперативной информации о дорожных условиях в реальном времени трудно переоценить. Эти системы позволяют:

- оперативно информировать водителей о изменениях дорожной обстановки через различные каналы связи (бортовые компьютеры автомобилей, мобильные приложения, дорожные информационные табло);
- персонализировать информацию с учетом маршрута движения конкретного автомобиля и предпочтений водителя;
- автоматически адаптировать режимы движения автомобилей (например, ограничивать скорость) в соответствии с текущими дорожными условиями.

Одним из перспективных направлений является разработка систем прогнозирования рисков на основе комплексного анализа данных. Важно отметить, что эффективное использование информационных технологий и «умных» систем в управлении рисками требует создания соответствующей инфраструктуры и стандартов обмена данными. Необходимо обеспечить совместимость различных систем и устройств, а также гарантировать безопасность и конфиденциальность передаваемых данных.

Кроме того, внедрение новых технологий должно сопровождаться соответствующей подготовкой персонала дорожных служб и образовательными программами для водителей. Это позволит максимально эффективно использовать возможности новых систем и минимизировать риски, связанные с человеческим фактором.

Применение информационных технологий и «умных» систем открывает новые горизонты в управлении рисками на автомобильных дорогах. Эти технологии позволяют создать более адаптивную, «прощающую» дорожную среду. Однако их эффективное внедрение требует комплексного подхода, учитывающего технологические, инфраструктурные и человеческие факторы.

Безопасность дорожного движения на загородных дорогах имеет широкий спектр последствий, выходящих за рамки непосредственного предотвращения аварий.

Экономические и социальные потери, связанные с дорожно-транспортными происшествиями (ДТП) на автомобильных дорогах, представляют собой значительное бремя для общества. Согласно исследованиям Всемирной организации здравоохранения, ежегодные глобальные экономические потери от ДТП оцениваются примерно в 3% мирового ВВП³. Для развитых стран эта цифра может достигать 1–2% национального ВВП [20].

К экономическим потерям относят:

- 1) прямые медицинские расходы на лечение пострадавших;
- 2) потери производительности труда из-за временной или постоянной нетрудоспособности;
- 3) материальный ущерб от повреждения транспортных средств и инфраструктуры;
- 4) расходы на работу экстренных служб и ликвидацию последствий ДТП.

Социальные последствия ДТП также весьма значительны. Это не только физические и психологические травмы непосредственных участников аварий, но и влияние на их семьи и ближайшее окружение. Потеря трудоспособности или смерть кормильца может привести к долгосрочным негативным последствиям для целых семей.

Влияние на экологию также является важным аспектом безопасности дорожного движения. ДТП и связанные с ними заторы приводят к увеличению выбросов CO₂ и других загрязняющих веществ. Исследования показывают, что заторы, вызванные авариями, могут увеличивать выбросы CO₂ на 2–3% в масштабах страны

³ Global status report on road safety 2018 [Electronic resource] / World Health Organization. – 17 June 2018. – Mode of access: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684>. – Date of access: 08.11.2024/

[21]. Кроме того, аварии с участием транспортных средств, перевозящих опасные грузы, могут привести к серьезным экологическим последствиям.

Социальные аспекты безопасности инфраструктуры включают уровень доверия граждан к качеству дорог и влияние на развитие регионов. Низкий уровень безопасности дорог может негативно влиять на мобильность населения, экономическую активность и качество жизни в целом. С другой стороны, улучшение дорожной инфраструктуры и повышение безопасности движения могут стать катализатором регионального развития, способствуя экономическому росту и социальному благополучию.

Прогнозируемый эффект от внедрения инновационных решений, систем управления и интеллектуальных транспортных технологий на безопасность движения весьма значителен. По оценкам экспертов, комплексное внедрение современных технологий может снизить количество ДТП на 20–30% в течение 5–10 лет [22]. Это соответствует сохранению сотен тысяч жизней и экономии миллиардов долларов ежегодно в глобальном масштабе.

Ожидаемые эффекты от внедрения инновационных решений:

1. Снижение количества и тяжести ДТП благодаря более эффективному управлению дорожным движением и предотвращению аварийных ситуаций.
2. Уменьшение экономических потерь за счет сокращения времени простоя дорог и снижения расходов на ликвидацию последствий аварий.
3. Улучшение экологической ситуации благодаря оптимизации транспортных потоков и снижению числа заторов.
4. Повышение мобильности населения и стимулирование экономического развития регионов.

Достижение максимального эффекта от внедрения инновационных решений требует комплексного подхода, включающего не только технологические улучшения, но и совершенствование нормативно-правовой базы, образовательные программы для водителей и повышение культуры вождения в целом. Повышение безопасности на автомобильных дорогах имеет широкий спектр положительных социальных, экологических и экономических эффектов. Внедрение инновационных технологий и систем управления рисками представляет собой не только способ сохранения жизней, но и важный фактор устойчивого развития общества в целом.

Заключение. В результате проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

- Предложена многомерная классификация рисков для автомобильных дорог, основанная на системе ВАДС (Водитель–Автомобиль–Дорога–Среда), которая учитывает степень воздействия факторов риска; типы взаимодействия между элементами системы; компоненты транспортной системы.
- Предложен комплексный индекс риска (CRI), позволяющий количественно оценивать уровень опасности на основе трех ключевых коэффициентов: коэффициента степени воздействия ($C\psi$); коэффициента типа взаимодействия ($T\psi$); коэффициента компонента системы ($K\psi$).
- Показано, что внедрение современных интеллектуальных транспортных систем (ИТС) может снизить количество ДТП на 20–30% за счет оперативного мониторинга дорожной обстановки; предупреждения водителей об опасных ситуациях; автоматизированного управления дорожным движением.
- Экономические потери от ДТП составляют 1–2% ВВП в развитых странах, что подчеркивает важность внедрения инновационных решений для повышения безопасности дорожного движения.
- Определено, что эффективное управление рисками требует комплексного подхода, включающего: модернизацию дорожной инфраструктуры; внедрение современных технологий мониторинга; совершенствование нормативно-правовой базы; повышение культуры вождения.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предложенной классификации и методики оценки рисков для принятия обоснованных решений по повышению безопасности движения на загородных автомобильных дорогах. Дальнейшие исследования могут быть направлены на детализацию методик определения коэффициентов риска и разработку специализированного программного обеспечения для автоматизации процесса оценки рисков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В., Скирковский С.В. Аварийность в дорожном движении: учеб. метод. пособие. – Гомель: БелГУТ, 2024. – 168 с.
2. Капский Д.В., Волюнец А.С. Анализ применимости методов прогнозирования и оценки аварийности на конфликтных объектах транспортной сети и перспективы их развития // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 38–48.
3. Heinrich H. W. Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach. – Second Ed. – McGraw-Hill book Company, Inc., 1941. – 448 с.
4. Tri-level study of the causes of traffic accidents: final report [Electronic resource] / J.R. Treat, N.S. Tumbas, S.T. McDonald et al. – Vol. I: Causal factor tabulations and assessments. – 1977. – Mode of access: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/64993>. – Date of access: 08.11.2024.
5. Рунэ Эльвик, Боргер Мюсен Аннэ, Во Трюле. Справочник по безопасности дорожного движения: [пер. с норв.] / под ред. проф. В. В. Сильянова. – М.: МАДИ (ГТУ), 2001. – 754 с.
6. Incorporating road safety into pavement management / S. Tighe, N. Li, L.C. Falls at al. // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2000. – Vol. 1699, Iss. 1. DOI: 10.3141/1699-01

7. Zegeer C.V., Council F.M. Safety relationships associated with cross-sectional roadway elements // *Transportation Research Record*. – 1995. – Iss. 1512. – P. 29–36. Mode of access: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1512/1512-005.pdf>. – Date of access: 08.11.2024
8. Elvik R. The safety value of guardrails and crash cushions: a meta-analysis of evidence from evaluation studies // *Accident Analysis & Prevention*. – 1995. – Vol. 27, Iss. 4. – P. 523–549. DOI: 10.1016/0001-4575(95)00003-I
9. Carlson P.J., Park E.S., Andersen C.K. Benefits of pavement markings: A renewed perspective based on recent and ongoing research // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2000. – Vol. 2107, Iss. 1. DOI: 10.3141/2107-06
10. Wanvik P.O. Effects of road lighting: an analysis based on Dutch accident statistics 1987–2006 // *Accident Analysis & Prevention*. – 2009. – Vol. 41, Iss. 1. – P. 123–128. DOI: 10.1016/j.aap.2008.10.003
11. Bullough J.D., Donnell E.T., Rea M.S. To illuminate or not to illuminate: Roadway lighting as it affects traffic safety at intersections // *Accident Analysis & Prevention*. – 2013. – Vol. 53, Iss. 1. – P. 65–77. DOI: 10.1016/j.aap.2012.12.029
12. Mountain L.J., Hirst W.M., Maher M.J. Are speed enforcement cameras more effective than other speed management measures? The impact of speed management schemes on 30 mph roads // *Accident Analysis & Prevention*. – 2005. – № 37(4). – P. 742–54. DOI:10.1016/j.aap.2005.03.017
13. Traffic flow prediction with big data: a deep learning approach / Y. Lv, Y. Duan, W. Kang et al. // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2015. – Vol. 16, Iss. 2. – P. 865–873. DOI: 10.1109/TITS.2014.2345663
14. Høyе A. Speed cameras, section control, and kangaroo jumps—a meta-analysis // *Accident Analysis & Prevention*. – 2014. – Vol. 73. – P. 200–208. DOI:10.1016/j.aap.2014.09.001
15. Santero N.J., Masanet E., Horvath A. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2011. – Vol. 55, Iss. 9–10. – P. 801–809. DOI:10.1016/j.resconrec.2011.03.010
16. Building digital twins of existing highways using map data based on engineering expertise / F. Jiang, L. Ma, T. Broyd et al. // *Automation in Construction*. – 2022. – Vol. 134. – P. 104081. DOI:10.1016/j.autcon.2021.104081
17. Cooperative Intelligent Transport Systems in Europe: Current Deployment Status and Outlook / K. Sjöberg, P. Andres, T. Buburuzan et al. // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. – 2017. – Vol. 12, Iss. 2. – P. 89–97. DOI: 10.1109/MVT.2017.2670018
18. Транспортное моделирование и оценка условий дорожного движения с использованием навигационной информации / Д.В. Капский, В.В. Касьяник, О.А. Капцевич и др. – Минск: Капитал Принт, 2019. – 144 с.
19. Богданович С.В. Концепция создания транспортной информационно-сервисной платформы на основе технологии интернета вещей // *Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. В 2 т.* – Минск: БНТУ, 2022. – Т. 2. – С. 117–120.
20. Wijnen W., Stipdonk H. Social costs of road crashes: An international analysis // *Accident Analysis & Prevention*. – 2016. – Vol. 94. – P. 97–106. DOI: 10.1016/j.aap. 2016.05.005
21. Barth M., Boriboonsomsin K. Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2008. – No. 2058. – P. 163– 171. DOI: 10.3141/2058-20
22. Inter-national benchmarking of road safety: State of the art / Yongjun Shen, , Elke Hermans, Qiong Bao et al. // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2015. – Vol. 50. – P. 37–50. DOI: 10.1016/j.trc.2014.07.006

REFERENCES

1. Kapskii, D.V. & Skirkovskii, S.V. (2024). *Avariinost' v dorozhnom dvizhenii*. Gomel': BelGUT. (In Russ.).
2. Kapskii, D.V. & Volynets, A.S. (2023). Analiz primenimosti metodov prognozirovaniya i otsenki avariinosti na konfliktnykh ob"ektakh transportnoi seti i perspektivy ikh razvitiya [Analysis of the Applicability of Methods for Predicting and Assessing Accidents at Conflict Sites in the Transportation Network and Prospects for their Development]. In *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii*: sb. nauch. st. (38–48). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Heinrich, H. W. (1941). *Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach*. – Second Ed. McGraw-Hill book Company, Inc.
4. Treat, J.R., Tumbas, N.S., McDonald, S.T., Shinar, D., Hume, R.D., Mayer, R.E., ... Castellán, N.J. (1977). *Tri-level study of the causes of traffic accidents: final report. Vol. I: Causal factor tabulations and assessments* [Electronic resource]. Mode of access: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/64993>. – Date of access: 08.11.2024.
5. Rune, El'vik, Borger, Myusen Anne & Vo, Tryule. (2001). *Spravochnik po bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya*. Moscow: MADI (GTU). (In Russ., transl. from Norwegian).
6. Tighe, S., Li, N., Falls, L.C. & Haas, R. (2000). Incorporating road safety into pavement management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1699(1). DOI: 10.3141/1699-01
7. Zegeer, C.V. & Council, F.M. (1995). Safety relationships associated with cross-sectional roadway elements. *Transportation Research Record*, (1512), 29–36. Mode of access: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1512/1512-005.pdf>. – Date of access: 08.11.2024
8. Elvik, R. (1995). The safety value of guardrails and crash cushions: a meta-analysis of evidence from evaluation studies. *Accident Analysis & Prevention*, 27(4), 523–549. DOI: 10.1016/0001-4575(95)00003-I
9. Carlson, P.J., Park, E.S. & Andersen, C.K. (2000). Benefits of pavement markings: A renewed perspective based on recent and ongoing research. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2107(1). Iss. 1. DOI: 10.3141/2107-06
10. Wanvik, P.O. (2009). Effects of road lighting: an analysis based on Dutch accident statistics 1987–2006. *Accident Analysis & Prevention*, 41(1), 123–128. DOI: 10.1016/j.aap.2008.10.003
11. Bullough, J.D., Donnell, E.T. & Rea, M.S. (2013). To illuminate or not to illuminate: Roadway lighting as it affects traffic safety at intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 53(1), 65–77. DOI: 10.1016/j.aap.2012.12.029

12. Mountain, L.J., Hirst, W.M. & Maher, M.J. (2005). Are speed enforcement cameras more effective than other speed management measures? The impact of speed management schemes on 30 mph roads. *Accident Analysis & Prevention*, 37(4), 742–54. DOI:10.1016/j.aap.2005.03.017
13. Lv, Y., Duan, Y., Kang, W., Li, Z. & Wang, F.Y. (2015). Traffic flow prediction with big data: a deep learning approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 865–873. DOI: 10.1109/TITS.2014.2345663
14. Høyе, A. (2014). Speed cameras, section control, and kangaroo jumps—a meta-analysis. *Accident Analysis & Prevention*, (73), 200–208. DOI:10.1016/j.aap.2014.09.001
15. Santero, N.J., Masanet, E. & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 801–809. DOI:10.1016/j.resconrec.2011.03.010
16. Jiang, F., Ma, L., Broyd, T., Chen, W. & Luo, H. (2022). Building digital twins of existing highways using map data based on engineering expertise. *Automation in Construction*, (134), 104081. DOI:10.1016/j.autcon.2021.104081
17. Sjöberg, K., Andres, P., Buburuzan, T. & Brakemeier, A. (2017). Cooperative Intelligent Transport Systems in Europe: Current Deployment Status and Outlook. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12(2), 89–97. DOI: 10.1109/MVT.2017.2670018
18. Kapskii, D.V., Kas'yanik, V.V., Kaptsevich, O.A., Mozalevskii D.V., Poznyak A.S., Katkov, A.V., ... Volynets, A.F. (2019). *Transportnoe modelirovanie i otsenka uslovii dorozhnogo dvizheniya s ispol'zovaniem navigatsionnoi informatsii*. Minsk: Kapital Print. (In Russ.).
19. Bogdanovich, S.V. (2022). Kontseptsiya sozdaniya transportnoi informatsionno-servisnoi platformy na osnove tekhnologii in-terneta veshchei. *Avtotraktorostroenie i avtomobil'nyi transport: sb. nauch. tr., V 2 t. T. 2*, 117–120. Minsk: BNTU. (In Russ.).
20. Wijnen, W. & Stipdonk, H. (2016). Social costs of road crashes: An international analysis. *Accident Analysis & Prevention*, (94), 97–106. DOI: 10.1016/j.aap.2016.05.005
21. Barth, M. & Boriboonsomsin, K. (2008). Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2058), 163–171. DOI: 10.3141/2058-20
22. Shen, Y., Hermans, E., Bao, Q., Brijs, T., Wets, G. & Wang, W. (2015). Inter-national benchmarking of road safety: State of the art. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, (50), (37–50). DOI: 10.1016/j.trc.2014.07.006

Поступила 18.11.2024

IMPACT OF ROAD AND INTELLIGENT TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE ON TRAFFIC SAFETY: NEW APPROACHES TO RISK CLASSIFICATION

D. KAPSKI

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

S. BOGDANOVICH, M. BUROVA

(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article presents a new approach to the classification and assessment of risks on suburban highways based on the multidimensional analysis of the Driver-Automobile-Road-Environment (DARS) system. The methodology of risk assessment using a comprehensive index (CRI), which takes into account the degree of impact of factors, types of interaction between system elements and components of the transportation system, is developed. Special attention is paid to the role of road infrastructure and the capabilities of intelligent transportation systems (ITS) in risk management. Innovative solutions to improve traffic safety are proposed, including the use of “smart” pavements, vehicular communication systems (V2X) and “road digital twin” technologies. It is shown that the complex introduction of modern technologies can reduce the number of traffic accidents by 20–30% within 5–10 years. The analysis of socio-economic effects from the implementation of the proposed solutions is presented.

Keywords: road safety, risk classification, road infrastructure, intelligent transportation systems, comprehensive risk index.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИОРИТЕТНОГО ДВИЖЕНИЯ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ЗА СЧЕТ УСТРОЙСТВА ВЫДЕЛЕННЫХ ПОЛОС**ЛЮ ЮЙВЭЙ, канд. техн. наук С.С. СЕМЧЕНКОВ***(Белорусский национальный технический университет, Минск)***д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ***(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск)*

Выполнена классификация видов приоритетного движения в транспортной системе города. Приведен анализ вариантов размещения выделенных полос, выявлены преимущества и недостатки по их устройству, а также эксплуатационная специфика. Определены перспективные направления развития выделения полос для движения маршрутного пассажирского транспорта в городах.

Ключевые слова: город, транспортная система, приоритет, маршрутный пассажирский транспорт, выделение полос для движения.

Введение. В городах, где транспортные проблемы становятся все более актуальными, выделенные полосы для движения маршрутных транспортных средств играют важную роль в обеспечении эффективности маршрутного пассажирского транспорта¹. Выделенные полосы для движения маршрутных транспортных средств являются ключевым элементом в стратегии управления городским транспортом² [1]. Они способствуют созданию более устойчивой и эффективной транспортной системы, снижая зависимость от личного автомобильного транспорта и улучшая доступность и качество маршрутного пассажирского транспорта³ [2]. Эти полосы, которые обычно отделены от основной части дороги, предназначены исключительно для автобусов, троллейбусов, электробусов и другого безрельсового маршрутного транспорта, что позволяет им избегать заторов и сокращает время в пути для пассажиров. Выделенные полосы для движения маршрутных транспортных средств могут значительно улучшить эффективность городского транспорта и качество жизни горожан, но их внедрение должно быть частью комплексного подхода к управлению городским транспортом^{4,5}.

Основная часть. Для разработки мероприятий по обеспечению приоритетного движения безрельсового маршрутного пассажирского транспорта следует учитывать несколько ключевых аспектов^{6,7,8} [3; 4]:

1. Исследование потребностей и оценка возможностей – необходимо провести анализ текущего состояния транспортной системы, включая загруженность дорог, скорость движения транспорта, частоту и график движения маршрутного пассажирского транспорта, состояние выделенных полос для обеспечения приоритетного движения маршрутного пассажирского транспорта, выявить проблемы и узкие места, а также потенциал для управления интеллектуальными процессами. Кроме того, необходимо также определить потребности и ожидания пассажиров, чтобы убедиться в целесообразности внедрения новых технологий.

2. Определение маршрутов с приоритетным движением – необходимо определить маршруты, которые наиболее важны для обеспечения эффективного движения пассажирского транспорта. Это могут быть маршруты с высоким пассажиропотоком или маршруты, которые обслуживают значимые объекты (например, больницы, школы и др.).

¹ Manual “Planning Dense and Human Scale Cities” // SUTP. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), GmbH. – February, 2014. URL: <https://sutp.org/principles/planning-dense-and-human-scale-cities/>

² 10 Principles for Sustainable Urban Transport // SUTP. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. – April, 2023. URL: <https://sutp.org/publications/10-principles-for-sustainable-urban-transport/>

³ Global Street Design Guide // Global Designing Cities Initiative. – 2020. URL: <https://globaldesigningcities.org/publication/global-street-design-guide/>

⁴ How to Evaluate Street Transformations: A Focus on Pop-up and Interim Road Safety Projects // Global Designing Cities Initiative. – 2022. URL: https://bicycleinfrastructuremanuals.com/manuals8/How-to-Evaluate-Street-Transformations-2022_GDCI.pdf

⁵ Partnership on Sustainable, Low Carbon Transport, Transport and Climate Change Global Status Report (Brussels, 2021). – 2nd ed. = (Партнерство за рациональный, низкоуглеродный транспорт: доклад о мировом положении дел в сфере транспорта в ракурсе борьбы с изменением климата второе издание (Брюссель, 2021 год). – 2-е изд. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/202202251552---SLOCAT%20Transport%20and%20Climate%20Change%20Global%20Status%20Report_2nd%20Edition.pdf

⁶ Транспортные объединения: технический документ по устойчивому транспорту № 4 / GIZ. – Эшборн: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V., 2010. URL: https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2024/01/GIZ_SUTP_TD4_Transport-Alliances_RU.pdf

⁷ Mercedes-Benz: The standart for buses. URL: https://www.mercedes-benz-bus.com/ru_AM/buy/bus-rapid-transit.html

⁸ PIARC: priority for public transport and other high occupancy vehicles (HOV) on urban roads. Reference: 10.07.B Routes / Roads special iss. II-1995. – P. 1–51.

3. Выбор платформы – необходимо выбрать платформу, которая наилучшим образом соответствует потребностям и возможностям. Это может быть как готовая система и уже имеющиеся выделенные полосы, так и разработка собственной платформы и внедрения новых выделенных полос движения.

4. Разработка инфраструктурных улучшений – необходимо разработать планы по улучшению инфраструктуры, которые могут включать в себя создание выделенных полос для автобусов, троллейбусов и электробусов, установку специальных светофоров с приоритетом для маршрутного пассажирского транспорта и улучшение остановочных пунктов.

5. Внедрение технологий – необходимо изучить возможность внедрения современных технологий, таких как системы для обеспечения приоритетного движения маршрутно-пассажирского транспорта на светофорах, системы GPS-мониторинга для отслеживания движения транспорта и информационные системы для пассажиров.

6. Обучение персонала – внедрение новой системы требует обучения персонала, который будет работать с ней и поддерживать новую систему. Это могут быть водители маршрутного пассажирского транспорта, диспетчеры и технический персонал. Персонал должен быть знаком с основными функциями и возможностями системы.

7. Мониторинг и оценка – после внедрения плана необходимо регулярно проводить мониторинг и оценку его эффективности. Сюда можно отнести сбор и анализ данных о скорости и пунктуальности движения автобусов, а также обратную связь от пассажиров и водителей.

8. Маркетинг и продвижение – важно обеспечить открытую и прозрачную коммуникацию с общественностью о планах и прогрессе в обеспечении приоритетного движения маршрутного пассажирского транспорта. Это могут быть информационные кампании, публичные слушания и регулярные обновления на веб-сайте или через социальные медиа.

9. Поддержка и обслуживание – после внедрения новой системы необходимо обеспечить ее поддержку и обслуживание для быстрого реагирования на возникающие проблемы и сбои.

В Минске, как и во многих других городах, выделенные полосы используются для улучшения эффективности общественного транспорта. Они обеспечивают более быстрое и надежное движение маршрутных транспортных средств, избегая заторов на общих полосах движения. Выделенные полосы для движения маршрутных транспортных средств предлагают ряд преимуществ:

- эффективность движения: маршрутные транспортные средства, движущиеся по выделенным полосам, избегают заторов, что обеспечивает более быстрое и пунктуальное движение;

- надежность: пассажиры могут рассчитывать на более точное соблюдение расписания, поскольку транспортные средства не подвержены задержкам из-за трафика;

- безопасность: выделенные полосы уменьшают вероятность аварий, поскольку маршрутные транспортные средства изолированы от общего потока транспорта;

- стимулирование использования маршрутного пассажирского транспорта: быстрое и надежное движение делает общественный транспорт более привлекательным для пассажиров, что может привести к уменьшению числа личных автомобилей на улицах и, как следствие, к снижению загрязнения воздуха;

- улучшение качества жизни: сокращение времени в пути и смягчение стресса от пробок способствуют улучшению качества жизни горожан.

Маршрутно-пассажирский транспорт в г. Минск имеет высокий спрос. Курсирует более 313 городских маршрутов, в т.ч. ежедневно пассажиров перевозят 930 автобусов, 695 троллейбусов, 70 трамваев. Пиковыми моментами поездки становится утреннее и вечернее время, т.к. большинство горожан направляется на работу.

На конец 2023 г. в Минске обустроено и выделено около 40 км полос для маршрутного пассажирского транспорта. Протяженность выделенных полос движения по проспекту Победителей в прямом и обратном направлении составляет 11 км 627 м. Протяженность в прямом направлении – 5,767 км, в обратном – 5,86 км.

В прямом направлении выделенная полоса движения для маршрутного пассажирского транспорта пролегал от остановки «Минск-Арена к остановке «Университет физкультуры», затем до перекрестка к проезду Дрозды, пересекает перекресток по ул. Радужная к остановке «Радужная», затем к остановкам «Крупцы», «Футбольный манеж», проходит под путепроводом по ул. Орловской к остановке «Площадь Государственного флага», затем через перекресток по ул. Саперов и к остановке «Республиканский центр тенниса». Далее выделенная полоса подходит к перекрестку по ул. Игнатенко, продолжается в сторону остановки «Комсомольское озеро», проходит перекресток по ул. Гвардейская к остановке «Гвардейская». Разметка выделенной полосы прерывается на перекрестке по проспекту Машерова. После чего разметка возобновляется и проходит перекресток по ул. Мельникайте к остановке «Гостиница Юбилейная». Выделенная полоса заканчивается у остановки «Замчище».

В обратном направлении выделенная полоса движения для маршрутного пассажирского транспорта начинается с перекрестка напротив «Альфа-Банка», ориентир дом – № 5, пролегает в сторону остановки «Дворец Спорта», затем через перекресток по ул. Мельникайте к остановке «Гостиница Юбилейная». Разметка выделенной полосы прерывается на перекрестке по проспекту Машерова. Затем разметка возобновляется и ведет

к остановке «Музей истории Великой Отечественной войны». Далее остановки и перекрестки те же самые, что и в прямом направлении. Выделенная полоса заканчивается у остановки «Минск-Арена».

Проблемы, возникающие при эксплуатации выделенных полос движения. Выделение полос для движения маршрутного пассажирского транспорта в городе Минск является частью стратегии управления городским транспортом.

Однако внедрение выделенных полос в Минске столкнулось с рядом вызовов. Было необходимо, во-первых, перестроить существующую дорожную инфраструктуру для обеспечения достаточного пространства для выделенных полос; во-вторых, провести обучение водителей и пассажиров новым правилам движения.

Кроме того, существуют и некоторые недостатки использования выделенных полос для маршрутных транспортных средств:

- ограничение пропускной способности дорог: выделение полосы для маршрутного транспорта может уменьшить количество полос для общего транспорта, что может усугубить пробки в часы пик;
- несоблюдение правил: некоторые водители легковых автомобилей могут использовать выделенные полосы, что приводит к снижению эффективности таких полос и создает проблемы с безопасностью;
- сложности в управлении трафиком: выделенные полосы могут усложнить управление трафиком, особенно на перекрестках, где требуется координация между различными видами транспорта;
- инфраструктурные ограничения: в некоторых городах может быть недостаточно пространства для создания выделенных полос без значительной перестройки дорожной сети;
- стоимость реализации и поддержки: создание и поддержание выделенных полос может быть дорогостоящим, особенно если требуется установка новой сигнализации или изменение дорожной разметки;
- влияние на аварийность: если выделенные полосы неправильно спроектированы или неадекватно обозначены, это может привести к увеличению аварийности;
- проблемы с общественным мнением: некоторые люди могут воспринимать выделенные полосы как несправедливость в отношении водителей легковых автомобилей, что может вызвать общественное недовольство;
- проблемы с обслуживанием: выделенные полосы могут затруднить доступ к краю проезжей части для аварийных служб или служб по уходу за дорогами;
- стоимость внедрения: создание выделенных полос может потребовать значительных инвестиций в инфраструктуру, включая перестройку дорог и установку новых дорожных знаков;
- необходимость контроля: для эффективного использования выделенных полос необходим строгий контроль за соблюдением правил движения, что может потребовать дополнительных ресурсов на организацию службы контроля;
- возможное недовольство водителей личного транспорта: водители могут быть недовольны уменьшением пропускной способности дорог и ограничением их свободы передвижения;
- проблемы с парковкой: в некоторых случаях для создания выделенных полос может потребоваться уменьшение количества мест для парковки вдоль дорог, что, не исключено, приведет к неудобствам для местных жителей и бизнесов;
- проблемы с загрязнением окружающей среды: выделенные полосы могут улучшить эффективность общественного транспорта, но при этом привести к увеличению загрязнения окружающей среды, став причиной пробок на других полосах;
- проблемы с доступностью: выделенные полосы могут затруднить доступ к некоторым районам города для легковых автомобилей, что может вызвать проблемы для местных жителей и бизнесов.

Указанное негативное влияние можно исключить, если использовать в качестве выделенной правую полосу по ходу движения у края проезжей части. Этот способ устройства выделения полос является самым низкокапиталоемким, не требует дополнительных конструктивных мер обособления, упорядочивает размещение уличных стоянок и позволяет организовать движение велосипедистов в определенных случаях. Данный вариант наиболее перспективен, причем не только в Республике Беларусь.

Заключение. Таким образом, одним из эффективных и быстрореализуемых направлений для качественного улучшения ситуации на дорогах в городах может стать система выделенных полос для движения наземного общественного транспорта и транспортно-пересадочных узлов с перехватывающими парковками.

Как показала практика, выделенные полосы для движения общественного транспорта позволяют автобусам быстро и беспрепятственно двигаться по улицам даже в «часы пик», что обеспечивает своевременное передвижение по маршруту и повышает качество пассажирских перевозок. Приоритетный проезд для общественного транспорта содействует увеличению мобильности горожан, а большая вместимость автобусов способствуют снижению загруженности на дорогах города.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В. Определение параметров функционирования системы городского маршрутного пассажирского транспорта // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2(75). – С. 4–13. DOI: 10.53078/20778481_2022_2_4

2. Трофименко Ю.В., Якимов М.Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Пермь: РАДАР, 2022. – 536 с.
3. Gilbert A. Bus rapid transit: Is Transmilenio a miracle cure? // *Transport Reviews*. – 2008. – Vol. 28, No. 4. – P. 439–467. DOI: 10.1080/01441640701785733
4. Scnabel W., Lohse D. Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. – Band 1: Straßenverkehrstechnik; Band 2: Auflage. – Berlin: Verlag für Beuwesen GmbH, 1997. – 595 p.

REFERENCES

1. Kapskii, D.V. (2022). Opredelenie parametrov funktsionirovaniya sistemy gorodskogo marshrutnogo passazhirskogo transporta [Determination of Functioning Parameters for the System of Urban Route Passenger Transport]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta [The Belarusian-Russian university herald]*, 2(75), 4–13. DOI: 10.53078/20778481_2022_2_4. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Trofimenko, Yu.V. & Yakimov, M.R. (2022). *Transportnoe planirovanie: formirovanie effektivnykh transportnykh sistem krupnykh gorodov. 2-e izd., pererab. i dop.* Perm': RADAR. (In Russ.).
3. Gilbert, A. (2008). Bus rapid transit: Is Transmilenio a miracle cure? *Transport Reviews*, 28(4), 439–467. DOI: 10.1080/01441640701785733
4. Scnabel, W. & Lohse, D. (1997). *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 1: Straßenverkehrstechnik; Band 2: Auflage.* Berlin: Verlag für Beuwesen GmbH.

Поступила 18.11.2024

PROSPECTS AND PROBLEMS OF ENSURING PRIORITY MOVEMENT OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT BY MEANS OF ARRANGEMENT OF DEDICATED LANES USING METHODS OF TRAFFIC MANAGEMENT

LIU YUWEI, S. SEMCHENKOV
(*Belarusian National Technical University, Minsk*)

D. KAPSKI
(*Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk*)

Based on the conducted research, the article classifies the types of priority movement in the city transport system, provides an analysis of the options for placing dedicated lanes, identified advantages and disadvantages of their arrangement, as well as operational specifics, and defines promising areas for the development of lane allocation for the movement of route passenger transport in cities.

Keywords: *city, transport system, priority, route passenger transport, lane allocation.*

**АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПРИОРИТЕТНОГО ДВИЖЕНИЯ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА**

ЛЮ ЮЙВЭЙ, канд. техн. наук **С.С. СЕМЧЕНКОВ**
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ
(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск)

Рассматриваются основные алгоритмы и методы обеспечения активного и пассивного приоритета движения маршрутного пассажирского транспорта в городах и мегаполисах. Сделан акцент на основных методах организации и регулирования дорожного движения, в т.ч. и с использованием интеллектуальных транспортных систем, которые обеспечивают приоритет маршрутного пассажирского транспорта в городских условиях различными способами.

Ключевые слова: город, транспортная система, приоритет пассивный и активный, маршрутный пассажирский транспорт, алгоритмы, выделение полос для движения.

Введение. В современных транспортных условиях обеспечение приоритета городскому транспорту общего пользования можно выделить в две большие группы: пассивный приоритет и активный приоритет [1; 2].

Активный приоритет представляет собой воздействие на транспорт, которому предоставляется приоритет, с помощью технических средств светофорного регулирования [3; 4]. Это может быть как отдельная фаза для таких транспортных средств, так и влияние на основной цикл регулирования посредством детекторов транспорта, через которые передается информация на светофорный объект о приближении определенного транспортного средства^{1,2}.

Пассивный приоритет представляет собой способ обеспечения помощи транспортным средствам, которым необходимо предоставить приоритет, на подъезде к перекрестку с помощью разметки: выделение полосы для общественного транспорта и разметки в зоне перекрестка [5–10].

Основные варианты обеспечения пассивного и активного приоритета для маршрутного пассажирского транспорта представлены ниже.

Основная часть. Особенно важным в сфере приоритетного движения городского пассажирского транспорта является предоставление беспрепятственного подъезда к пересечению, т.е. обеспечение (пассивного) приоритета.

Выделяют несколько видов обеспечения пассивного приоритета общественного транспорта на подъезде к пересечению, такие как смещенная стоп-линия, разделенная стоп-линия и перераспределение очереди на подъезде к пересечению.

Из-за больших габаритных размеров при выполнении левоповоротного движения на узких перекрестках автобусам, троллейбусам и т.п. приходится двигаться по траектории большего радиуса. Это обусловлено тем, что выполнению данного маневра может помешать транспорт, стоящий у стоп-линии конкурирующего направления. Для предотвращения данной ситуации принято использовать смещенную стоп-линию (рисунок 1).

При наличии обособленной полосы для движения общественного транспорта может применяться разделенная стоп-линия. Ее применение целесообразно, если:

- в качестве приоритетной полосы выбрана крайняя правая, и общественный транспорт или его часть поворачивают на перекрестке налево;
- отсутствуют приоритетная полоса и остановка общественного транспорта непосредственно за перекрестком. В этом случае разделенная стоп-линия облегчает условия движения общественного транспорта в этой зоне.

Принцип нанесения следующий: перед перекрестком создается отдельная стоп-линия для основного потока транспорта и отдельная для общественного транспорта. При этом стоп-линия для первых относится от пересечения на расстояние, определяемое длиной подвижного состава общественного транспорта и средним количеством транспорта, который успеет накопиться до включения размещающего сигнала светофорного регулирования, а также дистанцией, необходимой для выполнения маневра «смена полосы». Пример приведен на рисунке 2.

¹ Sustainable transport: priorities for policy reform. – Washington, DC: World Bank, 1996. – 131 p.

² How to: Implement Street Transformations – A Focus on Pop-up and Interim Road Safety Projects // Global Designing Cities Initiative. – 2022. – 79 p.

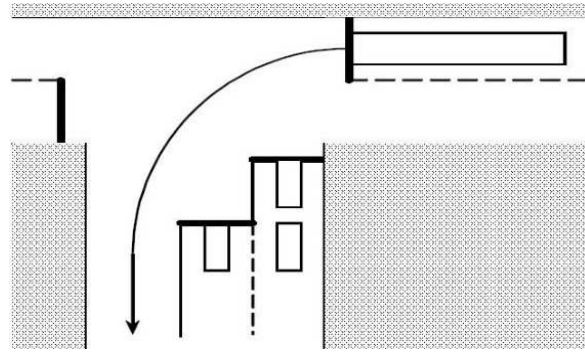


Рисунок 1. – Смещенная стоп-линия³

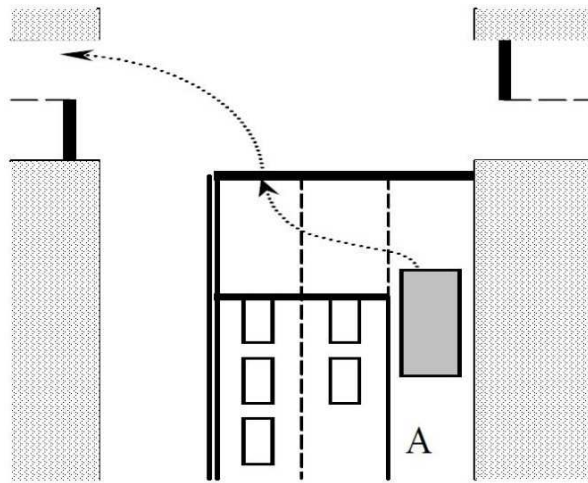
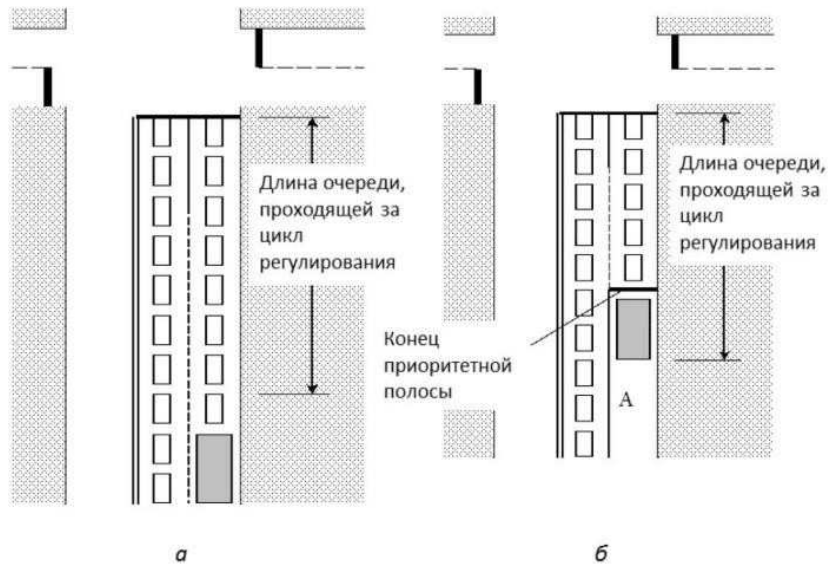


Рисунок 2. – Разделенная стоп-линия³



a – до внедрения; *б* – после внедрения

Рисунок 3. – Перераспределение очереди³

³ How to : Implement Street Transformations – A Focus on Pop-up and Interim Road Safety Projects // Global Designing Cities Initiative. – 2022. – 79 p.

Перераспределение очереди оправдано на перекрестках, на которых интенсивность движения транспортного потока крайне высока, что не позволяет выделить полосу для движения в зоне регулируемого пересечения. Необходимым условием для этого является высокий уровень загрузки перекрестка, при котором транспортный поток не успевает пересечь перекресток за один цикл светофорного регулирования. Перераспределение очереди позволяет обеспечить проход общественного транспорта через перекресток в течение одного цикла, при этом пропускная способность не снижается.

Для примера можно воспользоваться ситуацией, возникающей на загруженном перекрестке до (см. рисунок 3, *а*) и после (см. рисунок 3, *б*) перераспределения очереди. В первом случае автобус не успевает пройти пересечение за время разрешающего сигнала светофорного регулирования. Для перераспределения очереди обособливается участок приоритетной полосы, которая не доходит до перекрестка. Во втором случае автобус всегда оказывается на таком расстоянии от стоп-линии, которое позволяет ему пересечь перекресток в течение разрешающего сигнала светофорного регулирования.

Методы активного обеспечения приоритета обусловлены тем, что приоритет осуществляется за счет изменения режимов светофорного регулирования в зависимости от нахождения автобусов на улично-дорожной сети. Воздействие на режим работы светофорного объекта происходит по определенному сигналу, который формируется с участием бортового оборудования транспорта, датчиков, установленных на самом светофорном объекте, или детекторов транспорта, находящихся над проезжей частью на подъезде к светофорному объекту и связанных передатчиком со светофорным объектом.

Метод активного приоритета для пропуска транспорта формирует одну из групп метода адаптивного управления (АСУ) светофорным регулированием, объединенных общей целью управления и общей схемой по реализации. Эта схема реализуется: формированием сигнала о приближении транспортного средства к пересечению (запрос на предоставление приоритета) и передачей информации системе управления светофорным объектом (контроллеру или центру управления); прогнозированием момента подхода транспорта (единицы), требующего предоставления приоритета, к стоп-линии перед перекрестком; выбором вариантов предоставления приоритета транспорту; расчетом необходимых параметров для осуществления светофорного регулирования, позволяющих предоставить приоритетный пропуск транспорта, и их отработкой; фиксированием прохода транспортной единицы, которой был предоставлен приоритет стоп-линии, и снятием выполненного запроса на приоритетный пропуск.

Зарубежная практика позволяет предусматривать дополнительные меры, помимо уже перечисленных выше. К ним можно отнести: информирование водителя о предоставлении приоритета, а также его условия, которые могут реализовываться включением специального сигнала. Эта форма не регламентирована, поэтому в разных странах, а порой и городах одной страны она реализуется по-разному. Так, в Швеции (Гетеборг), к примеру, в случае, если трамваю невозможно обеспечить приоритет, т.е. проезд через перекресток будет выполнен с задержкой, на специальном светофоре включается сигнал «S» (СТОП). В Хельсинки на обычном светофорном объекте включается специальный точечный сигнал, который расположен сбоку от светофорных головок, – информирование водителя транспортного средства, которому необходим приоритетный пропуск, о получении запроса на приоритет. В Германии такое информирование водителей реализуется с помощью сигнала «А» на специальном светофорном объекте. Необходимо понимать, что точность расчета параметров светофорного регулирования должна составлять около 1 с. Также эта точность желательна и для прогноза прибытия транспорта к стоп-линии. Для этого необходимо, чтобы отсутствовали какие-либо помехи движению транспорта, требующего предоставить приоритет, со стороны основного транспортного потока.

Запрос, подаваемый контроллеру для предоставления приоритета, должен содержать информацию о конкретном местонахождении транспорта, что позволит осуществить прогноз о его прибытии к стоп-линии. Также информацией может служить идентификация самого транспортного средства, что дает возможность определить направление его движения через перекресток, соблюдение расписания или графика движения и т.п.

Определение местоположения транспорта может выполняться различными способами: с помощью активных или пассивных детекторов; с помощью специальных (радиочастотных) детекторов, которые позволяют «узнать» транспортное средство по сигналу, подаваемому бортовым устройством; с помощью систем ГЛОНАСС или GPS; с помощью инфракрасных датчиков, видеодетекторов и датчиков других типов, используемых в составе светофорного поста.

Для прогнозирования момента прибытия определенного транспорта, требующего приоритета, используются математические методы/алгоритмы и статистические данные о времени проезда от точки посылы запроса до стоп-линии, а также оперативные данные о реальных режимах регулирования и транспортной ситуации на улично-дорожной сети в целом.

Можно выделить три основные стратегии предоставления активного приоритета средствами светофорного регулирования, такие как: продление разрешающего сигнала светофорного регулирования; сокращение запрещающего сигнала светофорного регулирования; применение специальной фазы, позволяющей осуществить движение транспорту, которому требуется предоставить приоритет.

Кроме того, на перегонах со значительной протяженностью возможны: пошаговая коррекция режима работы светофорного объекта в течение нескольких циклов; сокращение продолжительности фаз, предшествующих вызываемой.

Находят широкое применение в области маршрутного пассажирского транспорта алгоритмы интеллектуального управления. Они помогают оптимизировать работу транспортных систем и повышают их эффективность. Одним из таких алгоритмов является приоритетный сигнал автобуса. Приоритет сигнала автобуса BSP (Bus Signal Priority), или приоритет транзитного движения, – это оперативная стратегия, которая облегчает движение находящихся в эксплуатации автобусов через перекрестки, контролируемые светофорами. Сокращая время, которое транзитные транспортные средства проводят в очередях на перекрестках, BSP может сократить задержку и время в пути, а также повысить надежность, тем самым повышая качество транзитных услуг. Это потенциально может сократить и общую задержку на перекрестке в расчете на одного человека. При этом BSP пытается предоставить эти преимущества с минимальным воздействием на других пользователей объекта, включая перекрестное движение и пешеходов.

Рабочая среда BSP оптимальна вдоль коридоров для уменьшения задержек на перекрестках и повышения конкурентоспособности маршрутного пассажирского транспорта по сравнению с автомобильным. Здесь используются две основные стратегии: ранний зеленый сигнала (уменьшение красного сигнала), при котором красная фаза укорачивается, чтобы ускорить возвращение зеленого сигнала для приближающегося транзитного транспортного средства; продление зеленого сигнала, когда время зеленого света продлевается после обнаружения транзитного транспортного средства, чтобы дать ему возможность проехать через перекресток.

Приоритетный сигнал автобуса предоставляется: условно – когда приоритет отдается только опоздавшим автобусам; безоговорочно – когда всем автобусам отдается приоритет независимо от того, пришли они раньше или позже.

Потенциальные конструктивные особенности приоритета сигнала автобуса:

- BSP может быть реализован на одном проблемном коридоре перекрестка, на серии коридоров перекрестков, на непоследовательных коридорах перекрестках или на каждом перекрестке;
- для BSP требуется система обнаружения транспортных средств/запроса приоритета, система связи и система управления сигналами светофора (рисунок 4);
- существуют различные подходы для формирования приоритетных запросов, включая: обнаружение транспортного средства у края проезжей части местной системой управления движением; петлевые детекторы на покрытии; прямая активная связь с транзитным транспортным средством (транспондером) или связь через транзитный центр или центр управления дорожным движением на основе данных о местонахождении транспортного средства в режиме реального времени (автоматическое определение местоположения транспортного средства AVL – Automatic Vehicle Location);
- средние полосы движения, предназначенные только для автобусов, потребуют дополнительных мер (и увеличения времени цикла), чтобы избежать конфликтов поворотов между автобусами, автомобилями и пешеходами;
- обнаружение осуществляется либо в порядке очереди, либо с приоритетом определенным направлениям или маршрутам движения. Например, приоритет BRT может иметь приоритет над местным автобусом;
- BSP не будет обрабатываться в последовательных циклах сигнала или если время сигнала светофора находится в переходном состоянии (например, сигнал светофора переходит обратно в свой нормальный режим после срабатывания BSP или предупреждения аварийного автомобиля);
- контроллеры сигналов о пересечении в пределах распознанного приоритетного коридора должны быть оборудованы для работы с BSP, даже если они изначально не оснащены BSP;
- на подходах к перекрестку необходимы соответствующие вертикальные и горизонтальные указатели, чтобы информировать автомобилистов о возможно приближающемся автобусе.



Рисунок 4. – Система управления сигналами светофора [6]

Использование BSP включает в себя следующие преимущества: экономия времени в транзитных поездках; повышение конкурентоспособности транзита; улучшение характеристик коридора для всего трафика; увеличение пропускной способности перегона и улучшение имиджа транзита. Дополнительная экономия времени может быть достигнута, если BSP будет интегрирован с выделенной полосой движения для маршрутного пас-

сажирского транспорта или системы скоростного автобусного сообщения. Капитальные затраты очень низки по сравнению с крупномасштабными физическими мерами по сокращению задержек на перекрестках, такими как разделение уровней. Если будет принят условный приоритет, «ранним» автобусам может быть в нем отказано, чтобы операции в большей степени соответствовали ожидаемым окнам прибытия. Тайминги (временные задержки) сигнала не нужно регулярно переустанавливать с учетом условий дорожного движения и изменения графиков работы.

Однако использование BSP имеет следующие недостатки:

- BSP может привести к небольшому увеличению задержки движения в переулках;
- развертывание BSP требует согласования между затронутыми юрисдикциями, соответствующими заинтересованными сторонами и широкой общественностью, что может задержать реализацию проекта;
- BSP лучше всего работает с удаленными станциями, а это означает, что ближние боковые станции необходимо перемещать, что влечет за собой дополнительные капитальные затраты;
- условный приоритет может потребовать наличия системы AVL, детекторов на борту каждого транспортного средства и более сложной системы управления, что в совокупности увеличивает затраты на развертывание.

Использование специально выделенных полос и движения по ним транспорта широко распространено при работе системы скоростного автобусного сообщения BRT (Bus Rapid Transit), которая является одной из самых рентабельных механизмов для городов для высококачественного обслуживания пассажиров. По сути, BRT представляет собой систему на автобусном транспорте при обеспечении для него выделенной полосы движения и сочетает в себе лучшие эксплуатационные характеристики и удобство современных рельсовых систем. Эта система предусматривает строительство специальных коридоров на улично-дорожной сети вдоль магистралей по всей длине автобусного маршрута, которые предназначены исключительно для их движения. Чтобы получить статус BRT, коридор должен иметь длину не менее 3 км и соответствовать определенным критериям оценки элементов выделенной полосы отвода и выравнивания автобусных полос. Линии BRT отделены от общей проезжей части с помощью физических барьеров, что делает невозможным попадание на них легковых автомобилей, и могут располагаться как на одном уровне, так и на разных с основной проезжей частью.

BRT обеспечивает быстрое обслуживание с меньшим количеством остановок, повышенную надежность, качественные удобства. Системы BRT могут сочетать в себе технологию интеллектуальной транспортной системы с приоритетными режимами проектирования сигналов и дорог для маршрутного пассажирского транспорта, более чистыми и бесшумными транспортными средствами, быстрым и удобным сбором платы за проезд, а также улучшенной интеграцией между станциями и прилегающими территориями. Службы BRT могут работать в различных средах, например, на полосах со смешанным движением, на выделенных магистральных полосах, предназначенных только для маршрутных транспортных средств, или на собственных транзитных путях (либо на одном уровне, либо на отдельных). Также маршрутный транспорт BRT оснащается аппаратными средствами (рисунок 5).

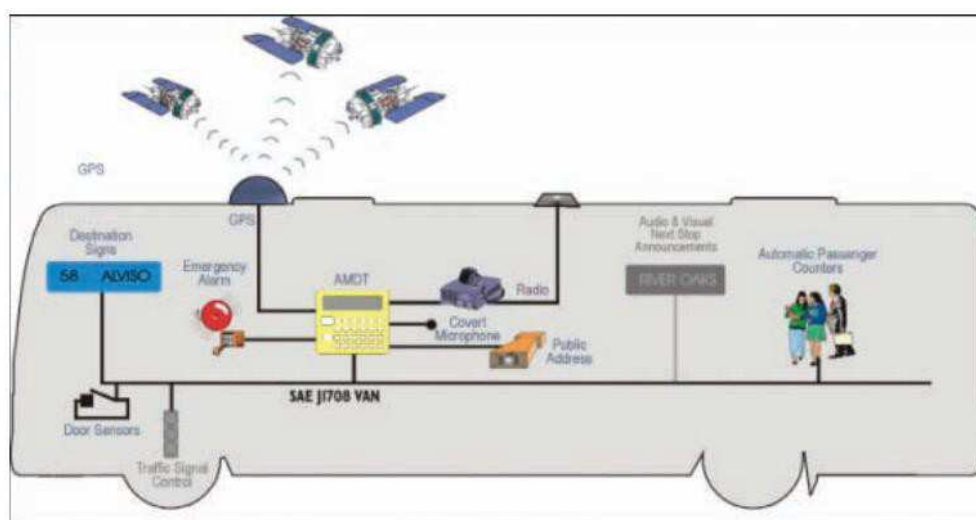


Рисунок 5. – Аппаратные средства на борту маршрутного транспортного средства [6]

BRT обычно реализуется на длинных пробегах, где находится большое количество центров деятельности с высокой плотностью населения или узлами развития, соединяющих город или обеспечивающих связи между центрами крупных городов и отдаленными жилыми и коммерческими районами. При наличии льготных для

маршрутного транспорта объектов, таких как выделенная полоса, предназначенная только для маршрутного пассажирского транспорта, время в пути BRT может конкурировать с автомобилем в перегруженных городских коридорах, что способствует привлечению новых пассажиров. BRT имеет возможность модернизации и расширения, чтобы удовлетворить растущий спрос в коридоре, и может служить предшественником легко рельсового транзита Light Rail Transit (LRT).

Есть два типа BRT, которые различаются требованиями к капиталовложениям и уровнем предоставляемой инфраструктуры:

- BRT 1 – услуга премиум-уровня с более высокой скоростью работы, большей надежностью, меньшим количеством остановок и большим автобусным сообщением. Автобусы и станции имеют маркировку, как правило, со стандартными удобствами, такими как навесы, скамейки и информацией для пассажиров в режиме реального времени.

- BRT 2 требует значительно более высоких капитальных вложений, чем BRT 1, из-за специализированных или выделенных подъездных путей соответствующей инфраструктуры, такой как станции большой вместимости с улучшенными удобствами, аналогичными тем, что есть на линиях легкого или тяжелого железнодорожного транспорта, а также полос для проезда на станциях, позволяющих транспортным средствам гибко объезжать станции.

Служба BRT 1 обычно работает по трем типам маршрутов:

- полосы смешанного движения – выделенные полосы движения, используемые как для маршрутного транспорта, так и для регулярного движения;

- переоборудованные полосы только для маршрутного транспорта – полосы, обычно у края проезжей части, которые были переоборудованы из полос для смешанного потока или парковочных полос в выделенные полосы только для маршрутного пассажирского транспорта;

- переоборудованные полосы для автомобилей с большой посещаемостью (HOV).

Служба BRT 2 работает с большим физическим разделением и сегрегацией от общего трафика в отличие от системы BRT 1 для полос смешанного движения или выделенных полос для маршрутного пассажирского транспорта:

- выделенные полосы только для маршрутного пассажирского транспорта – аналогично переоборудованной полосе движения для маршрутного транспорта, за исключением того, что новая полоса движения должна быть создана внутри улицы для выделенной полосы движения для маршрутного транспорта, либо по центральной середине, либо у края проезжей части. Выделенные полосы для маршрутного транспорта предназначены специально для транзитного транспорта и физически отделены от смешанного движения барьерами, столбами или приподнятыми разделительными полосами/бордюрами. Таким образом, физическая реализация и капитальные затраты для выделенных полос для маршрутного транспорта значительно выше, чем для переоборудованных;

- полосы HOV (в новом ряду) – аналогичны переоборудованным полосам движения для маршрутного транспорта, за исключением того, что новая полоса движения должна быть создана внутри медианы или у края проезжей части автострады или скоростной автомагистрали. Эти объекты отделены от смешанного движения бордюрами или столбиками. Физическая реализация и капитальные затраты на выделенные полосы для маршрутного транспорта намного выше, чем для переоборудованных полос. Ночью они могут вернуться на полосу движения со смешанным потоком;

- транзитные пути среднего уровня – выделенные транзитные полосы отвода, которые физически отделены от смешанного движения, за исключением перекрестков, а также входов и выходов с транзитных путей;

- отдельные транзитные пути похожи на транзитные пути на одном уровне. Однако все переходы разделены по уровням эстакады или подземными переходами.

Вывод. Выполненный анализ алгоритмов обеспечения приоритета маршрутного пассажирского транспорта позволил раскрыть основные преимущества и специфику различных аспектов организации движения маршрутных транспортных средств. Можно заключить, что в Республике Беларусь следует более активно прибегать к приоритетному регулированию движения маршрутного пассажирского транспорта. Некоторые виды обеспечения приоритета можно рассматривать как дополнительные. Важно отметить, что для достижения синергетического эффекта необходимо увязывать обеспечение приоритета безрельсовых и рельсовых маршрутных транспортных средств, что обеспечит взаимосвязь принимаемых управленческих, организационных и планировочных решений по его обеспечению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А.Ю., Головных И.М. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов. – Новосибирск: Наука, 2004. – 267 с.
2. The Hand book of road safety measures / R. Elvick, T. Vaa, A. Hoye et al. – Second edition. – Bingley: Emerald Group Published Limited, 2009. – 1124 p. DOI 10.1108/9781848552517

3. Планирование устойчивой городской мобильности: учеб.-метод. пособие / А.О. Лобашов, С.С. Семченков, Е.Н. Кот и др. – Минск: БНТУ, 2022. – 180 с.
4. Wachs M. Learning from Los Angeles: transport, urban form, and air quality // *Transportation*. – 1993. – Vol. 20. – P. 329–354.
5. Печерский М.П., Хорович Б.Г. Автоматизированные системы управления движением в городах. – М.: Транспорт, 1979. – 176 с.
6. Пржибыл П., Свитек М. Телематика на транспорте / пер. с чеш. О. Бузека и В. Бузковой; под ред. проф. В.В. Сильянова. – М.: МАДИ, 2003. – 540 с.
7. Комаров В.В., Гараган С.А. Архитектура и стандартизация телематических и интеллектуальных транспортных систем. Зарубежный опыт и отечественная практика. – М.: Энергия, 2012. – 352 с.
8. Автоматизированные системы управления дорожным движением / Д.В. Капский, Ю.А. Врубель, Д.В. Навой и др. – Минск: Новое знание; М.: Инфра-М, 2015. – 368 с. – (Высшее образование).
9. Scnabel W., Lohse D. Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. – Berlin: Verlag für Beuwesen GmbH, 1997. – Band 2: Verkehrsplanung. – 2 Auflage. – 610 p.
10. Семченков С.В., Капский Д.В. Управление режимом работы маршрутного пассажирского транспорта секторальным методом // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки*. – 2022. – № 10. – С. 59–63.

REFERENCES

1. Mikhailov, A.Yu. & Golovnykh, I.M. (2004). *Sovremennye tendentsii proektirovaniya i rekonstruktsii ulichno-dorozhnykh setei gorodov*. Novosibirsk: Nauka. (In Russ.).
2. Elvik, R., Vaa, E., Høye, A. & Sørensen, M. W. J. (2009). *The Hand book of road safety measures*. Bingley: Emerald Group Published Limited. DOI 10.1108/9781848552517
3. Lobashov, A.O., Semchenkov, S.S., Kot, E.N., Kapskii, D.V. & Bogdanovich, S.V. (2022). *Planirovanie ustoichivoi gorodskoi mobil'nosti: uchebno-metodicheskoe posobie*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
4. Wachs, M. (1993). Learning from Los Angeles: transport, urban form, and air quality. *Transportation*, (20), 329–354.
5. Pecherskii, M.P. & Khorovich, B.G. (1979). *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya dvizheniem v gorodakh*. Moscow: Transport. (In Russ.).
6. Przhibyl, P. & Svitek, M. (2003). *Telematika na transporte* [per. s chesh. O. Buzeka i V. Buzkovo; pod red. prof. V.V. Sil'yanova.]. Moscow: MADI. (In Russ.).
7. Komarov, V.V. & Garagan, S.A. (2012). *Arkhitektura i standartizatsiya telematicheskikh i intellektual'nykh transportnykh sistem. Zarubezhnyi opyt i otechestvennaya praktika*. Moscow: Energiya. (In Russ.).
8. Kapskii, D.V., Vrubeľ, Yu.A., Navoi, D.V. & Rozhanskii, D.V. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniem* (Vysshee obrazovanie). Minsk: Novoe znanie; Moscow: Infra-M. (In Russ.).
9. Scnabel, W. & Lohse, D. (1997). *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 2: Verkehrsplanung*. 2 Auflage. Berlin: Verlag für Beuwesen GmbH.
10. Semchenkov, S.V. & Kapskii D.V. (2022). Upravlenie rezhimom raboty marshrutnogo passazhirskogo transporta sektoral'nym metodom [Operation Mode Management of Route Passenger Transport Sectoral Method]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [*Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science*], (10), 59–63. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 18.11.2025

**ANALYSIS OF ALGORITHMS AND METHODS OF ENSURING
PRIORITY MOVEMENT OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT**

LIU YUWEI, S. SEMCHENKOV
(Belarusian National Technical University, Minsk)

D. KAPSKI
(Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk)

The article considers the main algorithms and methods of ensuring active and passive priority of movement of route passenger transport in cities and megalopolises. The emphasis is placed on the main methods of organization and regulation of traffic, including the use of intelligent transport systems, which ensure the priority of route passenger transport in urban conditions in various ways.

Keywords: city, transport system, priority, passive and active, route passenger transport, algorithms, allocation of traffic lanes.

УДК 656

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-60-69

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРИОРИТЕТНОГО ДВИЖЕНИЯ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

ЛЮ ЮЙВЭЙ, канд. техн. наук С.С. СЕМЧЕНКОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ
(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск)

Представлены сформулированные на основе исследований практические предложения организационного характера по оптимизации движения и обеспечению приоритетности маршрутного пассажирского транспорта, позволяющие уменьшить время ожидания пассажиров и улучшить эффективность транспортной системы.

Ключевые слова: город, транспортная система, приоритет, маршрутный пассажирский транспорт, мероприятия.

Введение. Следует отметить, что в большинстве случаев среда полос – смешанное движение (рисунок 1). Ее формируют как транзитные, так и нетранзитные транспортные средства, включая маршрутный транспорт, грузовые автомобили, личные автомобили и мотоциклы, которые используют полосы смешанного движения практически на равных условиях. Потенциальными особенностями конструкции могут быть: полосы для перехода в очередь на перегруженных перекрестках; улучшения в области светофоров, такие как централизованная координация и приоритет сигнала автобуса; создание каналов на перекрестках, более длинные радиусы бордюров и закругленные углы; приоритет начала движения от остановочных пунктов и т.д. [1–3].



Рисунок 1. – Пример полос смешанного движения на проспекте Победителей

Преимущество использования полосы смешанного движения – минимальные капитальные затраты, поскольку нет необходимости в серьезных физических изменениях или расширении проезжей части. Задержки на перекрестках можно уменьшить, если вдоль коридора реализовать приоритет сигнала автобуса и полосы перехода в очередь [4–6].

Вместе с тем есть и существенные недостатки: на работу маршрутного транспорта влияют условия дорожного движения и заторы, что приводит к снижению скорости и надежности, а также к увеличению вероятности столкновений [7–10]. Задержка маршрутного транспорта также может быть вызвана правым поворотным потоком, ожиданием в очереди или двойной парковкой транспортных средств, а объединение, поворот и посадки/высадки пассажиров могут задерживать движение смешанного потока. Отсутствие фиксированной инфраструктуры или направляющих делает систему менее «постоянной», что может снизить потенциал развития вдоль коридора.

Основная часть. *Переоборудованные полосы (выделенная полоса) для маршрутного транспорта* (рисунок 2) – парковка у тротуара или полосы со смешанным потоком, переоборудованные для использования транзитными транспортными средствами только в периоды пиковой нагрузки или в течение дня. После окончания рабочего времени эти полосы снова возвращаются к смешанному движению. Переоборудованные полосы, предназначенные только для маршрутного транспорта, не требуют таких физических изменений, как расширение улицы или полосы отвода улицы.

Рабочая среда полосы обычно выделяется как предназначенная только для маршрутного транспорта в периоды пиковой нагрузки или в дневное время в зависимости от условий движения и спроса на маршруте в течение дня. Полосы могут быть частично зарезервированы (т.е. такси, многоместным транспортным средствам или поворачивающим транспортным средствам может быть разрешено использовать полосу) или полностью зарезервированы (только для маршрутного транспорта). Переходы на перекрестках выполнены на одном

уровне. Смешанному транспорту обычно разрешается въезжать на полосы, предназначенные для маршрутного транспорта, или пересекать их для поворота или парковки в специально отведенных местах вдоль края проезжей части.

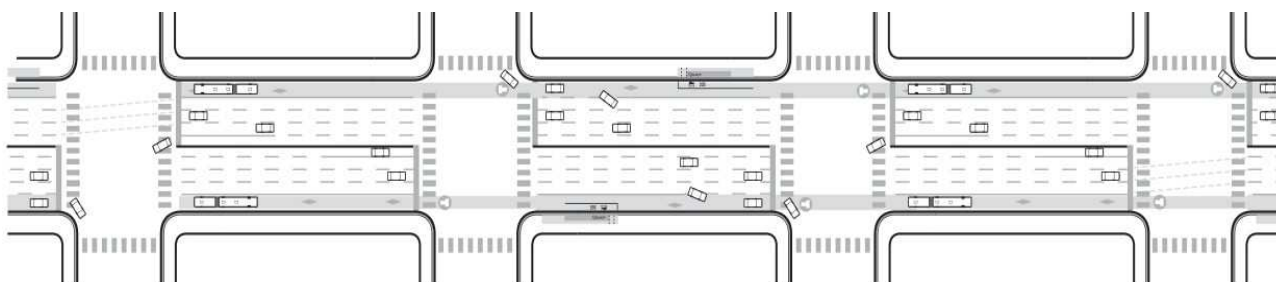


Рисунок 2. – Концепция выделенной полосы движения для маршрутного пассажирского транспорта у края проезжей части

Особенностями конструкции могут быть:

- добавление полосы перехода для очереди на перегруженных перекрестках;
- улучшения в области светофоров, такие как централизованная координация и приоритет сигнала автобуса (BRT);
- обозначены соответствующими дорожными знаками, буквой на полосе и цветом тротуара (рисунок 3);
- работает «по потоку» трафика;
- если рядом с переоборудованной полосой, предназначенной для маршрутного транспорта, имеется полоса для парковки, возможно, потребуется ввести запрет на парковку в период пиковой нагрузки.

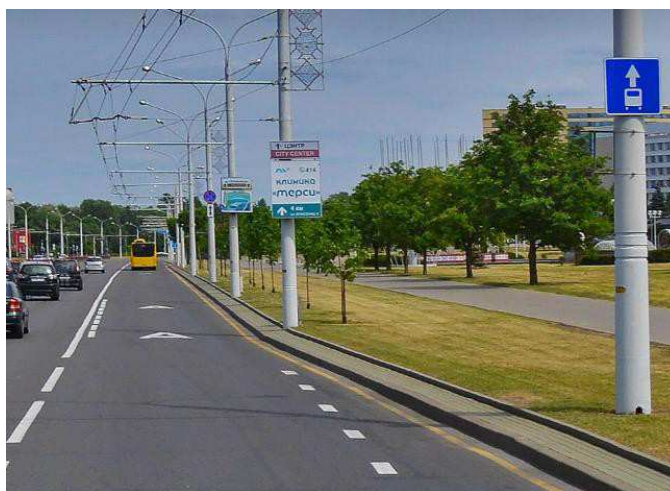


Рисунок 3. – Выделенная полоса для маршрутного транспорта

Преимущества использования выделенной полосы для маршрутного транспорта – возможность получения дополнительных конкурентных преимуществ по сравнению с автомобилями и автобусами и т.п., движущимися по полосам со смешанным потоком. Маршрутный транспорт на выделенной полосе может двигаться быстрее, надежнее и безопаснее, чем автобусы и т.п. на полосах со смешанным движением. Можно выдерживать более высокие нагрузки в пиковые периоды и сохранять более короткие интервалы движения, поскольку движение смешанного потока не мешает движению автобусов. В сочетании с BRT и полосами для перехода в очередь задержки движения на перекрестках можно свести к минимуму. Смешанное движение не препятствует объединению, повороту или посадке/высадке пассажиров. Вдоль коридора существует потенциал для интенсификации и диверсификации развития.

Недостатки: маршрутный транспорт по-прежнему пересекает перекрестки на одном уровне. Выделенные полосы физически не отделены от полос смешанного движения, что может привести к конфликтам с поворачивающимися или припаркованными транспортными средствами. Для предотвращения конфликтов с припаркованными транспортными средствами могут потребоваться запреты на парковку в часы пик. Преимущества во времени в пути по сравнению с автомобилем достигаются только в те часы, когда маршрутный транспорт движется по выделенной полосе. Преобразование полос в выделенные полосы для маршрутного транспорта может потребовать перемещения парковок, трафика, предприятий и пешеходов.

Капитальные затраты выше, чем у BRT, работающего на полосах смешанного движения. Активное правоприменение необходимо для того, чтобы выделенные полосы движения были свободны от непредназначенных для этого транспортных средств.

Полоса для маршрутного транспорта с большим количеством пассажиров (HOV) (рисунок 4) расположена вдоль края проезжей части автомагистрали или скоростной автомагистрали для автомобилей HOV и маршрутного транспорта. Эти полосы создаются из существующих полос движения. Переоборудованные полосы движения для маршрутного транспорта могут потребовать повторной разметки и некоторого незначительного расширения дороги, хотя дополнительная полоса движения в пределах профиля автомагистрали или скоростной автомагистрали не требуется. Переоборудованные полосы (выделенные полосы) для маршрутного транспорта могут работать в обоих направлениях.

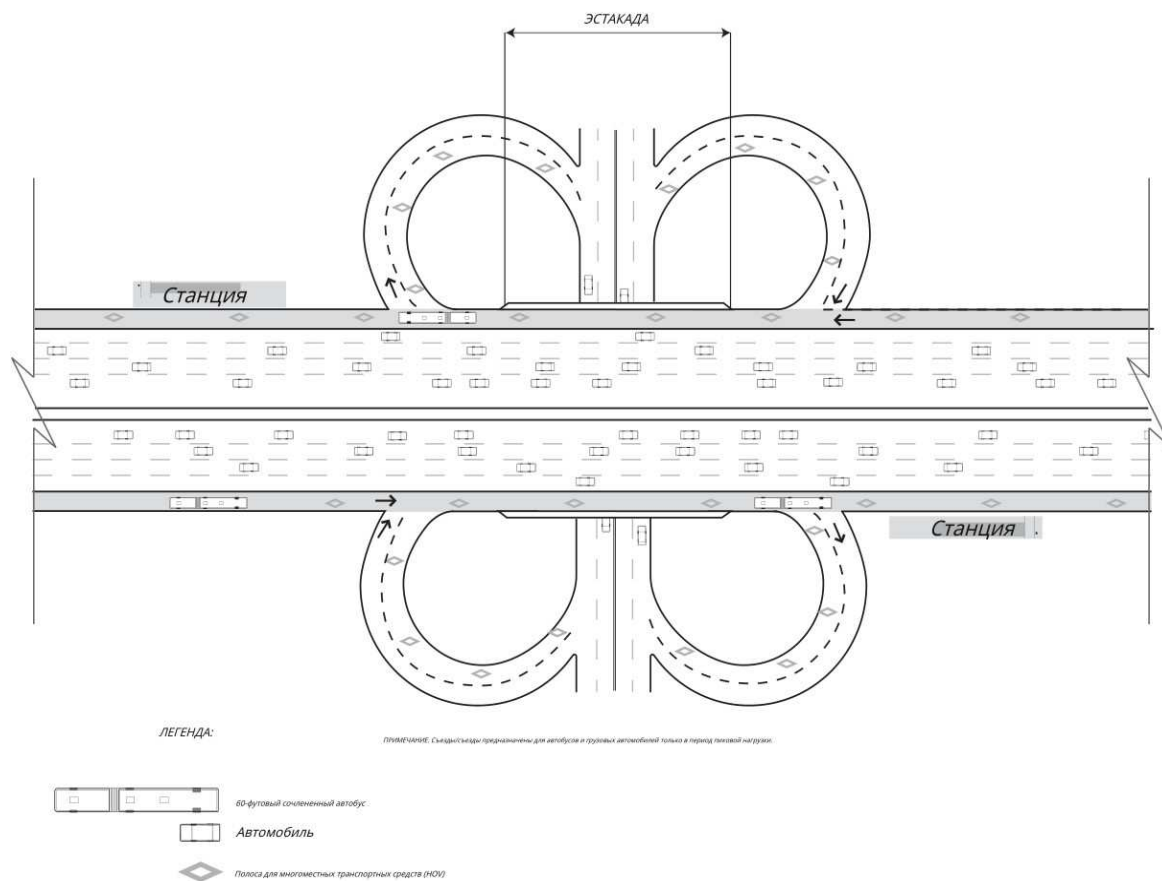


Рисунок 4. – Пример переоборудованной полосы (выделенная полоса) движения для HOV и маршрутного транспорта

Рабочая среда полосы для маршрутного транспорта обычно используется в периоды пиковой нагрузки или в дневное время в зависимости от загруженности дорог в течение дня. Линии, обозначения и указатели используются для того, чтобы отличать полосы движения для маршрутного транспорта от других полос. Преобразованные полосы движения для маршрутного транспорта снова превращаются в смешанные полосы после пиковой загрузки или в нерабочее время. Там, где работает BRT у края проезжей части, могут быть предусмотрены специальные въезды/выезды для HOV, чтобы сократить время въезда/выезда.

Возможные особенности конструкции:

- эксклюзивные полосы движения для автомобилей HOV на существующих пандусах для BRT, работающих у края проезжей части;
- там, где специальные пандусы недоступны, в начале въездов устанавливаются специальные светофоры, позволяющие маршрутному транспорту и автомобилям HOV двигаться дальше;
- обозначены соответствующими дорожными знаками, буквой на полосе и цветом тротуара.

Преимущества переоборудованных полос для автомобилей HOV и маршрутного транспорта: преобразованные полосы позволяют маршрутному транспорту работать быстрее, надежнее и безопаснее маршрутного транспорта на полосах со смешанным потоком, а также позволяют автомобилям HOV обходить заторы. Увеличенный интервал между остановками обеспечивает маршрутному транспорту возможность двигаться с гораздо более высокими рабочими скоростями, чем при использовании выделенной полосы для маршрутного транспор-

та. Въезд/выезд с автострады или скоростной автомагистрали у края проезжей части облегчен, особенно благодаря наличию прямых съездов.

Недостатки: поскольку маршрутный транспорт делит одну полосу с автомобилями HOV, то они могут препятствовать движению маршрутного транспорта, что делает полосы для HOV менее эффективными, чем выделенные полосы для маршрутного транспорта. Поскольку полосы HOV физически не отделены от обычных полос движения, на полосу могут въезжать обычные транспортные средства. Это особенно проблематично у края проезжей части полос движения, где транспортные средства, не предназначенные для перевозки пассажиров, выезжают на полосу движения на въездах и вызывают задержки при использовании полосы движения для выезда на съезды с автострады или скоростной автомагистрали. Требуются строгие меры по предотвращению выезда транспортных средств, не являющихся автомобилями HOV, за пределы полосы движения для маршрутного транспорта и HOV. Если станции BRT расположены у края проезжей части, маршрутному транспорту может быть сложно выехать обратно на полосу для автомобилей HOV и маршрутному транспорту. Маршрутный транспорт, обслуживающий промежуточные станции, расположенные за пределами автострады или скоростной автомагистрали, также может испытывать задержки из-за слияния потоков.

Предлагаемые варианты организации движения на перекрестках. Задержки на перекрестках из-за стоящих в очереди транспортных средств влияют на работу маршрутного транспорта. Совокупное влияние задержки на перекрестке может существенно снизить своевременность и скорость движения маршрутного транспорта. Полосы обхода очереди предназначены для минимизации задержек в пути за счет специальных приоритетных полос, часто правоповоротных полос, которые позволяют транзитному движению проезжать через них. Это позволит транзитным транспортным средствам объезжать длинные очереди в перегруженных точках, включая перекрестки и подъезды к путепроводам, и обеспечит важное конкурентное преимущество в сильно перегруженных коридорах. Полосы для обхода очереди сокращают задержки в транспорте, повышают скорость движения и надежность расписания.

Полосы обхода очереди обычно устанавливаются на сильно перегруженных перекрестках, при этом приоритет отдается тем перекресткам, которые обеспечивают наибольшую выгоду для маршрутного транспорта. Они часто комбинируются с приоритетом сигнала автобуса (BRT) и могут быть интегрированы с расширенными стоп-уширениями – подход, при котором основная полоса остановки для смешанного движения смещена от перекрестка на несколько длин автомобилей, что дает транзиту преимущество в длину от одного до двух автомобилей для выезда с перекрестка по сравнению с полосой движения для смешанного потока (рисунок 5). Примечание с расширенным стоп-уширением:

- в этом случае поворот направо запрещен;
- этот тип полосы обхода очереди можно также использовать с выделенной полосой для маршрутного транспорта у края проезжей части;
- эффективность будет повышена, если полоса обхода очереди будет интегрирована с приоритетом транзитного сигнала.

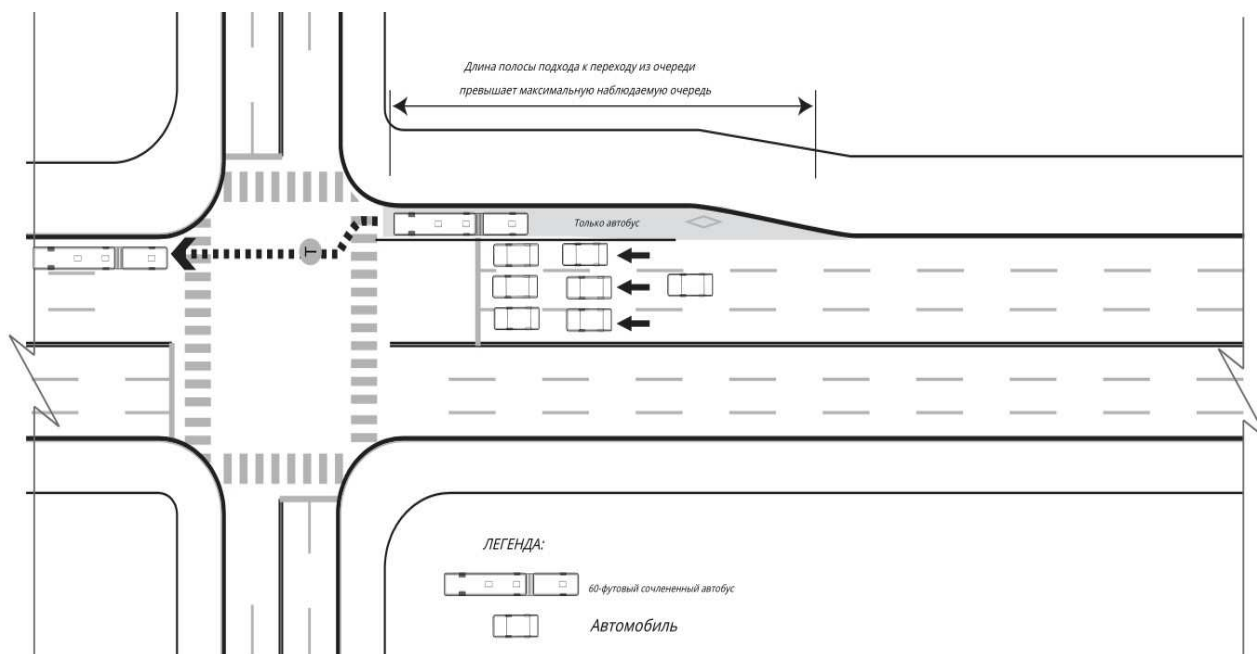


Рисунок 5. – Полоса обхода очереди с расширенными стоп-уширениями

Полосы обхода очереди могут быть спроектированы так, чтобы облегчить движение прямо через перекрестки или повороты (влево или вправо) (рисунок 6). Такое решение можно предложить на проспекте Победителей (рисунок 7).

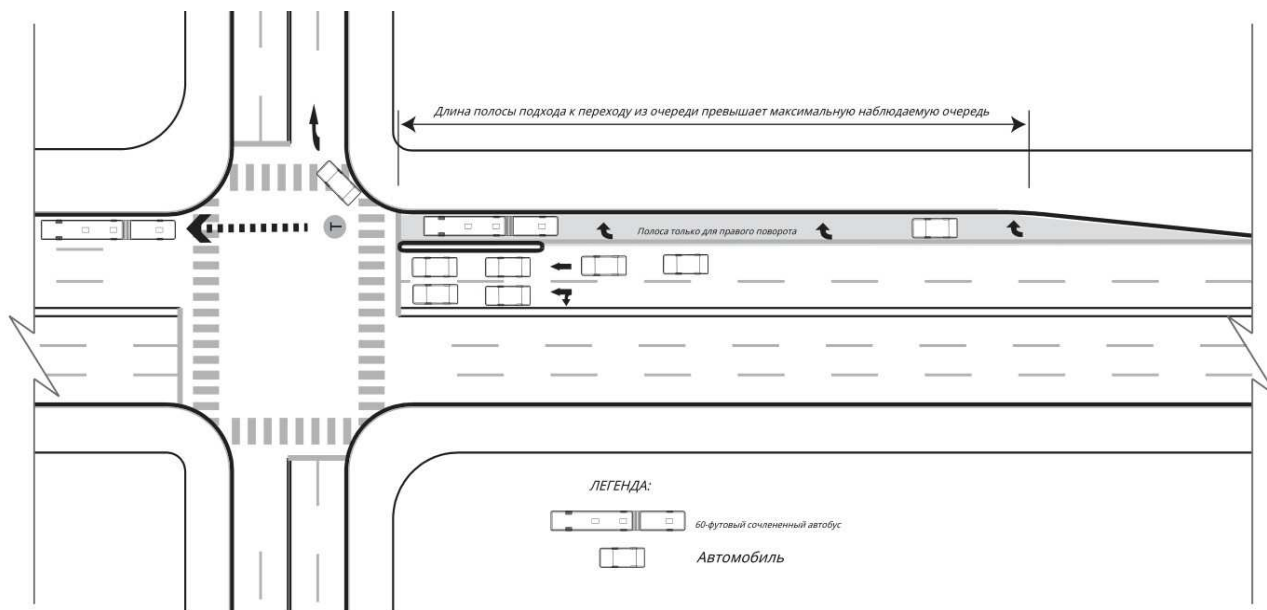


Рисунок 6. – Полоса движения только для правого поворота в качестве полосы для объезда очереди с освобождением от транзитных перевозок

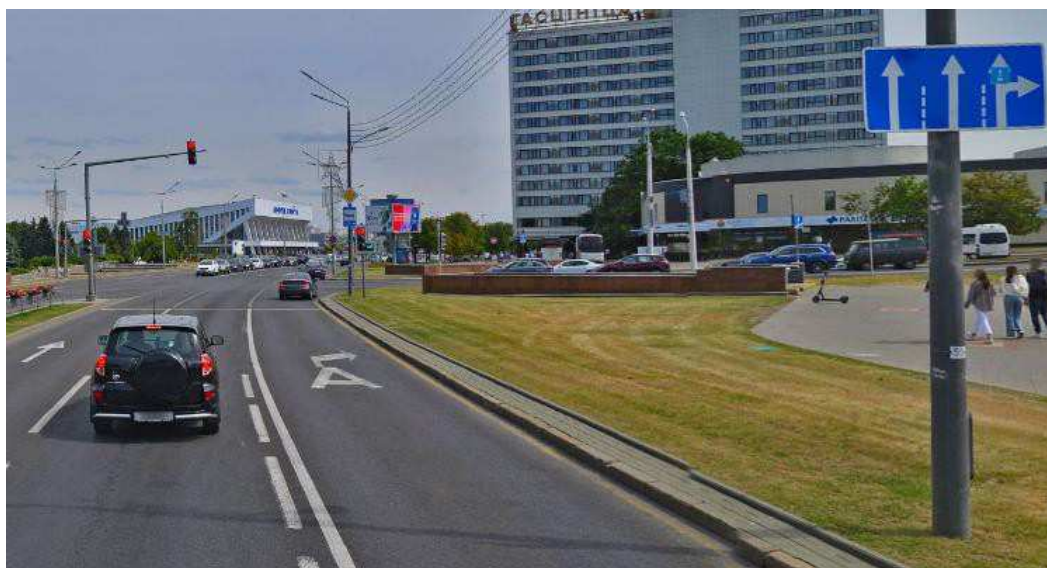


Рисунок 7. – Полоса движения только для правого поворота и прямо для маршрутного транспорта

Примечание для полосы движения только для правого поворота в качестве полосы для объезда очереди с освобождением от транзитных перевозок:

- только транзитным транспортным средствам (маршрутному транспорту) разрешено выезжать прямо с полосы правого поворота;
- эффективность повысится, если полоса обхода очереди будет интегрирована с приоритетом транзитного сигнала.

Полосы обхода очереди можно разместить рядом с бордюром либо на соседней полосе движения. Длина обходной полосы может варьироваться в зависимости от относительной длины очереди в период пик на соседних полосах (рисунки 8 и 9). В некоторых случаях HOV могут использовать полосы обхода очереди.

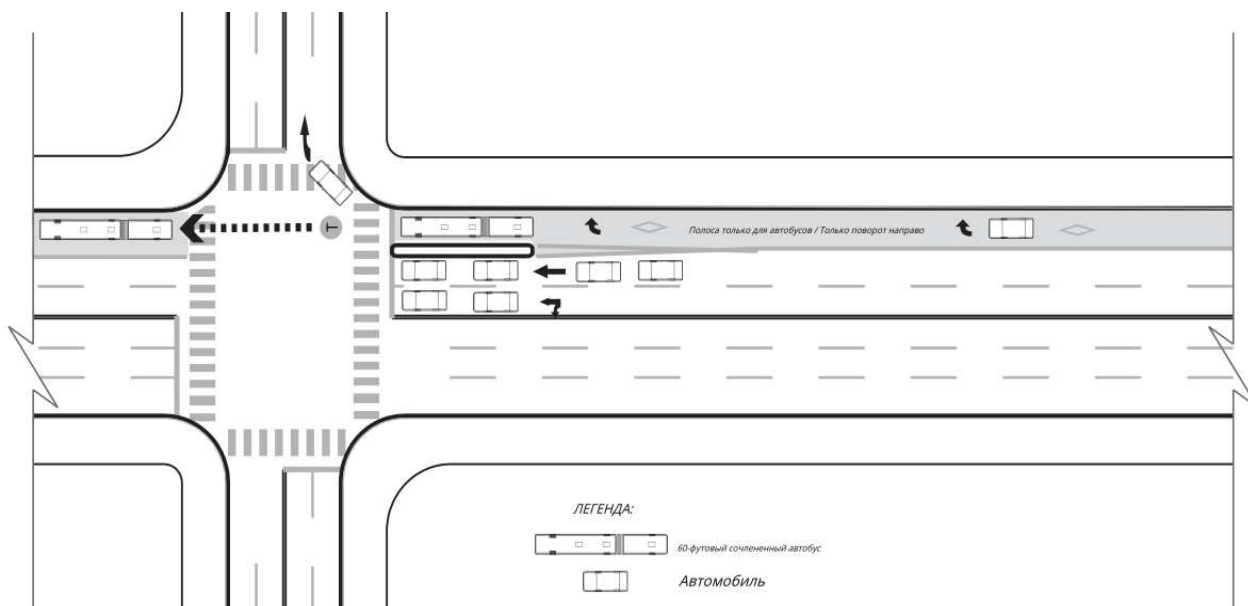


Рисунок 8. – Полоса у края проезжей части, предназначенная только для маршрутного транспорта, а также объезда очереди с освобождением от транзитного проезда

Примечание для полосы у края проезжей части, предназначенной для маршрутного транспорта, а также объезда очереди с освобождением от транзитного проезда:

- транспортным средствам, поворачивающим направо, разрешается выезжать на выделенную полосу, но только транзитные транспортные средства могут двигаться прямо.
- обычным транспортным средствам также может быть запрещен выезд на полосу, предназначенную только для маршрутного транспорта, а поворот направо запрещен полностью;
- полоса, предназначенная только для маршрутного транспорта, проходит через перекресток;
- эффективность будет повышена, если полоса объезда очереди будет интегрирована с приоритетом транзитного сигнала.

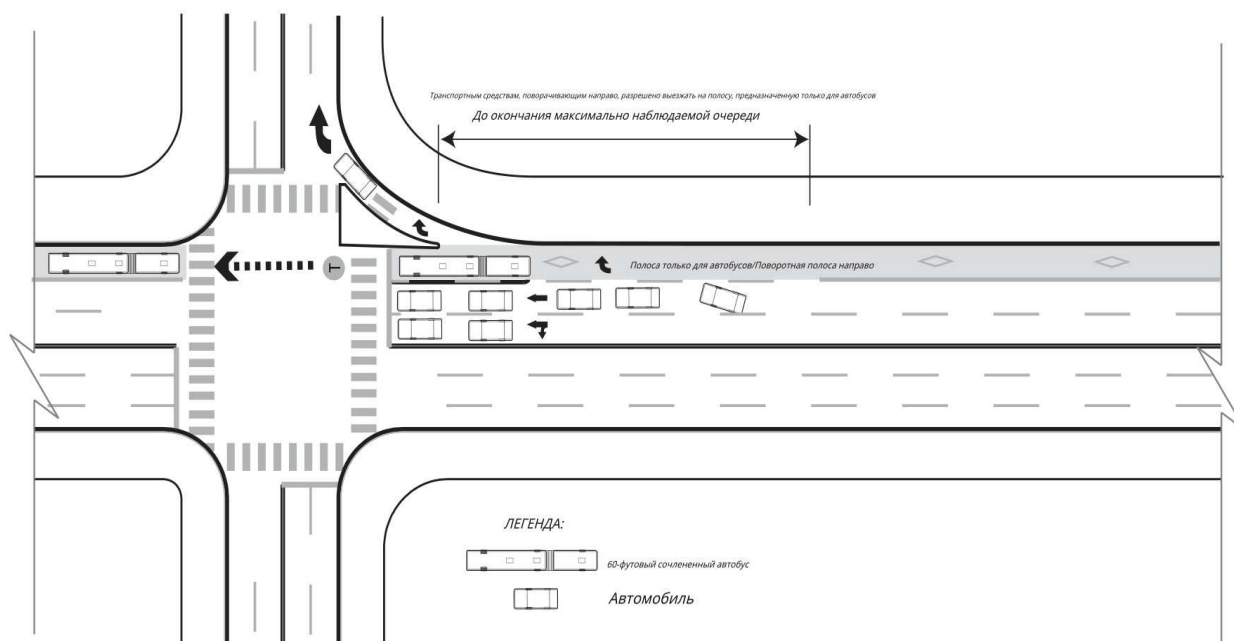


Рисунок 9. – Полоса у края проезжей части, предназначенная только для маршрутного транспорта, в качестве полосы для объезда очереди с направляющим островком

Примечание для полосы у края проезжей части в качестве полосы для объезда очереди с направляющим островком:

- транспортным средствам, поворачивающим направо, разрешается выезжать на полосу для маршрутного транспорта, но только транзитные транспортные средства могут двигаться прямо;
- транспортным средствам, поворачивающим направо, разрешено выезжать на полосу для маршрутного транспорта, до окончания максимальной наблюдаемой очереди;
- полоса для маршрутного транспорта, проходит через перекресток;
- эффективность будет повышена, если полоса объезда очереди будет интегрирована с приоритетом транзитного сигнала.

Существует еще типичная конфигурации объезда очереди (рисунок 10), которую можно использовать на проспекте Победителей (рисунок 11).

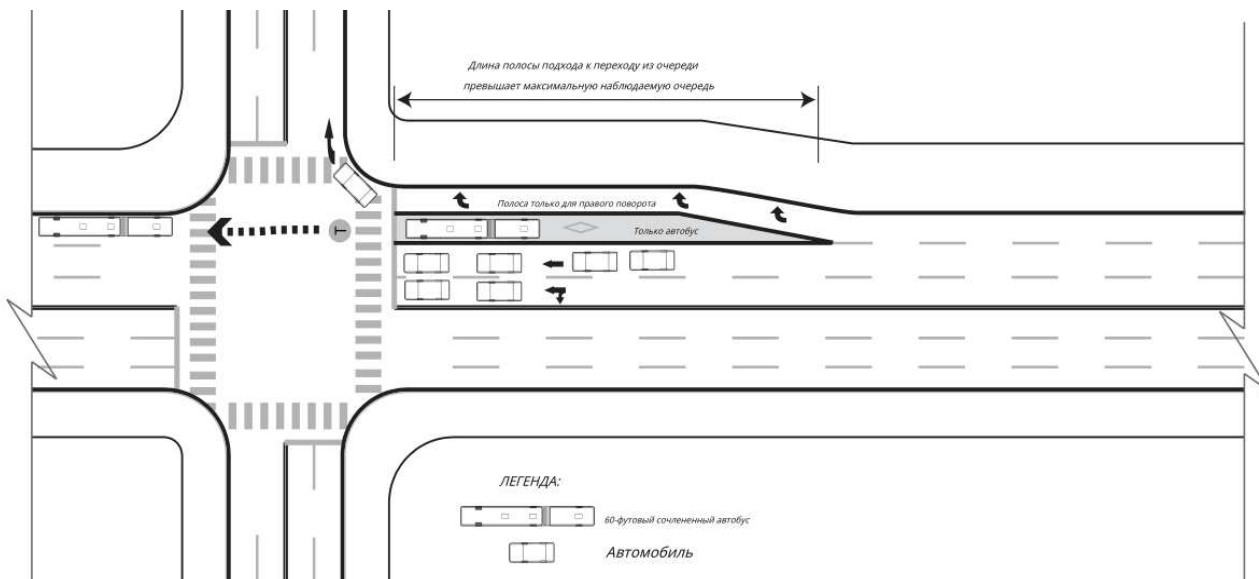


Рисунок 10. – Полоса объезда очереди, примыкающая к полосе только для правого поворота



Рисунок 11. – Выделенная полоса для маршрутного транспорта, примыкающая к полосе только для правого поворота

Примечание к полосе для объезда очереди, примыкающей к полосе только для правого поворота:

- длина заезда для объезда очереди должна превышать максимальную наблюдаемую длину очереди на соседних полосах смешанного движения;
- на полосу объезда очереди допускаются только маршрутный транспорт.
- эффективность будет повышена, если полоса объезда очереди будет интегрирована с приоритетом транзитного сигнала.

В таблице описаны различные конфигурации полос объезда очереди.

Таблица. – Варианты конфигурации полос объезда очереди

Варианты	Объезд очереди/ конфигурация	Описание	Проблемы эксплуатации/проектирования
1	Полоса для правого поворота с освобождением от транзитных перевозок	Транзитным транспортным средствам разрешается двигаться как по полосе для поворота направо, так и прямо через перекресток	Поток автобусов может быть нарушен транспортными средствами, поворачивающими направо, а также из-за стоянки погрузочно-разгрузочных машин у края проезжей части. Знаки необходимы, чтобы показать, что движение прямо запрещено для общего движения
2	Примыкание к полосе для правого поворота	Полоса только для транзита, перед перекрестком и прилегающая к полосе, предназначенной только для поворота направо. Маршрутный транспорт сможет обходить очереди на сквозных и правоповоротных полосах движения	Возможно, потребуется дополнительная полоса для поворота направо, что может увеличить затраты или потребовать расширения дороги. Знаки необходимы для предупреждения автомобилистов о том, что полоса предназначена только для маршрутного транспорта
3	С расширенным стоп-уширениями	У края проезжей части создается полоса, предназначенная только для транзита, которая заканчивается у основной стоп-линии. Соседние полосы смешанного движения не дотягивают до перекрестка на несколько длин автомобилей и более. Это позволяет транзитному транспортному средству выехать впереди смешанного транспорта	Позволяет маршрутному транспорту выезжать на перекресток раньше, чем смешанные транспортные потоки, что делает слияние более безопасным и эффективным. Маршрутный транспорт должен пересечь хотя бы одну полосу движения, что может вызвать проблемы с безопасностью дорожного движения. Транспортные средства, поворачивающие направо, могут случайно выехать на полосу объезда очереди, если указатели плохие или запутанные
4	С освобождением от транзита	Аналогично сценарию 1, за исключением того, что полоса у края проезжей части предназначена только для маршрутного транспорта	Поток маршрутного транспорта может быть нарушен транспортными средствами, поворачивающими направо, а также из-за стоянки погрузочно-разгрузочных машин у края проезжей части. Необходимо установить знаки, показывающие, что движение по полосе запрещено для маршрутного транспорта
5	Интегрирование с придорожной полосой движения только для маршрутного транспорта и направляющим островком	Аналогично сценарию 4, за исключением того, что для отделения маршрутного транспорта от проезжей части на повороте используется островок, который отделяет полосу транзитного движения	Транспортные средства, поворачивающие направо, лучше отделяются от движения маршрутного транспорта по прямой, что понятнее для водителей, чем сценарий 4. Кроме того, это создает островок безопасности для пешеходов. Движение маршрутного транспорта может быть нарушено из-за того, что они поворачивают направо и стоят у края проезжей части для погрузки/разгрузки. Знаки необходимы для того, чтобы показать, что движение по прямой запрещено в целях общего регулирования дорожного движения

Рабочая среда полосы объезда очереди могут быть спроектированы так, чтобы облегчить движение прямо через перекрестки или повороты (налево или направо). Полосы объезда очереди можно разместить рядом с бордюром или на соседней полосе. В некоторых случаях NOV могут использовать полосы объезда очереди. Длина полосы объезда очереди может варьироваться в зависимости от относительной длины очереди движения в пиковый период и объемов движения на соседних полосах.

Преимущества: экономия времени в пути, повышение конкурентоспособности транзита, улучшение имиджа и увеличение пропускной способности коридоров. Кроме того, экономия времени может быть достигнута, если полоса интегрирована с выделенной полосой для маршрутного транспорта и BRT. Капитальные

затраты относительно невелики по сравнению с крупномасштабными физическими мерами, такими как разделение уровней, позволяющими уменьшить задержку на перекрестке.

Недостатки: установка может привести к небольшому увеличению задержки трафика, уменьшению ширины проезжей части для полос смешанного движения, перемещению парковок и пешеходов или транспорта, повышенной опасности для автомобилистов и пешеходов, если они не привыкли к раннему выезду маршрутного транспорта на перекресток. Недостаточная ширина проезжей части может помешать установке полос для перехода на ключевые перегруженные перекрестки. Без других улучшений (например, BRT) полосы объезда очереди могут оказаться неэффективными для сокращения задержки маршрутного транспорта. Полосы для объезда с параллельным потоком обычно наименее эффективны с точки зрения сохранения изображения и времени в пути. Полосы требуют постоянного контроля. Если разрешены правые повороты вне очереди объездной полосы, это может помешать движению маршрутного транспорта.

Выводы. В результате проведенных исследований с учетом мировых тенденций развития транспортных систем разработаны предложения по организации дорожного движения, а также управлению транспортными потоками для обеспечения приоритетного движения маршрутных пассажирских транспортных средств в городах и мегаполисах. Эти мероприятия направлены на повышение эффективности и привлекательности маршрутного пассажирского транспорта некапиталоемкими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский, Д.В. Определение параметров функционирования системы городского маршрутного пассажирского транспорта // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2(75). – С. 4–13. DOI 10.53078/20778481_2022_2_4
2. Капский Д.В., Богданович С.В. Бионические подходы к развитию транспортных систем городов // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. – 2022. – № 3(70). – С. 113–119. DOI 10.52897/2411-4588-2022-3-113-119
3. Капский Д.В., Лю Ю., Скирковский С.В. Исследование расположения остановочных пунктов на магистральной сети городов // Проблемы международной транспортной политики: материалы междунар. конф. / Москва (27 марта 2022 г.). – М.: МАДИ, 2022. – С. 55–58.
4. Лю Ю., Капский Д.В. Анализ принципов расположения остановочных пунктов маршрутного пассажирского транспорта за рубежом и отечественного опыта // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. / Минск (24 мая – 10 июня 2022 г.). – Минск: БНТУ, 2022. – С. 45–52.
5. Лю Ю., Капский Д.В. Обустройство остановочных пунктов маршрутного пассажирского транспорта в Китае // 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. 163–170.
6. Капский Д.В., Мозалевский Д.В., Гамульский И.Г. Выбросы вредных веществ транспорта в симбиотическом городе и прогноз сокращения выбросов CO₂ в изменяемой транспортной системе // Проектирование автомобильных дорог: сб. докл. 80-й Междунар. науч.-метод. и науч.-исслед. конф. МАДИ / Москва (24–28 янв. 2022 г.). – М.: А-проджект, 2022. – С. 244–253.
7. Капский Д.В., Семченков С.С. Пример разработки и оптимизации графиков работы водителей маршрутного пассажирского транспорта в агломерациях // Перспективы развития транспортного комплекса: сб. ст. – Минск: Транстехника, 2022. – С. 206–219.
8. Капский Д.В., Семченков С.С. Анализ современных методов организации работы водителей маршрутного пассажирского транспорта в агломерациях // Перспективы развития транспортного комплекса: сб. ст. – Минск: Транстехника, 2022. – С. 198–205.
9. Капский Д.В. Методология экономической, социальной и экологической эффективности транспортной системы. Проектирование автомобильных дорог: сб. докл. 80-й Междунар. науч.-метод. и науч.-исслед. конф. МАДИ / Москва (24–28 янв. 2022 г.). – М.: А-проджект, 2022. – С. 190–199.
10. Планирование устойчивой городской мобильности: учеб.-метод. пособие / А.О. Лобашов, С.С. Семченков, Е.Н. Кот и др. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2022. – 175 с.

REFERENCES

1. Kapskii, D.V. (2022). Opredelenie parametrov funktsionirovaniya sistemy gorodskogo marshrutnogo passazhirskogo transporta [Determination of Functioning Parameters for the System of Urban Route Passenger Transport]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta [The Belarusian-Russian university herald]*, 2(75), 4–13. DOI 10.53078/20778481_2022_2_4 (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Kapskii, D.V. & Bogdanovich, S.V. (2022). Bionicheskie podkhody k razvitiyu transportnykh sistem gorodov [Bionic Approaches to the development of urban transport systems]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya [Economics of the North-West: problems and prospects of development]*, 3(70), 113–119. DOI 10.52897/2411-4588-2022-3-113-119 (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Kapskii, D.V., Lyu, Yu. & Skirkovskii, S.V. (2022). Issledovanie raspolozheniya ostanovochnykh punktov na magistral'noi seti gorodov. *Problemy mezhdunarodnoi transportnoi politiki: materialy mezhdunar. konf.*, Moskva, 27 marta 2022 g. (55–58). Moscow: MADI. (In Russ.).
4. Lyu, Yu. & Kapskii, D.V. (2022). Analiz printsipov raspolozheniya ostanovochnykh punktov marshrutnogo passazhirskogo transporta za rubezhom i otechestvennogo opyta. *Avtotraktorostroenie i avtomobil'nyi transport: sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. V 2 t. Minsk, 24 maya – 10 iyunya 2022 g.* (45–52). Minsk: BNTU. (In Russ.).

5. Lyu, Yu. & Kapskii, D.V. (2022). Obustroistvo ostanovochnykh punktov marshrutnogo passazhirskogo transporta v Kita. *Infokommunikatsionnye i intellektual'nye tekhnologii na transporte*: sb. st. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Lipetsk, 20–21 apr. 2022 g. (163–170). Lipetsk: Lipets. gos. tekhn. un-t. (In Russ.).
6. Kapskii, D.V., Mozalevskii, D.V. & Gamul'skii, I.G. (2022). Vybrosty vrednykh veshchestv transporta v simbioticheskom gorode i prognoz sokrashcheniya vybrosov CO2 v izmenyaemoi transportnoi sisteme. *Proektirovanie avtomobil'nykh dorog*: sb. dokl. 80-i Mezhdunar. nauch.-metod. i nauch.-issled. konf. MADI. Moskva, 24–28 yanv. 2022 g. (244–253). Moscow: A-prodzhekt. (In Russ.).
7. Kapskii, D.V. & Semchenkov, S.S. (2022). Primer razrabotki i optimizatsii grafikov raboty voditelei marshrutnogo passazhirskogo transporta v aglomeratsiyakh. *Perspektivy razvitiya transportnogo kompleksa*: sb. st. (206–219). Minsk: Transtekhnika. (In Russ.).
8. Kapskii, D.V. & Semchenkov, S.S. (2022). Analiz sovremennykh metodov organizatsii raboty voditelei marshrutnogo passazhirskogo transporta v aglomeratsiyakh. *Perspektivy razvitiya transportnogo kompleksa*: sb. st. (198–205). Minsk: Transtekhnika. (In Russ.).
9. Kapskii, D.V. (2022). Metodologiya ekonomicheskoi, sotsial'noi i ekologicheskoi effektivnosti transportnoi sistemy. *Proektirovanie avtomobil'nykh dorog*: sb. dokl. 80-i Mezhdunar. nauch.-metod. i nauch.-issled. konf. MADI. Moskva, 24–28 yanv. 2022 g. (190–199). Moscow: A-prodzhekt. (In Russ.).
10. Lobashov, A.O., Semchenkov, S.S., Kot, E.N., Kapskii, D.V. & Bogdanovich, S.V. (2022). *Planirovanie ustoichivoi gorodskoi mobil'nosti*: ucheb.-metod. posobie. Minsk: Belarus. nats. tekhn. un-t. (In Russ.).

Поступила 18.11.2024

MEASURES TO ENSURE PRIORITY MOVEMENT OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT

LIU YUWEI, S. SEMCHENKOV
(Belarusian National Technical University, Minsk)

D. KAPSKI
(Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk)

The article presents practical organizational proposals formulated on the basis of research to optimize traffic and ensure priority of route passenger transport, allowing to reduce the waiting time of passengers and improve the efficiency of the transport system.

Keywords: city, transport system, priority, route passenger transport, measures.

УДК 656.13

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-70-76

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА МИНСКА

*М.Р. ЛЕБЕДЕВА, д-р техн. наук, проф. А.О. ЛОБАШОВ, канд. техн. наук С.С. СЕМЧЕНКОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Представлены методы прогнозирования аварийности на дорогах с целью повышения безопасности дорожного движения. Апробирование методов и прогноз аварийности выполнен на примере г. Минска. Оценка количества погибших и раненых проведена с использованием двух моделей и двух методов: модели ARIMA, модели SARIMA, метода линейной регрессии и метода «случайного леса». Каждый метод и каждая модель оценивается по точности и достоверности прогнозов. Анализ показал: методы линейной регрессии и «случайного леса» наиболее точно предсказывают количество погибших, но для прогнозирования количества раненых требуется дальнейшая доработка моделей; модели ARIMA и SARIMA дают завышенные прогнозы для обеих категорий. В статье также рассматривается возможность использования экзогенных факторов для повышения точности прогноза. Результаты могут быть полезны для разработки эффективных мер по снижению аварийности и улучшению ситуации на дорогах.

Ключевые слова: дорожно-транспортные происшествия, машинное обучение, прогнозирование, линейная регрессия, модель ARIMA, модель SARIMA, метод «случайного леса», безопасность дорожного движения.

Введение. Анализ дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и прогнозирование их последствий являются важнейшими задачами обеспечения безопасности дорожного движения. Возросший в последние годы поток транспортных средств и увеличившаяся интенсивность дорожного движения в крупных и крупнейших городах Беларуси обострили проблему аварийности, что делает задачу прогнозирования количества пострадавших и погибших в ДТП актуальной. Понимание динамики ДТП позволяет выявить не только основные причины аварий, но и зависимости, что поможет разработать более эффективные меры по предотвращению ДТП на дорогах.

В данной статье рассматриваются современные методы анализа данных, которые могут быть использованы для прогнозирования количества погибших и раненых в ДТП, среди них: модели анализа временных рядов, методы машинного обучения и другие подходы, позволяющие учесть временные тренды, сезонные колебания и нелинейные связи между переменными. На основе данных о ДТП в Минске за последние года проводится сравнительный анализ этих методов с целью выявления наиболее точного и эффективного инструмента для прогнозирования.

Основная цель работы – предложить и протестировать различные подходы к прогнозированию последствий ДТП, а также оценить их применимость для анализа аварийности в условиях крупных и крупнейших городов Беларуси. Кроме того, важно отметить, что анализ данных о ДТП может помочь в выявлении факторов, способствующих ДТП, таких как погодные условия, состояние дорожного покрытия, интенсивность движения и поведение водителей. В этом контексте применение кластерного анализа позволит выделить группы аварий с схожими характеристиками для разработки целевых стратегий предотвращения ДТП.

В настоящее время транспортные системы быстро развиваются, и применение современных методов прогнозирования становится необходимым для формирования безопасной среды для участников дорожного движения. В Беларуси применение методов машинного обучения – не редкость. Они активно внедряются в IT-компаниях, банках, финансовых организациях, университетах и пр. Главной отличительной особенностью машинного обучения является адаптивность, что необходимо в области дорожного движения.

Таким образом, целью статьи является систематизация существующих методов прогнозирования аварийности и применение их на практике. В виде исходных данных взята статистика количества погибших и раненых в городе Минске, сделан прогноз на 2023 год и проведено сравнение прогноза с фактическими значениями количества погибших и раненых. Результаты исследования могут оказать влияние на разработку мероприятий по повышению безопасности дорожного движения и принять решение о внедрении машинного обучения в существующие практики по анализу статистики ДТП.

Основная часть. Существуют разнообразные техники анализа данных, применение которых направлено на выявление «полезной» информации из имеющейся базы данных. В работе со статистикой ДТП в первую очередь следует выделить классический статистический подход – описательную статистику. Данный метод используют на начальных этапах исследования, он позволяет выявить общие закономерности и тренды. Вторым по популярности методом является регрессионный анализ. Его применяют для моделирования зависимостей между переменными, что позволяет отследить, как изменение одной переменной влияет на изменения второй. И для наиболее сложных анализов применяются методы машинного обучения.

Возвращаясь к методам анализа ДТП, отметим три классических метода: количественный, качественный и топографический. Выбор метода определяется видом поставленной задачи. Количественный метод позволяет оценить частоту ДТП, тяжесть последствий ДТП, сравнить статистику по различным временным периодам и пр. Это говорит о том, что метод фокусируется на сборе и анализе числовых данных. Качественный метод позволяет определить причины и факторы, способствовавшие возникновению ДТП. Данный метод учитывает поведение водителей, состояние дороги и причины ДТП. Топографический метод подразумевает использование картографических данных, которые позволяют выявить опасные участки дороги и проанализировать влияние дорожных условий (повороты, пересечения, изменение количества полос) на создание аварийной ситуации.

С развитием информационных технологий и внедрением машинного обучения началось применение новых инструментов анализа – это моделирование аварийных ситуаций, использование искусственного интеллекта для прогнозирования и анализа факторов риска, а также применение программ, способных анализировать большое количество данных.

Таким образом, методы анализа данных можно представить в виде схемы (рисунок 1).

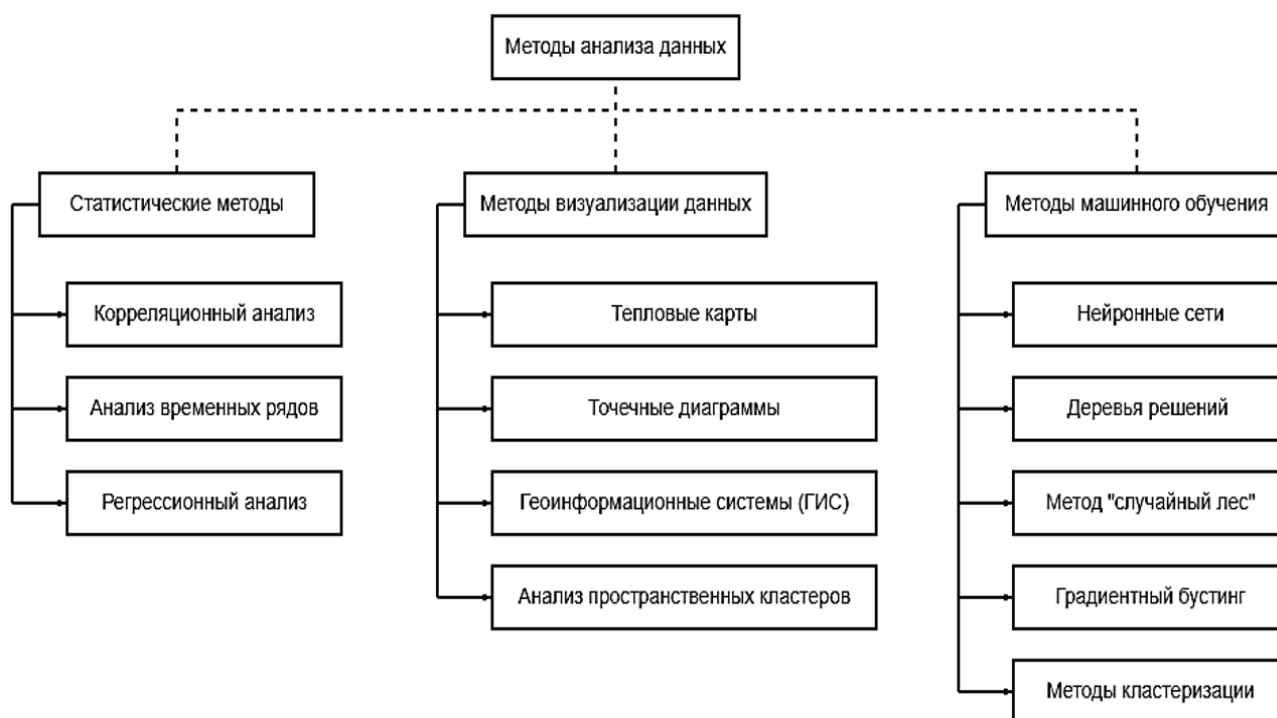


Рисунок 1. – Методы анализа данных

При выборе метода прогнозирования необходимо учесть несколько факторов: какова цель анализа, доступные ресурсы, какими характеристиками обладают имеющиеся данные и необходимая точность прогнозирования.

Прогнозирование – обоснованное предположение, которое базируется на анализе данных предыдущих происшествий, которые могут включать в себя множество характеристик, таких как: время суток, дорожные условия, погодные условия, характеристики транспортного средства и пр. Его необходимость обусловлена тем, что будущее состояние объекта существенно влияет на принимаемые в настоящем решения. Будущая ситуация неизбежно связана с неопределенностью, которую невозможно полностью устранить. В условиях неопределенности основная функция лица, принимающего решения, заключается в выборе наилучшего варианта из предложенных. Прогнозирование является одним из основных инструментов поиска такого решения на основе эмпирического и научно-обоснованного анализа проблемы.

Для выбора подходящего метода необходимо изучить данные, обратить внимание на сезонные колебания, корреляции между переменными и другие особенности, которые могут помочь определить подходящий метод прогнозирования. Также требуется верно поставить цель анализа и представить, какой конечный результат необходим. Требования, выставляемые к анализу, напрямую будут влиять на выбор метода.

Для удобства определения метода был создан алгоритм, представленный на рисунке 2.

Заключительным шагом будет оценка полученной модели и результатов анализа. Оценка достоверности модели – это процесс проверки, насколько хорошо модель отражает фактические данные и насколько эффективно она может решать задачи, для которых была разработана. Это важный этап в анализе дан-

ных и машинном обучении, т.к. он позволяет удостовериться, что полученная модель будет давать точные и надежные результаты применительно к новым данным.

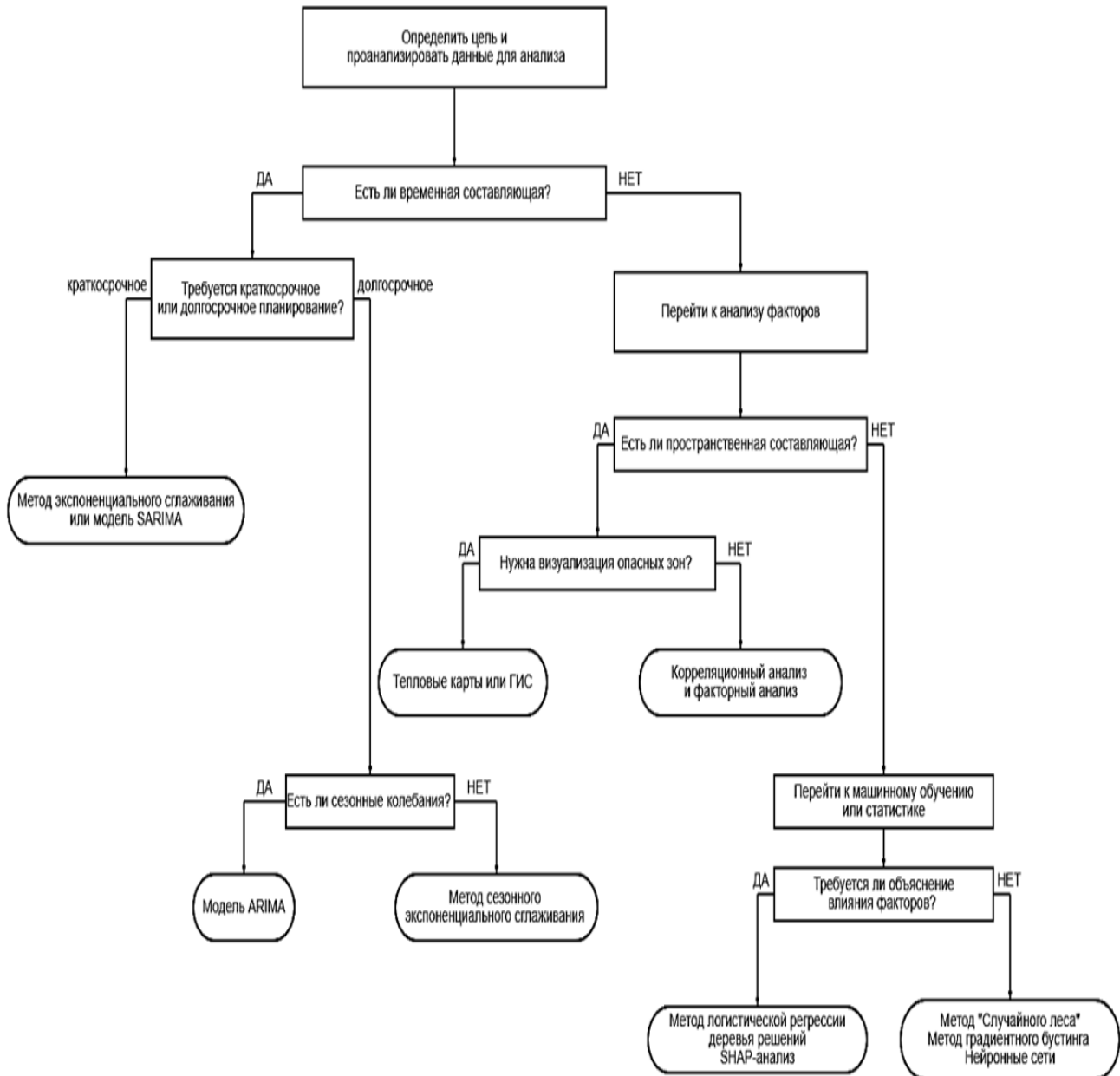


Рисунок 2. – Алгоритм выбора метода анализа и прогнозирования

Далее с использованием программного комплекса Python был проведен анализ методами линейной регрессии и «случайного леса», с помощью моделей ARIMA и SARIMA.

Линейная регрессия относится к статистическому методу, который применим для моделирования связи между зависимой переменной и одной или несколькими независимыми переменными, что предполагает линейную связь [1–5]. Данный метод является самым простым и понятным, его легко применить и интерпретировать результаты. Целью линейной регрессии является подбор к анализируемым данным линейной функции, которая лучше всего отобразит взаимосвязь переменных. Код, используемый для прогноза методом линейной регрессии, представлен на рисунке 3.

Согласно данным, полученным методом линейной регрессии, прогноз количества погибших в ДТП на 2023 г. равен 26, прогноз количества раненых – 658,72. Для оценки достоверности прогноза можно использовать различные метрики качества модели. В случае линейной регрессии одной из таких метрик является коэффициент детерминации R^2 , который показывает, насколько хорошо модель соответствует данным, и принимает значения от 0 до 1, где 1 – идеальное соответствие, 0 – отсутствие соответствия. Коэффициент детерминации для прогноза количества погибших составил 0,6, а для прогноза количества раненых – 0,29.


```

from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import mean_absolute_error, r2_score

# Подготовка данных (например, X - признаки, y - целевая переменная)
# X_train, y_train, X_test, y_test - это обучающие и тестовые данные

# Инициализация модели
model = LinearRegression()

# Обучение модели
model.fit(X_train, y_train)

# Прогнозирование
y_pred = model.predict(X_test)

# Оценка точности
mae = mean_absolute_error(y_test, y_pred)
r2 = r2_score(y_test, y_pred)

print(f"Средняя абсолютная ошибка: {mae}")
print(f"Коэффициент детерминации: {r2}")

```

Рисунок 3. – Метод линейной регрессии в Python

Модель ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) – статистическая модель, используемая для анализа и прогнозирования временных рядов. Другими словами, ARIMA помогает спрогнозировать будущее значение на основе ранее наблюдавшихся данных [6; 7].

Прогноз количества погибших и количества раненых моделью ARIMA составил 36 и 701,59, соответственно. Для оценки достоверности модели используется метод средней абсолютной ошибки, которая составила 12 для количества погибших и 109,59 для количества раненых.

Модель SARIMA – это расширенная модель ARIMA, но с сезонной корректировкой. Данная модель учитывает сезонные закономерности и периодические колебания [8; 9]. Прогноз количества погибших и раненых моделью SARIMA совпал с прогнозом моделью ARIMA, Это значит, что при использовании модели в анализ не был включен сезонный фактор. В таких случаях данные становятся равны. Для изменения результатов при прогнозировании моделью SARIMA необходимо включить погодные условия или сезон года.

Следующий метод – метод «случайного леса» – один из алгоритмов машинного обучения, используемый в прогнозировании данных. Он создает множество деревьев решений [10]. Каждое отдельно взятое дерево в модели работает с использованием случайно выбранных подмножеств данных, что исключает переобучение и делает модель стабильной и устойчивой. Таким образом, каждое дерево в процессе прогноза предлагает собственное решение, а в итоге выбирается тот результат прогноза, за который проголосовало большинство.

Метод дал результат 25,35 для количества погибших и 716,08 для количества раненых. Коэффициент детерминации для погибших составил 0,772 и 0,17 для раненых. Результат коэффициента детерминации для раненых близок к 1, что говорит о том, что прогноз близок к фактическому значению количества погибших, а его уровень можно считать высоким. Результат коэффициента детерминации для прогноза количества раненых низок, значит, прогноз далек от фактического значения.

В таблице 1 приведены результаты прогнозирования и значения коэффициента детерминации или средней абсолютной ошибки в зависимости от метода или модели.

Таблица 1. – Значения прогноза

Методы и модели	Показатель	Количество погибших	Количество раненых
Линейная регрессия	Значения прогноза	26,00	658,72
	Коэффициент детерминации	0,60	0,29
Модель ARIMA	Значения прогноза	36,00	701,59
	Средняя абсолютная ошибка	12,00	109,59
Модель SARIMA	Значения прогноза	36,00	701,59
	Средняя абсолютная ошибка	12,00	109,59
Метод «случайного леса»	Значения прогноза	25,35	716,08
	Коэффициент детерминации	0,77	0,17
Фактические значения		24	592

На рисунках 4 и 5 представлено визуальное сравнение результатов прогнозирования с фактическими значениями погибших и раненых за 2023 г, соответственно.

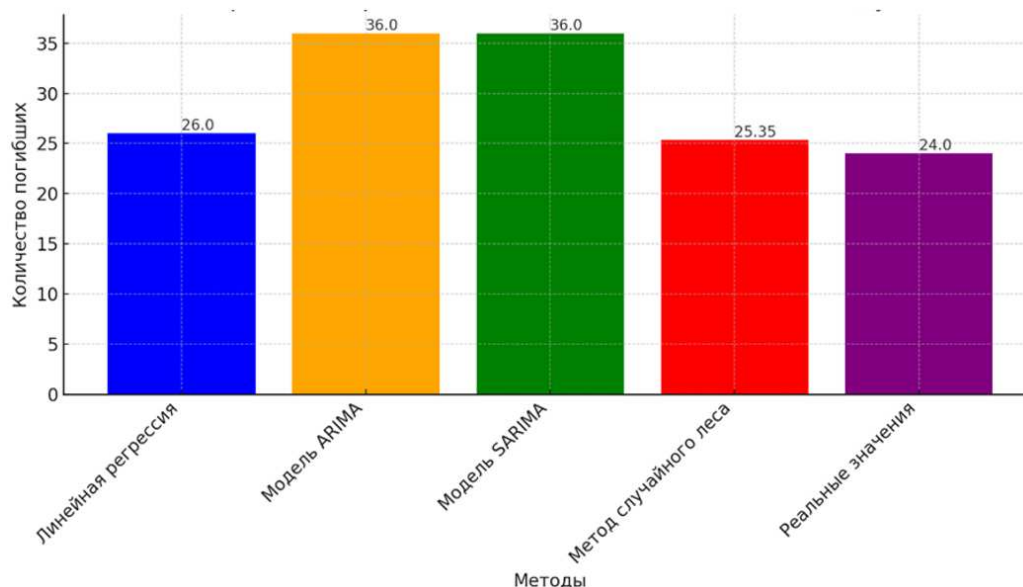


Рисунок 4. – Сравнение результатов прогнозирования с фактическими значениями погибших в ДТП

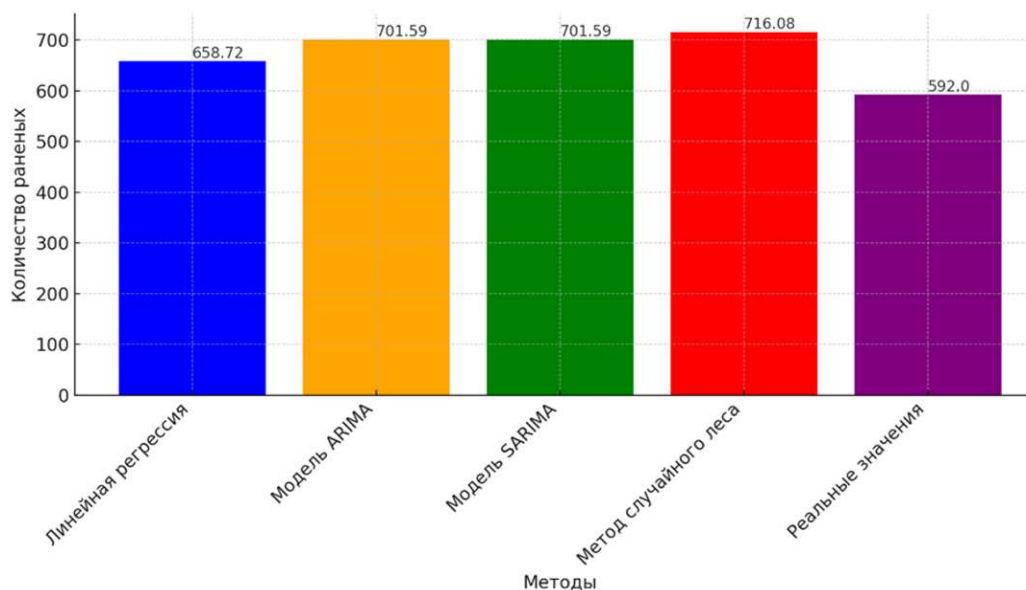


Рисунок 5. – Сравнение результатов прогнозирования с фактическими значениями раненых в ДТП

Заключение. Линейная регрессия прогнозировала 26 погибших – близко к фактическому значению 24. Коэффициент детерминации 0,6, что указывает на высокую достоверность модели для прогнозирования количества погибших.

Модели ARIMA и SARIMA дали одинаковый прогноз – 36 погибших. Значение существенно выше фактического, средняя абсолютная ошибка равна 12. Это означает, что среднее абсолютное отклонение между прогнозами модели и фактическим количеством погибших на 2023 г. составляет около 12 человек, что является высоким отклонением.

Метод «случайного леса» прогнозировал 25,35 погибших, что близко к фактическому значению. Коэффициент детерминации также достаточно высок, что свидетельствует о хорошем качестве модели.

Линейная регрессия прогнозировала 658,72 раненых, что выше фактического значение – модель могла бы быть точнее.

ARIMA и SARIMA – обе модели дали одинаковый прогноз в 701,59 раненых. Это значительно выше фактического значения 592, что указывает на возможные ошибки в модели или несоответствия в данных.

Метод «случайного леса» прогнозировал 716,08 раненых, что выше фактического значения. Коэффициент детерминации для этой модели был отрицательным, что свидетельствует о плохом качестве модели для прогнозирования количества раненых.

Таким образом, для прогнозирования количества погибших можно использовать методы линейной регрессии и «случайного леса». Оба метода оказались наиболее точными для прогнозирования количества погибших и дали прогнозы, близкие к фактическим значениям.

Для прогнозирования количества погибших метод «случайного леса» показал наихудший результат среди всех методов и моделей, что говорит о его неспособности точно прогнозировать этот показатель.

Модели ARIMA и SARIMA для обоих показателей дали одинаковые прогнозы, оказавшиеся завышенными по сравнению с фактическими значениями. Это указывает на возможные проблемы с этими моделями в контексте данных.

Исходя из вышесказанного, для прогнозирования количества раненых стоит рассмотреть улучшение моделей или использование других методов, т.к. текущие модели дают значительные отклонения от фактических значений. Для повышения точности прогнозов стоит рассмотреть комбинирование моделей временных рядов с методами машинного обучения. Такой подход поможет учесть как временные зависимости, так и нелинейные взаимодействия между переменными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Amin M., Sadia S. Traffic Accident Prediction Using a Machine-Learning-Enabled Data Analysis // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. – 2021. – Vol. 12, no. 1. – P. 104–111.
2. Assessing Driver Fatigue During Urban Traffic Congestion Using ECG Method / N.Gyulyev, A. Galkin, T. Schlosser et al. // *Dynamics in Logistics*. – 2022. – May. – P. 449–461. DOI:10.1007/978-3-031-05359-7_36
3. The driver's visual perception research to analyze pedestrian safety at twilight / B. González-Hernández, D.S. Usami, O. Prasolenko et al. // *Transportation Research Procedia*. – 2020. – Vol. 45. – P. 827–834. DOI: 10.1016/J.TRPRO.2020.02.087
4. Chowdhury M.S., Khondoker M.R. Road Car Accident Prediction Using a Machine-Learning-Enabled Data Analysis // *Journal of Transportation Technologies*. – 2022. – Vol. 12. – P. 221–235.
5. Choudhary D., Gupta S. Traffic Accident Forecasting using ARIMA and SARIMA Models. *International Journal of Engineering and Technology*. – 2023. – Vol. 12, no. 4. – P. 505–511.
6. Jha A.K., Prasad P. Comparison of Time-Series Methods for Accident Forecasting // *Journal of Transportation Safety & Security*. – 2021. – Vol. 13, no. 5. – P. 682–696.
7. Shafique U., Farooq U. Predicting Traffic Accidents Using Statistical and Machine Learning Methods // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. – 2022. – Vol. 10, no. 2. – P. 132–141.
8. Almeida A., Silva P., Rodrigues P. Seasonal ARIMA Model for Traffic Accident Forecasting // *Journal of Transportation Engineering*. – 2022. – Vol. 148, no. 3. – P. 04022012.
9. Sangare S., Sene M. Predicting Road Traffic Accidents Using Analytical Measures and Hybrid Machine Learning // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. – 2021. – Vol. 12, no. 5. – P. 123–130.
10. Almeida A., Silva P., Rodrigues P. Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average (SARIMA) Model for Traffic Flow Forecasting // *Journal of Transportation Engineering*. – 2021. – Vol. 147, no. 10. – P. 04021047.

REFERENCES

1. Amin, M. & Sadia, S. (2021). Traffic Accident Prediction Using a Machine-Learning-Enabled Data Analysis. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(1), 104–111.
2. Gyulyev, N., Galkin, A., Schlosser, T., Capayova, S. & Lobashov, O. (2022). Assessing Driver Fatigue During Urban Traffic Congestion Using ECG Method. *Dynamics in Logistics*, (May), 449–461. DOI:10.1007/978-3-031-05359-7_36
3. González-Hernández, B., Usami, D.S., Prasolenko, O., Burko, D., Galkin, A., Lobashov, O. & Persia, L. (2020). The driver's visual perception research to analyze pedestrian safety at twilight. *Transportation Research Procedia*, (45), 827–834. DOI: 10.1016/J.TRPRO.2020.02.087
4. Chowdhury, M.S. & Khondoker, M.R. (2022). Road Car Accident Prediction Using a Machine-Learning-Enabled Data Analysis. *Journal of Transportation Technologies*, (12), 221–235.
5. Choudhary, D. & Gupta, S. (2023). Traffic Accident Forecasting using ARIMA and SARIMA Models. *International Journal of Engineering and Technology*, 12(4), 505–511.
6. Jha, A.K. & Prasad, P. (2021). Comparison of Time-Series Methods for Accident Forecasting. *Journal of Transportation Safety & Security*, 13(5), 682–696.
7. Shafique, U. & Farooq, U. (2022). Predicting Traffic Accidents Using Statistical and Machine Learning Methods. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 10(2), 132–141.
8. Almeida, A., Silva, P. & Rodrigues, P. (2022). Seasonal ARIMA Model for Traffic Accident Forecasting. *Journal of Transportation Engineering*, 148(3), 04022012.
9. Sangare, S. & Sene, M. (2021). Predicting Road Traffic Accidents Using Analytical Measures and Hybrid Machine Learning. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(5), 123–130.

10. Almeida, A., Silva, P. & Rodrigues, P. (2021). Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average (SARIMA) Model for Traffic Flow Forecasting. *Journal of Transportation Engineering*, 147(10), 04021047.

Поступила 18.11.2025

**METHODS OF DATA ANALYSIS AND ACCIDENT RATE PREDICTION
ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF MINSK**

M. LEBEDEVA, A. LOBASHOV, S. SEMCHENKOV
(*Belarusian National Technical University, Minsk*)

The article discusses methods for predicting accidents on the roads in order to improve road safety. The methods were tested and the accident rate forecast was carried out using the example of Minsk, the estimate of the number of dead and injured was carried out using two models and two methods: the ARIMA model, the SARIMA model, the linear regression metric and the “Random Forest” method. Each method and each model is evaluated according to the accuracy and reliability of the forecasts. The analysis showed that linear regression and “Random Forest” methods most accurately predict the number of deaths, while the ARIMA and SARIMA models provide overestimated forecasts for both categories, and further refinement of the models is required to predict the number of injured. The article also discusses the possibility of using exogenous factors to improve the accuracy of the forecast. The results can be useful for developing effective measures to reduce accidents and improve the situation on the roads.

Keywords: *traffic accidents, machine learning, forecasting, linear regression, ARIMA model, SARIMA model, “Random forest” method, road safety.*

UDC 656.13

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-77-85

**EVALUATION OF ANALYSES OF THE INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS
ON THE ACCIDENT RATE PEDESTRIAN ACCIDENTS AT PEDESTRIAN
CROSSINGS THROUGH THE USE OF STATISTICAL TOOLS**

*PhD in Engineering D. KHODOSKIN, V. DAVHULEVICH, I. AFANASENKA
(Belarusian State University of Transport, Gomel)*

Road traffic accidents (RTAs) with victims account for only about 5% (!) of the total number of accidents, but, especially at pedestrian crossings, are characterised by high severity and correspondingly high values of accident losses¹ [1; 2]. Thus, it is necessary to constantly assess the influence of the most significant factors and characteristics, such as traffic and pedestrian load, geometric parameters of the pedestrian crossing itself and others, most significantly affecting the accident rate, based on which to develop and implement the most effective measures. It is for this purpose that the article describes the mechanism for identifying such factors and characteristics, determined through a set of features provided by the modern version of the Statistica package.

Keywords: accident rate with pedestrians, pedestrian crossing, share of reduction in the number of accidents, cluster analysis.

Introduction. The main purpose of the publication is to establish a list of independent variables significantly affecting the values of accident rates and to develop proposals on the basis of this to reduce the number and severity of accidents involving pedestrians, as well as to establish specific values of the shares of reduction in the number of accidents using the tools of the Statistica package.

Main part. According to the analysis of the accident rate, the largest number of accidents occur due to violations of traffic rules by drivers of vehicles. But it should be noted that there are other very significant causes of accidents: violations of traffic rules by pedestrians, poor road conditions, technical malfunction of vehicles, etc.

The most common causes of road accidents committed by drivers according to the analysis of accident rate for 2021 and 2022 in Gomel are still: mismatch of speed with actual traffic conditions; lack of the right to drive a vehicle; driving on the oncoming traffic lane; driving under the influence of intoxicants; wrong choice of distance; violation of rules of passing a pedestrian crossing; operation of technically defective vehicles; driving at a prohibited traffic signal.

The most common causes of road accidents committed by pedestrians according to the analysis of accident rate for 2021 and 2022 in Gomel are: crossing at an undetermined place, walking along the carriageway, crossing in front of a closely following vehicle, drunkenness.

The research conducted allowed us to identify a number of factors affecting the total number of road accidents and the number and severity of casualties. Both temporal (month, hour) and systematic (weather conditions, etc.) factors were analysed. Of these, the ones that really affect the outcome were highlighted.

Quantitative analysis of accident statistics for the period under study allowed us to draw the following general conclusions:

- there is a certain dependence of the accident rate in the distribution of accidents by seasons (months): the number of accidents is higher in spring and summer than in winter, namely in April-May (in 2021 – 1,773 accidents, in 2022 – 1,976 accidents);
- the highest daily accident peaks are in the morning and evening hours, which is associated with travelling to work and school. The morning rush hour has the highest number of crashes, with 1,569 crashes in 2021 and 1,882 crashes in 2022. In the morning hours, traffic participants are characterised by motivation (rush to work, study), low level of attention and, of course, high intensity of traffic;
- the largest number of accidents is due to: collisions in the traffic flow when approaching the intersection and collisions of vehicles directly at the intersection;
- the accident rate is significantly influenced by such factors as weather conditions, the presence of structures (obstructing visibility), the condition of the road surface, the degree of illumination of the pedestrian crossing at night.
- in 2021 and 2022, about 40 and 55 per cent of accidents respectively are road traffic accidents with material damage.

Table 1 shows data on accidents with victims at the studied pedestrian crossings (more than 100) in Gomel for 2021. For 2021 in Gomel, out of the whole range of pedestrian crossings studied, accidents involving pedestrians occurred at only 7 crossings (all with injuries).

¹ Ходоскин Д.П. Снижение аварийности на подходах к регулируемым перекресткам путем управления движением попутных транспортных средств: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. – Минск, 2023. – 163 л.

Table 1. – Information on accidents with victims at pedestrian crossings for 2021

Date & Time	Street	House	Number of injured persons
22.09.2021 in 20:55	Б. Tsarikova	57a	1
31.12.2021 in 07:50	Vladimirova	16b	1
11.07.2021 in 13:42	Lenina – Krasnoarmeyskaya	8	1
04.02.2021 in 17:53	Irininskaya	25	1
15.03.2021 in 16:00	Katunina	20	1
23.06.2021 in 21:30	Belogo – Kalennikov	46a	1
21.06.2021 in 22:05	Sovetskaya – Fedyuninskogo	248	1

Note: There were no road accidents with fatalities.

Directly, the data in Table 1 is presented on the city map (Figure 1).

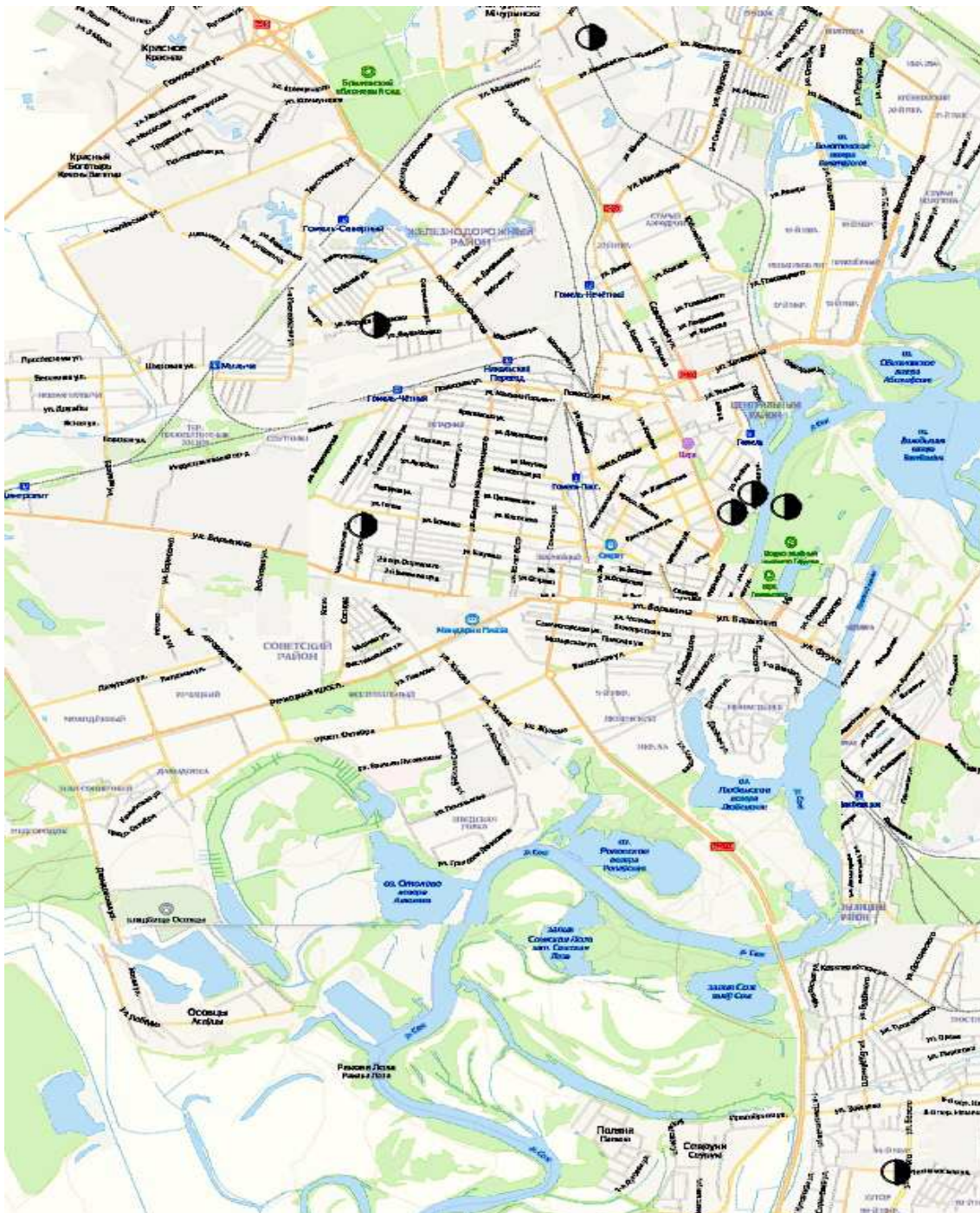


Figure 1. – Map of topographic analysis of accident rate in Gomel for 2021

Table 2 shows data on accidents with victims at the studied pedestrian crossings (more than 100) in Gomel for 2022.

Table 2. – Information on accidents with victims at pedestrian crossings for 2022

Date & Time	Street	House	Number of injured persons
24.12.2022 in 17:49	Sovetskaya – Hataevicha	63/4	1
24.08.2022 in 21:40	Sovetskaya	108	1
10.06.2022 in 23:00	Barykin	206	1
16.12.2022 in 21:20	Mazurova – Golovatsky	59/2	1
12.09.2022 in 07:50	Pine	10	1
22.10.2022 in 11:10	Zhukova	20	1
26.01.2022 in 07:10	Ilyicha – Leningradskaya	–	1

Note: There were no road accidents with fatalities.

Directly, the data in Table 2 is presented on the city map (Figure 2).



Figure 2. – Map of topographic analysis of accident rate in Gomel for 2022

In 2022, also in Gomel, accidents occurred at 7 pedestrian crossings (from the surveyed range). Also, all the road accidents are with injuries.

Topographical analysis of road accidents for the study period shows that for any settlement traditional areas of concentration of accidents on the street and road network are, first of all, intersections. Therefore, further improvement of traffic safety at intersections, especially in relation to unprotected road users, significantly reduces the overall level of road accidents, including their severity.

At the next stage, a universal integrated system for statistical analysis, data visualisation and development of user applications – *Statistica* – was used to identify specific parameters and characteristics that have a greater impact on the accident rate. *Statistica* is a modern package, in which all the latest computer and mathematical methods of statistical data analysis are implemented, that is the most dynamically developing statistical package and the world leader in the market of statistical software.

This system has the following generally recognised advantages: contains a full set of classical and advanced methods of data analysis; easy to master by a trained user; fully compatible with applications of the Windows operating system; is a tool for building applications in specific areas; *Statistica* data can be easily converted to various databases and spreadsheets; the package includes specially selected examples that allow you to systematically master the methods of analysis; supports most Internet formats; supports high quality graphics, allowing you to effectively visualise data and perform graphical analysis; contains a programming language that allows you to extend the system and run it from other Windows applications, etc.

In terms of its capabilities, the *Statistica* package allows you to: build various graphs: histograms, scatter plots, pie charts, build 3D and other graphs; calculate probability, mean and other basic parameters, plot various distributions using a probability calculator; build a Pareto chart; build a cause and effect diagram; build control charts; conduct cluster analysis; conduct non-linear estimation – regression analysis; conduct correlation analysis; calculate statistical charts; conduct time series analysis; organise the analysis using other statistical methods used in industry (and other areas) for data processing [3].

Application of various methods of working with statistical data in Statistica package.

The study identified 4 groups of initial data (totalling over 75 characteristics) describing each pedestrian crossing:

- 1) geometric parameters;
- 2) traffic and pedestrian load;
- 3) traffic conditions;
- 4) traffic light control parameters.

In general, the data included a wide range of parameters such as: crossing width, number and width of lanes, angle of the crossing to the edge of the carriageway, type of crossing, presence of an artificial bump, presence and width of a safety island, speed limit (on the approach to the crossing), traffic volume (by lane and by direction), pedestrian volume (by direction), presence of pedestrian signage, dimensions of side visibility triangles (from each side of the roadway), transparency of side visibility triangles (on each side of the crossing), height of the pedestrian crossing kerb, presence and length of pedestrian barriers installed on both sides, radius of carriageway edge roundings (on each side), distance from the end of the carriageway edge rounding to the edge of the crossing (on both sides), distance from the edge of the crossing to the edge of the nearest lighting support (on both sides), number of working traffic light control programmes, duration of the control cycle (of each of the envisaged programmes), duration of the pedestrian cycle in the traffic light control programme (pedestrian tact), duration of the green pedestrian signal, etc.

In this case, the dependent variable, directly showing the level of accidents at the pedestrian crossing, is the number of recorded accidents involving pedestrians, as well as the number of dead and injured pedestrians in accidents. The total sample size for the study period was more than 270 pedestrian crossings.

Given the heterogeneity and large amount of raw data, the following data mining techniques were applied to achieve the objective: neural network, support vector method, tree boosting, etc.

The factors shown in Table 3 were found to have a relevant impact on the number of road accidents.

Table 3. – The most relevant factors identified during the analysis

Factors	Best predictors for continuous dependent variable: total road traffic accidents (initial data). Method for selecting relevant variables: feature screening	
	F-value	p-value
13) width of the 4th lane, m	4,773918	0,029784
24) traffic intensity – N_{r1} , auto/hour	2,707303	0,014461
28) traffic intensity (present value) – N_{right} , items/hour	2,353892	0,041104
69) duration of the transition interval with the previous phase, sec	2,344816	0,055183
22) traffic intensity – N_{right} , auto/hour	2,281882	0,047039
30) traffic intensity (present value) – N_{r1} , items/hour	2,251799	0,038965

Note: in the column “Factors” the indicated number denotes the number of the parameter in order, which was adopted during the research.

Variables 22 and 28 are highly correlated with each other (correlation coefficient is 0,98), so to exclude the effect of multicollinearity we should leave variable 28 – traffic intensity – N_{right} , as it takes into account the traffic flow structure. Similarly with variables 24 and 30. Variable 30 – traffic intensity – N_{tr1} should be left.

Variable 13 is the width of the 4th lane. According to observations, this variable takes 2 values: “0” – when there is no fourth lane and “3,5 m” – when there is a lane. Therefore, this variable was recoded into a categorical variable: it actually shows the presence/absence of the fourth lane.

Variable 69 is the duration of the transition interval with the previous traffic light cycle phase (for traffic light cycle phase No. 3), sec. For traffic light objects where there is no traffic light cycle phase No. 3 is set to “0”. Therefore, the use of this variable for analysis is incorrect. It was excluded (others were similarly excluded). Thus, the remaining relevant variables are summarised in Table 4.

Table 4. – Final list of relevant factors

Factors	Best predictors for continuous dependent variable: total road traffic accidents (initial data). Method for selecting relevant variables: feature screening	
	F-value	p-value
13) width of the 4th lane, m	4,773918	0,029784
28) traffic intensity (present value) – N_{right} , items/hour	2,353892	0,041104
30) traffic intensity (present value) – N_{tr1} , items/hour	2,251799	0,038965

Variables 30 and 28 characterise traffic intensities along different directions. They are difficult to manage because they depend on many factors. Therefore, the whole set of pedestrian crossings under study was divided into clusters according to variables 13, 28 and 30. The characteristics of the clusters are summarised in Table 5 and Figure 3.

Table 5. – Selected clusters

Final classification – Clusters	13) width of the 4th lane, m	28) traffic intensity (present value) – N_{right} , items/hour	30) traffic intensity (present value) – N_{tr1} , items/hour
1	0	0–558	0–500
2	3,5	90–121,6	599,6–1600
3	0	624–1240	1045,2–1644
4	0	0–415,8	507,2–1468

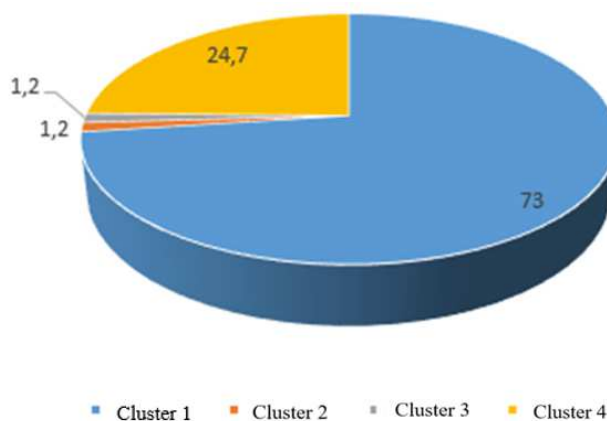


Figure 3. – Distribution of clusters

Based on the subject of the study and the obtained results of cluster distribution, cluster 4 is further adopted for consideration. This cluster includes 68 objects under study. Then the variable “Cluster” was added to the table with other data for analysis.

Figure 4 shows a diagram of the distribution of pedestrian crossing accidents for cluster 4.

Thus it is revealed that the most dangerous are 2 pedestrian crossings, which are presented in Table 6.

Further analyses similar to those described above were carried out separately for the cluster 4 under consideration and the relevant factors at this stage were considered, which are presented in Table 7.

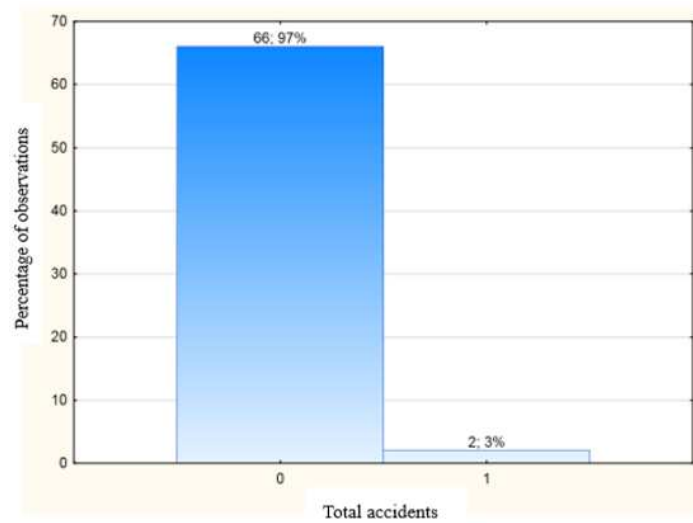


Figure 4. – Diagram of the distribution of accidents at pedestrian crossings: “0” – no accidents, “1” – there are accidents

Table 6. – Most dangerous pedestrian crossings

Street, house	Name of intersection / street section
206, Barykina str.	intersection
Vladimirova str.	street section, 16b, Vladimirova str.

Table 7. – Relevant factors for cluster 4

Factors	Best predictors for continuous dependent variable: total road traffic accidents (cluster 4). Method for selecting relevant variables: feature screening	
	F-value	p-value
6) the presence of an artificial bump	11,58677	0,001134
23) traffic intensity – N_{avg} auto/hour	3,91904	0,003759
67) the duration of the transition interval with the previous traffic light cycle phase for work programme 1, sec	3,40840	0,003935

The influence of factor 67 – the duration of the transition interval with the previous phase for work programme 1 – is presented in Figure 5.

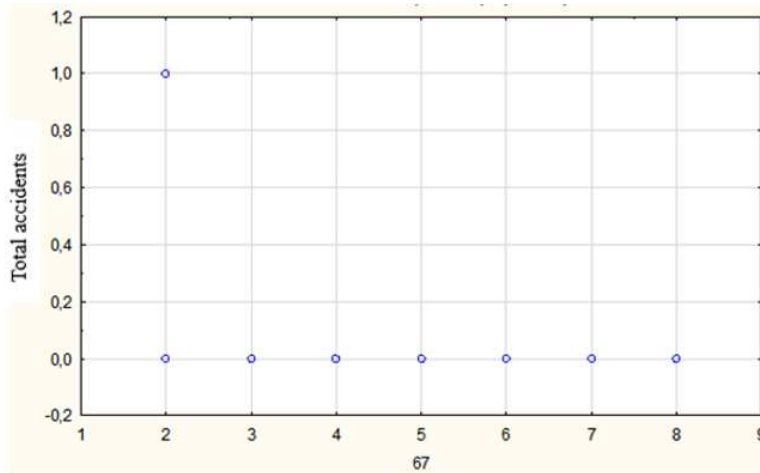


Figure 5. – A diagram of the impact on the accident rate for the factor “duration of the transition interval with the previous traffic light cycle phase for work programme 1”: x-axis - duration of the interval, sec

The diagram shows that there should be at least 3 seconds of transition interval between switching off the green signal for vehicles in the previous traffic light cycle phase and switching on the green signal for pedestrians in the next traffic light cycle phase.

Further, for example, the influence on pedestrian crossings of cluster 4 of such factors as: the presence of traffic light regulation at the pedestrian crossing, limitation of speed limits to 50 and 40 km/h at the approach to them, the presence of a safety island at the pedestrian crossing and pedestrian barriers on the left, right or on the dividing strip is considered.

The impact on the accident rate of the factor “presence of traffic light regulation at the pedestrian crossing” is presented in Figure 6.

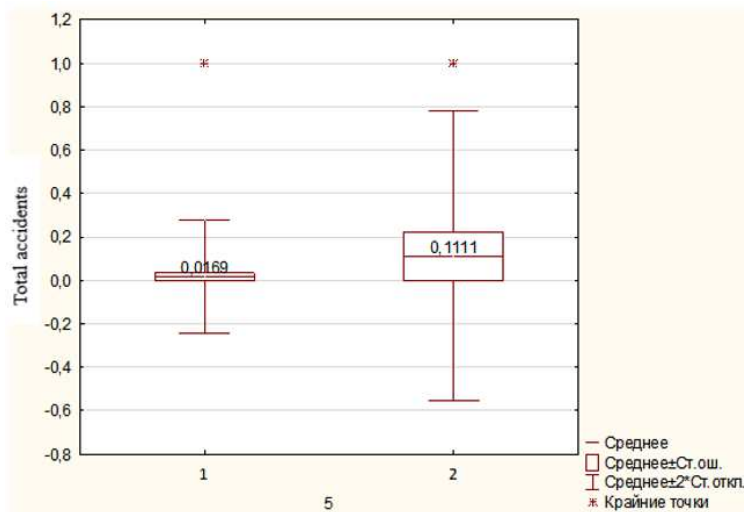


Figure 6. – Influence diagram for the factor “presence of traffic light regulation at the pedestrian crossing”:
 “1” – yes, “2” – no

The diagram shows that the presence of traffic light regulation at pedestrian crossings in cluster 4 reduces pedestrian accidents by an order of magnitude ($\Delta=0,85$, i.e. $(0,1111 - 0,0169)/0,1111 \approx 0,85$).

The effect on the accident rate of the parameter “speed limit” for controlled intersections (pedestrian crossings) is presented in Figure 7.

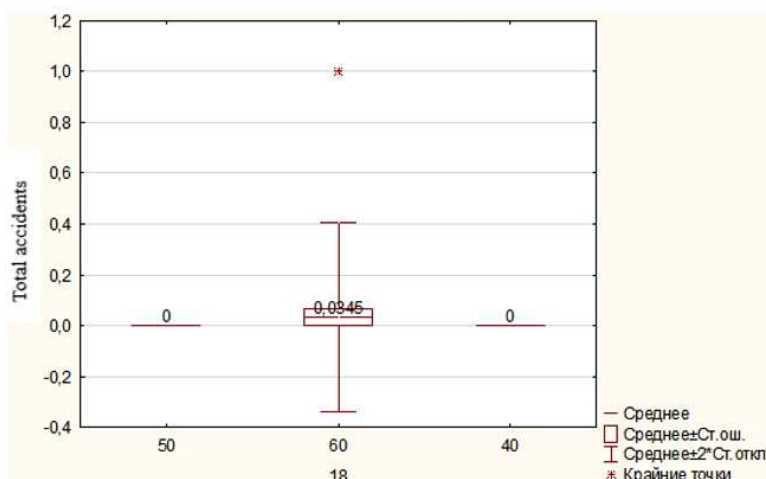


Figure 7. – Diagram for the parameter “speed limit”

The diagram shows that speed limitation from 60 km/h to 50 or 40 km/h on the approaches to controlled intersections reduces pedestrian accidents to 0 ($\Delta = 1$).

The crash magnitude diagram for the parameter “presence of safety island” at regulated intersections (pedestrian crossings) is presented in Figure 8. The presence of a safety island reduces the number of pedestrian accidents at such regulated intersections to 0 ($\Delta = 1$).

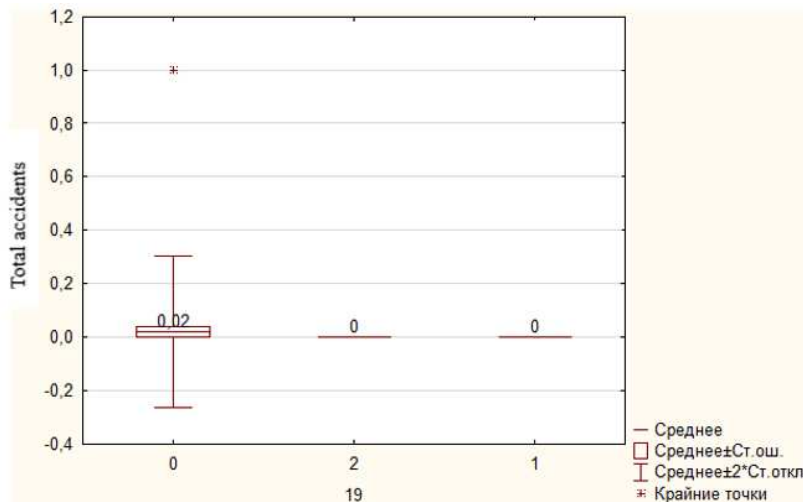


Figure 8. – Diagram of the spread for the parameter “presence of a safety island”:
 “0” – none, “1” – structurally allocated, “2” – gap in the dividing strip

The crash magnitude diagram for the parameter “presence of pedestrian barriers (left, right or on the dividing lane)” at controlled intersections is presented in Figure 9.

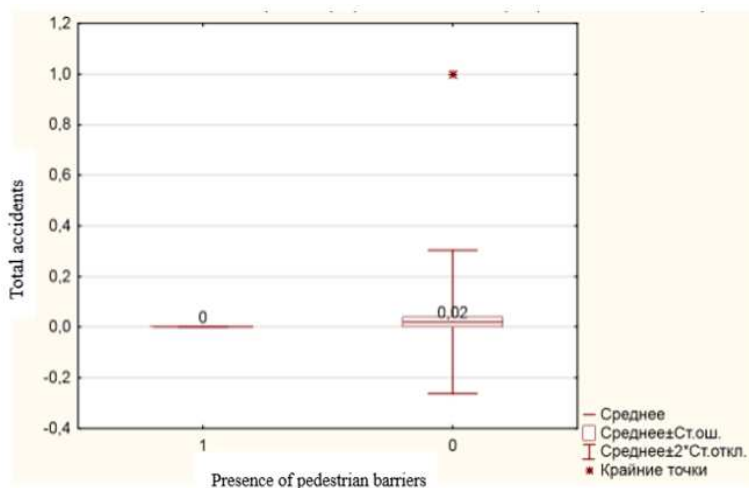


Figure 9. – Diagram of the spread for the parameter
 “presence of pedestrian barriers (left, right or on the dividing lane)”:
 “0” – none, “1” – yes

As can be seen, the presence of pedestrian barriers reduces the number of accidents with pedestrians at such regulated intersections (pedestrian crossings) to 0 ($\Delta = 1$).

Conclusion. Analysing the capabilities of various statistical methods of the specialised *Statistica* package as applied to the processing of road traffic parameters we can draw the following conclusions:

- 1) the application of the topographic type of accident analysis and the methods of the research package showed almost identical results;
- 2) a specific list of independent variables that significantly influence the values of pedestrian accident rates at pedestrian crossings was established;
- 3) a specific list of the most accidental pedestrian crossings was established;
- 4) it seems possible to establish how any intervention affects the number of road traffic accidents (upwards or downwards);
- 5) it seems possible to establish a specific proportion of the reduction in road traffic accidents with the introduction of any intervention (included in the scope of the study);
- 6) a certain proportion of the reduction in the number of crashes (see point 5) can then be used in accident forecasting.

REFERENCES

1. Azemsha, S.A. & Shust, O.N. (2022). Razrabotka meropriyatii po snizheniyu kolichestva i tyazhesti dorozhno-transportnykh proisshchivaniy s uchastiem peshekhodov v g. Gomele [Development of Measures to Reduce the Numbers and Severity Road Accidents with Pedestrian Participation in Gomel]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, (10), 51–58. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Azemsha S.A., Starovoitov A.N. (2017). *Primenenie nauchnykh metodov v povyshenii bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya*. – Gomel': BelGUT. (In Russ.).
3. Borovikov, V.P. (2013). *Populyarnoye vvedeniye v sovremennyy analiz dannykh v sisteme STATISTICA*. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom. (In Russ.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аземша С.А., Шуст О.Н. Разработка мероприятий по снижению количества и тяжести дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов в г. Гомеле // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2022. – № 10. – С. 51–58.
2. Аземша С.А., Старовойтов А.Н. Применение научных методов в повышении безопасности дорожного движения. – Гомель: БелГУТ, 2017. – 191 с.
3. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. – М.: Телеком, 2013. – 288 с.

Поступила 20.11.2024

**ОЦЕНКА АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ
НА АВАРИЙНОСТЬ С ПЕШЕХОДАМИ НА ПЕШЕХОДНЫХ ПЕРЕХОДАХ
ПОСРЕДСТВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАРИЯ ПАКЕТА STATISTICA**

**канд. техн. наук Д.П. ХОДОСКИН, О.А. ДОВГУЛЕВИЧ, И.С. АФАНАСЕНКО
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)**

Дорожно-транспортные происшествия (ДТП) с пострадавшими составляют порядка только лишь 5% от их общего числа, однако, особенно на пешеходных переходах, характеризуются высокой тяжестью и соответственно большими значениями аварийных потерь. В связи с этим необходимо в постоянном режиме производить оценку влияния наиболее значимых факторов и характеристик, таких как транспортно-пешеходная нагрузка, геометрические параметры самого пешеходного перехода и других, наиболее значимо влияющих на аварийность, основываясь на которой разрабатывать и внедрять наиболее эффективные мероприятия. Именно для этой цели в статье описан механизм выявления названных факторов и характеристик, определенных посредством комплекса возможностей, предоставляемых современной версией пакета Statistica.

Ключевые слова: аварийность с пешеходами, пешеходный переход, доля снижения числа ДТП, кластерный анализ.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 665.7.038.64

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-86-91

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТДЕЛЬНОЙ ФРАКЦИИ
ИЗ ГОССИПОВОЙ СМОЛЫ

Д.Г. ХАМИДОВ, д-р техн. наук, проф. С.Ф. ФОЗИЛОВ
(Бухарский инженерно-технологический институт)

Представлены сведения о негативном влиянии промышленных отходов на окружающую среду и актуальных проблемах их утилизации. В данном исследовании работа проводилась на госсиполовой смоле. Приведены ее фракционный состав и формула, проанализированы физико-химические свойства. Методом инфракрасного спектроскопического анализа определена химическая структура фракции, выделенной из госсиполовой смолы. Проведены предварительные исследования по определению состава и свойств данной фракции. Предложено ее использование в качестве сырья для получения вторичных продуктов. Описана схема термовыдавливания и механизм получения формовочных пластических материалов (ПСМ) из госсиполовой смолы.

Ключевые слова: госсиполовая смола, фракция, растворитель, инфракрасная спектроскопия, пластичные смазочные материалы, дисперсная фаза.

Введение. Отходы – одна из основных современных экологических проблем. Исследования последних лет показали, что количество промышленных отходов из года в год растет. И увеличение их объемов несет в себе потенциальную опасность для здоровья людей, а также опасность для окружающей природной среды. При этом их утилизация усложняется [1].

В целях соблюдения требований, изложенных в Законе «Об отходах» (Республика Узбекистан), по экологии и охране окружающей среды, переработке отходов и использованию продуктов, полученных на их основе в различных отраслях промышленности, госсиполовая смола (деготь) рассматривается как сырье. В нашей республике собирается около 25 тыс. т отходов смолы. Эти отходы эффективно перерабатываются в промышленных масштабах, однако использование результатов переработки для получения вторичных продуктов осуществляется не систематически [2; 3].

Основная часть. Деготь масложировой промышленности представляет собой черно-коричневый темный вязкий остаток со специфическим запахом (рисунок 1). Густая смола образуется в результате перегонки жирных кислот из соапстока хлопкового семени. Температура каплепадения составляет 48–52 °С, плотность 0,85–1,4 г/см³, вязкость при 52 °С 60–75 сст, нерастворим в воде и большинстве органических растворителей [4].

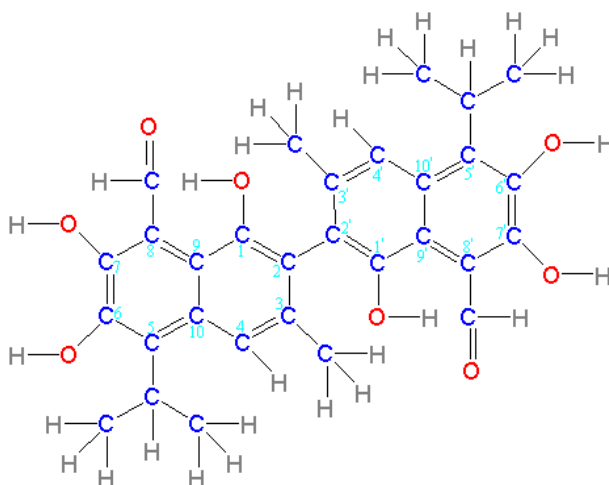


Рисунок 1. – Формула госсипола
(1,1',6,6',7,7'-гексагидрокси-5,5'-ди-изопропил-3,3'-диметил-2,2'-динафтил-8,8'-дикарбоксальдегид)

Различные показатели качества госсиполовой смолы, являющейся отходом масложировой промышленности, представлены в таблице 1. Анализ количества и состава госсиполовой смолы – в таблице 2. Фракционный состав госсиполовой смолы приведен в таблице 3.

Таблица 1. – Показатели качества госсиполовой смолы

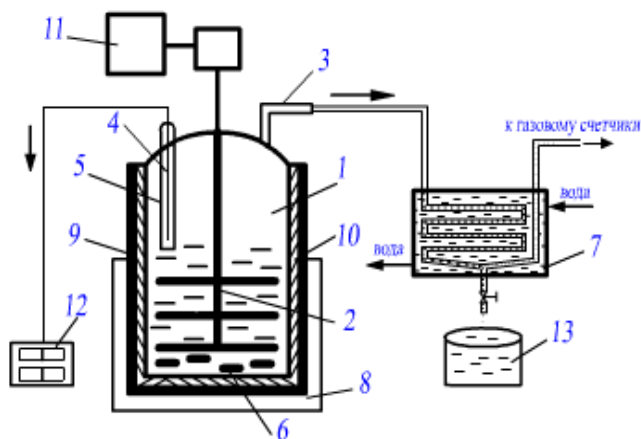
Показатели качества	Тип 1	Тип 2
Внешний вид	Однотипная масса	Текущая вязкость
Цвет	От черного до темно-коричневого	
Кислотное число, мг КОН	70–100	50–70
Молекулярная масса	595–1000	
Количество золы, %	1	1,2
Летучие вещества и содержание влаги, %	4	
Растворимость в ацетоне, %	80	70
Плотность, г/см ³	0,85–1,4	
Число омыления, мг КОН	80–130	

Таблица 2. – Групповой состав и элементный анализ госсиполовой смолы масложировая промышленности, полученной от АО «Ургенч масложировая»

Именование	Количество, %		Элементный состав, %			
	Продукт	H ₂ O	C	H	O	N
Смолы масложировая промышленности (госсиполовая смола)	100	4	80,5	9,6	8,1	0,8
Содержимое группы:						
– смола	90	–	81,4	8,6	8,3	1,7
– масло	2	–	81,6	11,4	7,7	0,3
– жидкость	2	–	75,7	13,4	6,9	–
– фракция парафина	1	–	76,9	14,3	8,8	–
– ароматические углеводороды	5	–	84,2	8,9	6,9	–

Таблица 3. – Фракционный состав госсиполовой смолы

Фракции	Фракционный состав	Выход госсиполовой смолы	Цвет и внешний вид
Жирокислотная часть	Жирные кислоты C ₁₆ –C ₁₈	51–56	Черное воскообразное вещество
Неомыляемая часть	Углеводород C ₂₇ –C ₃₅	20–24	Темно-коричневый
Фенол	Спирт, тостерон, амирин, витамин Е и фенол	21–23	От коричневого до темно-коричневого



1 – термоэлектрический реактор; 2 – смеситель; 3 – труба, по которой транспортируются отдельные компоненты при температуре до 320 °С; 4 – термopара; 5 – оболочка термopары; 6 – кубический остаток; 7 – ванна охлаждения паромасляного компонента; 8 – основание, удерживающее реактор; 9 – теплоудерживающий слой; 10 – электронагреватели (ТЭН); 11 – электродвигатель привода мешалки; 12 – теплоизмеритель; 13 – емкость для сбора воды и тампонажа

Рисунок 2. – Принципиальная схема опытной установки реактора с мешалкой госсипола в нефтяной промышленности

Сегодня мы используем госсиполовую смолу в нефтяной промышленности для производства формовочных пластиковых материалов (ПСМ). Однако непосредственно в этом качестве ее использовать нельзя. По этой причине его нагревали до определенной температуры с помощью экспериментального устройства. Эксперимент был проведен нами несколько раз для определения средней температуры разделения фракции.

Для этого эксперимента был построен реактор (см. рисунок 2) с термоприводом и мешалкой массой 3,8 кг.

При получении ПСМ в термоэлектрический реактор 1 с мешалкой заливают 2,5 кг сырья (госсиполовой смолы), привезенного с Ургенчского нефтепромышленного комплекса. Его нагревают электронагревателями 10 и перемешивают мешалкой 2, прикрепленной к электродвигателю 11. Продолжительность этого процесса зависит от разделения компонентов госсиполовой смолы. Эта температура составляет примерно 280–320 °С при атмосферном давлении. Теплоизмерительное устройство 12 контролируется с помощью термодпары 4. Первоначально при повышении температуры в этом процессе вода в госсиполовой смоле испаряется до температуры 125 °С. После этого компоненты масла начинают испаряться, т.е. при температуре госсиполовой смолы в реакторе 130 °С начинают разделяться паромасляные компоненты (фракции). После этого он охлаждается в охлаждающей ванне 7 и стекает в сборный резервуар 13. В качестве охлаждающего агента использовалась вода. Когда температура в реакторе достигает 320 °С, практически все компоненты масла разделяются. Отделенную фракцию использовали в качестве компонента для получения ПСМ и приготовили 9 проб.

На рисунке 3 представлена фракция, полученная из смолы госсипола.



Рисунок 3. – Внешний вид фракции (жирных кислот), полученной из госсиполовой смолы

Чтобы определить, какие группы присутствуют в экстрагированной фракции (жирных кислотах) госсиполовой смолы, характеристические частоты колебаний функциональных групп были изучены методом инфракрасной спектроскопии (ИКС).

Метод анализа ИКС помогает определить химическую структуру анализируемых веществ и дает информацию, какие функциональные группы присутствуют в их составе. Этот метод отличается расходом очень небольшого количества материала пробы для анализа и выполнением анализа в очень короткие сроки, а также точностью получаемых данных. Поскольку каждому соединению соответствует свой инфракрасный спектр вещества, этот спектр называют паспортом данного конкретного соединения.

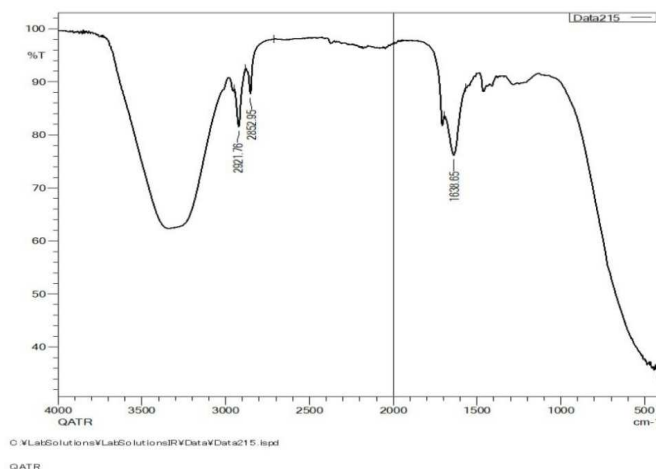


Рисунок 4. – ИК-спектр фракции, выделенной из госсиполовой смолы

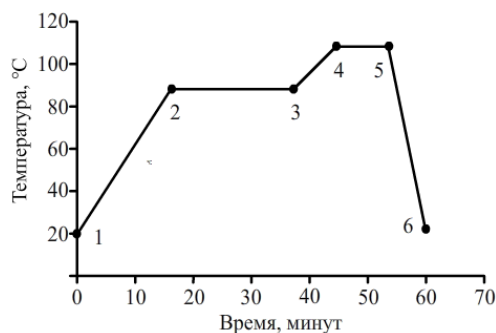
ИК-спектр фракции, выделенной из госсиполовой смолы (см. рисунок 4), получали на приборе Fure (SHIMADZU, Япония) (диапазон 400–4000 см⁻¹, размеры 4 см⁻¹). Это устройство представляет собой высокочувствительное и компактное устройство, оснащенное стабилизированным детектором ДЛТАГС и высокочувствительным и ярким керамическим источником излучения. Анализ спектров проводился с помощью программного обеспечения, которое автоматически измеряет спектры и имеет инструменты для графического отображения спектров и их групп.

В ИК-спектре (см. рисунок 4) во фракции наблюдается колебательный тип водородных связей гидроксильной (ОН) группы с широким и интенсивным сигналом валентности и интенсивности в области 3350,35 см⁻¹. Его сигнал вибрации деформации в районе 1450,66 см⁻¹. Сигналы, соответствующие деформационным колебаниям метильной (СН₃) группы, наблюдаются в области 2921,76 см⁻¹. Видно, что сигнал, характерный для валентного колебания связи С=О, наблюдался в области 1638,65 см⁻¹.

ПСМ имеют достаточно сложный состав, а их свойства во многом зависят от состава и свойств дисперсной фазы и дисперсной среды. ПСМ готовят путем смешивания определенного количества основы (минеральных или синтетических масел, 70–90%) и загустителей (органических, неорганических, мыльных и углеводородных, 8–25%). Если из минеральных масел используют парафиновые, нафтеновые или ароматические масла, то из синтетических масел используют олефиновые полимеры, акриловые эфиры, спирты, простые эфиры и т.д. В качестве загустителя используются стандартное, гидроксидное и комплексное мыла (Li, Na, Ca, Ba, Al), а из органических и неорганических, соответственно, полимочевина, тефлон, полиэтилен, оксид алюминия, оксид кремния и силикагель. В качестве углеводородных загустителей – парафин, церезин и вазелин.

В зависимости от типа загустителей выбирается температура процесса обжига ПСМ. Например, кальциевые ПСМ обжигаются при 80–100 °С, алюминиевые ПСМ – при 140–150 °С, натриевые и литиевые ПСМ – при 200–210 °С, углеводородные ПСМ – при 100–120 °С.

В этом исследовании в качестве загустителя нами был использован стеарат кальция. Чтобы точно определить продолжительность и температуру варки, мы воспользовались патентом № 2076141¹. Последовательность приготовления кальциевых ПСМ представлена на рисунке 5.



1 – смешивание компонентов; 1-2 – стадия нагрева; 2-3 – стадия формирования ПСМ; 3-4 – стадия нагрева; 4-5 – стадия испарения воды; 5-6 – стадия охлаждения

Рисунок 5. – Последовательность приготовления кальциевых ПСМ

Процесс подготовки состоит из 5 этапов. Продукты, полученные на ступени 1-2, смешивают, затем смесь медленно нагревают.

На стадии 2-3 в результате взаимодействия молекул дисперсной среды и дисперсной фазы образуется ПСМ. Этот процесс служит для поддержания продукта при одной и той же температуре в течение 20 мин.

На стадии 3-4 температуру нагрева смеси повышают выше температуры кипения воды.

На стадии 4-5 выбранную температуру поддерживают некоторое время для полного испарения воды в смеси. Этот процесс – необходимый этап формирования требуемой структуры ПСМ.

Образец ПСМ, полученный на 5-6, последнем, этапе, охлаждают. Охлаждение производится без перемешивания. Охлаждение должно быть быстрым, т.к. от него зависит формирование каркаса дисперсной фазы ПСМ и его качество.

Для полученных образцов маслянистого солидола ее проводили исходя из требований ГОСТ 1033-79². Путем определения нескольких показателей качества ПСМ были определены области его применения. Число

¹ Пат. РФ № 207614. Пластичная смазка / Ю.И. Блохин, И.А. Прокопьев, А.В. Усталов, Ю.С. Викторова.

пенетрации ГОСТ 1440³, температуру капля падения ГОСТ 6793⁴, массовую долю свободной щелочи NaOH ГОСТ 6707⁵, наличие свободных органических кислот ГОСТ 6707⁵, сохранение механических соединений, нерастворимых в соляной кислоте ГОСТ 6479⁶ и массовой доли воды проводили по ГОСТ 2477⁷.

Заключение. Таким образом, были определены состав и свойства фракции, выделенной из госсиполовой смолы.

По результатам проведенных исследований предложено ее использование в качестве заменителя дисперсной фазы при производстве антифрикционных пластических смазочных материалов [5; 8].

Было получено несколько композиций образцов с разным процентным содержанием. Установлено, что образец, приготовленный с добавкой от 3 до 8%, при проверке составов соответствует требованиям ГОСТ 1033 на солидол J. Композиции ПСМ, приготовленные путем добавления от 3 до 8%, могут использоваться в соединениях трения в диапазоне температур от -25 до 90 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тиллоев Л.И., Усмонов, Х.Р.У., Хамидов Д.Г. Техническая классификация отходов в газовых химических комплексах // *Universum: технические науки*. – 2020. – № 5(74). – С. 74–78.
2. Алоидинов С.Ж.У., Тиллоев Л.И., Хамидов Д.Г. Исследование показателей отработанного оксида алюминия // *Universum: технические науки*. – 2021. – № 5(86). – С. 5–9.
3. Хамидов Д.Г., Базаров Г.Р. Физико-химические основы процесса депарафинизации нефтепродуктов // *Вопросы науки и образования*. – 2017. – № 3(4). – С. 29–30.
4. Xamidov D., Fozilov S., Ismoilov M., To'raqulova M. Gossipol qatroni asosida olingan surkov materialining sifat ko'rsatkichlari // *Farg'ona davlat universiteti*. – 2024. – № 3. – С. 138.
5. Jumayev A.V., Xamidov D.G.A. Maydalangan silikagel kukunini plastik surkov moylari tarkibiga qo'shish va xossalari ta'sirini o'rganish // *Science and Education*. – 2022. – № 3(6). – С. 361–366.
6. Xamidov D.G.A., Temirov A.H. o'g'li. Parafinli neftlarning fizik-kimyoviy xossalari tahlili // *Science and Education*. – 2020. – № 1(9). – С. 30–36.
7. Xamidov D.G.A., Axmedov A.Z. Bioyoqilg'ilar olish sanoati va uning imkoniyatlari // *Science and Education*. – 2020. – № 1(9). – С. 154–156.
8. G'aybullayeva A.F., Tilloyev L.I., Xamidov D.G.A. Ishlatilgan motor moylarini shisha tolali filtrlar bilan suvsizlantirish jarayonini tadqiq qilish // *Science and Education*. – 2020. – № 1(9). – С. 170–178.

REFERENCES

1. Tilloev, L.I., Usmonov, Kh.R.U. & Khamidov, D.G. (2020). Tekhnicheskaya klassifikatsiya otkhodov v gazovyx khimicheskikh kompleksakh [Technical Classification of Waste in Gas Chemical complexes]. *Universum: tekhnicheskije nauki*, 5(74), 74–78. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Aloidinov, S.Zh.U., Tilloev, L.I. & Khamidov, D.G. (2021). Issledovanie pokazatelei otrabotannogo oksida alyuminiya [Study of the Performance of Spent Aluminum Oxide]. *Universum: tekhnicheskije nauki. tekhnicheskije nauki*, 5(86), 5–9. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Khamidov, D.G. & Bazarov, G.R. (2017). Fiziko-khimicheskie osnovy protsessa deparafinizatsii nefteproduktov. *Voprosy nauki i obrazovaniya*, 3(4), 29–30. (In Russ.).
4. Xamidov, D., Fozilov, S., Ismoilov, M. & To'raqulova, M. (2024). Gossipol qatroni asosida olingan surkov materialining sifat ko'rsatkichlari. *Farg'ona davlat universiteti*, (3), 138. (In Uzbek).
5. Jumayev, A.V. & Xamidov, D.G. (2022). Maydalangan silikagel kukunini plastik surkov moylari tarkibiga qo'shish va xossalari ta'sirini o'rganish [Study of the Effect of Adding Crushed Silica Gel Powder to Plastic Lubricants and their Properties]. *Science and Education*, 3(6), 361–366. (In Uzbek, abstr. in Engl.).
6. Xamidov, D.G.A. & Temirov, A.H. o'g'li. (2020). Parafinli neftlarning fizik-kimyoviy xossalari tahlili [Analysis of the Physicochemical Properties of Paraffinic Oils]. *Science and Education*, 1(9), 30–36. (In Uzbek, abstr. in Engl.).
7. Xamidov, D.G.A. & Axmedov, A.Z. (2020). Bioyoqilg'ilar olish sanoati va uning imkoniyatlari [The biofuels industry and its potential]. *Science and Education*, 1(9), 154–156. (In Uzbek, abstr. in Engl.).
8. G'aybullayeva, A.F., Tilloyev, L.I. & Xamidov, D.G.A. (2020). Ishlatilgan motor moylarini shisha tolali filtrlar bilan suvsizlantirish jarayonini tadqiq qilish [Research on the process of dewatering used motor oils using fiberglass filters]. *Science and Education*, 1(9), 170–178. (In Uzbek, abstr. in Engl.).

Поступила 15.11.2024

² ГОСТ 1033-79. Универсальные смазки. – М., 1981. – 4 с.

³ ГОСТ 1440-78*. Приборы для определения пенетрации нефтепродуктов. Общие технические условия. – М., 1986. – 17 с.

⁴ ГОСТ 6793-74. Нефтепродукты. Метод определения температуры каплепадения. – М., 1974. – 3 с.

⁵ ГОСТ 6707-76. Смазки пластичные. Метод определения свободных щелочей и свободных органических кислот. – М., 1977. – 3 с.

⁶ ГОСТ 6479-73. Смазки пластичные. Метод определения содержания механических примесей разложением соляной кислотой. – М., 1974. – 3 с.

⁷ ГОСТ 2477-2014. Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды. – М., 2014. – 7 с.

**STUDY OF PROPERTIES AND USE OF A SEPARATE FRACTION
OF GOSSYPOL RESIN**

D. KHAMIDOV, S. FOZILOV
(Bukhara Engineering-Technological Institute)

The work was carried out on gossypol resin, which was considered a waste product of the oil industry. The fractional composition and formula of gossypol resin are presented, and its physicochemical properties are analyzed. The chemical structure of the fraction isolated from gossypol resin is determined by infrared spectroscopic analysis. Preliminary studies are conducted to determine the composition and properties of this fraction. Its use as a raw material for obtaining secondary products is proposed. A scheme of thermal extrusion and a mechanism for obtaining molding plastic materials (PSM) from gossypol resin are presented.

Keywords: *gossypol resin, fraction, solvent, infrared spectroscopy, plastic lubricants, dispersed phase.*

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ СМЕСЕЙ СКОПА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ОТХОДОВ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

В.А. ЕМЕЛЬЯНОВА

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0507-0206>

канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>,

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлен обзор литературы по проблеме способов утилизации скопа очистных сооружений, выявлены перспективные способы его утилизации. Рассмотрен состав скопа очистных сооружений ОАО «Слонимский картонно-бумажный завод “Альбертин”», а также состав золы после прокаливания скопа. Изучены образцы скопа, древесных опилок и их смесей с различным содержанием скопа. Получены кривые дифференциального термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии скопа, древесных опилок и их смесей. Определена зависимость изменений потери массы образцов скопа, древесных опилок и их смесей при нагревании до 900 °С в воздушной среде от содержания скопа в смеси. Отмечена зависимость тепловых характеристик образцов скопа, древесных опилок и их смесей.

Ключевые слова: отходы очистных сооружений, скоп, утилизация скопа, термогравиметрический анализ, древесные опилки.

Введение. Очистка сточных вод – важный аспект современных промышленных процессов, направленных на охрану здоровья населения и защиту окружающей среды. В этом контексте обращение с осадком – побочным продуктом очистки сточных вод, имеет большое значение.

Обработка осадков является одной из наиболее технологически сложных и самой дорогостоящей частью очистных комплексов, включающей в себя максимальное снижение влажности и объема осадков, их стабилизацию и обеззараживание [1].

Технологический процесс производства картонно-бумажной продукции состоит из нескольких этапов. Он начинается с подготовки макулатурной массы, т.е. роспуска в гидроразбивателе с извлечением отходов синтетических полимеров и последующей сортировки для выделения мелких фракций полимеров, металлических включений и других загрязнений. Затем очищенная макулатурная масса подается на бумагоделательную машину, где происходит формовка, проклейка, сушка, накат и отделка готового бумажного полотна. В процессе формования бумажной массы и промывки оборудования образуется сток, а при его очистке – большое количество скопа, состоящего на 90% из макулатурного волокна и на 10% из механических примесей [2].

Скоп, содержащий смесь органических и неорганических материалов, представляет собой проблему при утилизации из-за его потенциального воздействия на окружающую среду. Поиск экологически безопасных способов утилизации скопа на сегодня является актуальной темой.

Основная часть. *Обзор существующих методик способов утилизации скопа очистных сооружений.* На основании анализа научно-технической информации можно выделить следующие способы переработки и обезвреживания скопа (рисунок 1):

1. **Анаэробное сбраживание.** Данный процесс позволяет эффективно разлагать органические вещества, включая целлюлозу, в бескислородных условиях. Целлюлоза в осадке расщепляется анаэробными микроорганизмами на биогаз – возобновляемый источник энергии, богатый метаном. Биогаз может быть использован для производства тепла и электроэнергии или преобразован в биометан для закачки в газовые сети или автомобильное топливо.

2. **Аэробное компостирование.** Учитывая, что скоп в основном состоит из органических компонентов с небольшим количеством биогенных элементов, его можно потенциально перерабатывать через полевое компостирование в буртах или жомовых ямах. Однако скоп содержит ограниченное количество биогенных компонентов, поэтому рекомендуется его компостировать вместе с биоразлагаемыми отходами, такими как кородревесные отходы, которые образуются при обработке древесины на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности. Кородревесные отходы также содержат азот, который является важным питательным элементом для растений. Кроме того, процесс компостирования можно усилить путем внесения минеральных и органических удобрений [2].

3. **Использование при производстве строительных материалов.** Скоп может быть использован как добавка в производстве вспученных обожженных глиняных заполнителей – керамзита и аглопорита. Известна технология производства теплоизоляционного материала, при которой скоп использовали в двух вариантах: как наполнитель в теплоизоляционном материале на основе минерального вяжущего и как самостоятельное вяжущее вещество с наполнителем в виде зернистых пористых материалов. Скоп может быть использован как ком-

понент бетонной смеси, повышающий ее удобоукладываемость; как выгорающая добавка в производстве керамического кирпича, при получении сухой гипсовой штукатурки, а также в качестве добавки к смеси для изоляционных плит, в производстве строительных блоков и отделочных материалов. Преимуществом использования скопа заключается в возможности экономии первичных ресурсов [3].



Рисунок 1. – Способы утилизации целлюлозосодержащего скопа очистных сооружений

4. *Пиролиз* включает в себя нагревание целлюлозосодержащего осадка при высоких температурах в отсутствие кислорода для получения биоугля, биотоплива и синтез-газа, которые могут быть использованы в качестве возобновляемого топлива или добавок к почве. Пиролиз предлагает потенциальное решение для преобразования насыщенного целлюлозой осадка в ценные продукты при одновременном снижении воздействия утилизации осадка на окружающую среду.

5. *Производство сорбентов*. Исследования в этой области в основном сосредоточены на целлюлозосодержащих компонентах растительной биомассы и отходах от их переработки, особенно интересными являются остатки от древесной промышленности. В научной литературе широко представлены работы, посвященные использованию таких материалов для удаления различных загрязнителей из водных сред, включая нефтепродукты, красители и другие промышленные отходы. Одним из значимых преимуществ использования этих материалов является их массовое образование и относительная доступность. Однако следует учитывать проблемы, связанные с их хранением, т.к. они могут подвергаться возгоранию или разложению.

Поскольку скоп обладает сорбционными свойствами, возможно его использование для производства сорбционных изделий. Для придания сорбенту антибактериальных свойств и снижения горючести рекомендуется использовать различные добавки (например, буру, антипирен и др.) [4].

6. *Термическое обезвреживание*. Сжигание позволяет обеспечить стопроцентное обеззараживание осадка и эффективное использование теплоты сгорания органики для получения энергии. Ограничение вывоза органических веществ на полигоны ТБО стимулирует или обязывает предприятия канализационно-водопроводного хозяйства сжигать осадок при невозможности его утилизации другим методом [5]. Скоп, который прошел обезвреживание на вакуум-филтрах, может быть подвергнут термическому обезвреживанию путем сжигания в различных типах печей. В результате получается зольный остаток, а выделяющееся тепло может быть использовано в промышленных процессах. Учитывая высокую зольность и повышенную влажность скопа, наиболее эффективно его сжигать вместе с кордревесными отходами, образующимися при обработке древесины. Полученная топливная смесь может подаваться на обезвреживание навалом либо использоваться для производства топливных брикетов [2].

7. *Химическая обработка*. Химические методы обработки могут быть использованы для улучшения расщепления целлюлозы и обезвреживания осадка. Добавление химических веществ, таких как известь или

перекись водорода, будет способствовать разложению целлюлозы и высвобождению воды из матрицы осадка. Химическая обработка также может помочь в удалении загрязняющих веществ и улучшить качество конечного продукта для повторного использования или утилизации.

На основании выполненных теоретических исследований, с учетом экологических, экономических и технологических критериев наиболее оптимальным методом обращения с скопом является его термическое обезвреживание с последующим получением тепловой энергии и зольного остатка, который в дальнейшем может быть использован в качестве добавки к органоминеральному удобрению или строительным материалам.

Таким образом, понимание свойств осадка и изучение стратегий устойчивого использования имеют решающее значение для эффективной работы очистных сооружений.

Исследовательская часть. В качестве объекта исследований использовался скоп с очистных сооружений ОАО «Слонимский картонно-бумажный завод «Альбертин»».

Скоп, образующийся после очистки стоков с содержанием взвешенных веществ, состоит из 61,57% влаги и 38,43% сухого вещества, который в свою очередь состоит из 67,9% органического вещества, 0,97% азота, 0,55% фосфора и 0,07% калия. Также в состав скопа входят кадмий, медь, мышьяк, ртуть, свинец и цинк.

Неорганический остаток после прокаливания образца скопа имеет следующий химический состав, % масс.: SiO_2 – 3,470; CaO – 2,040; Fe_2O_3 – 0,294; P_2O_5 – 0,128; Al_2O_3 – 2,220; Na_2O – 0,734; K_2O – 0,273; TiO_2 – 0,107; MgO – 0,735; SO_3 – 0,707; Cl_2 – 0,263. Потери при прокаливании составляют 88,96% и относятся к органогенным элементам целлюлозы – С, О и Н. Следовательно, количество минеральных примесей в образце целлюлозы составляет 11,04% масс. Особенностью скопа ОАО «Слонимский картонно-бумажный комбинат «Альбертин»» является невысокое содержание в его химическом составе каолина, являющегося антикоагулянтном.

Термогравиметрический анализ образцов скопа, древесных опилок, смесь древесных опилок с 5% масс. и 7,5% масс. скопа проводился при помощи термогравиметрического анализатора LR-TGA101. Результаты проведенных анализов представлены на рисунках 2–4.

Потеря массы исходного высушенного скопа (рисунок 2) составила 56,04% масс. В области от 200 °С до 800 °С наблюдается 3 пика потери массы. Первый пик (экзотермический эффект) с наибольшей удельной энтальпией для скопа воздушно-сушеного равен 339 °С, энтальпия 374,92 Дж/г. Второй пик (экзотермический эффект) равен 455,6 °С, энтальпия 324,2 Дж/г. Третий пик (эндотермический эффект) для исходного скопа равен 766 °С, энтальпия 7,56 Дж/г.

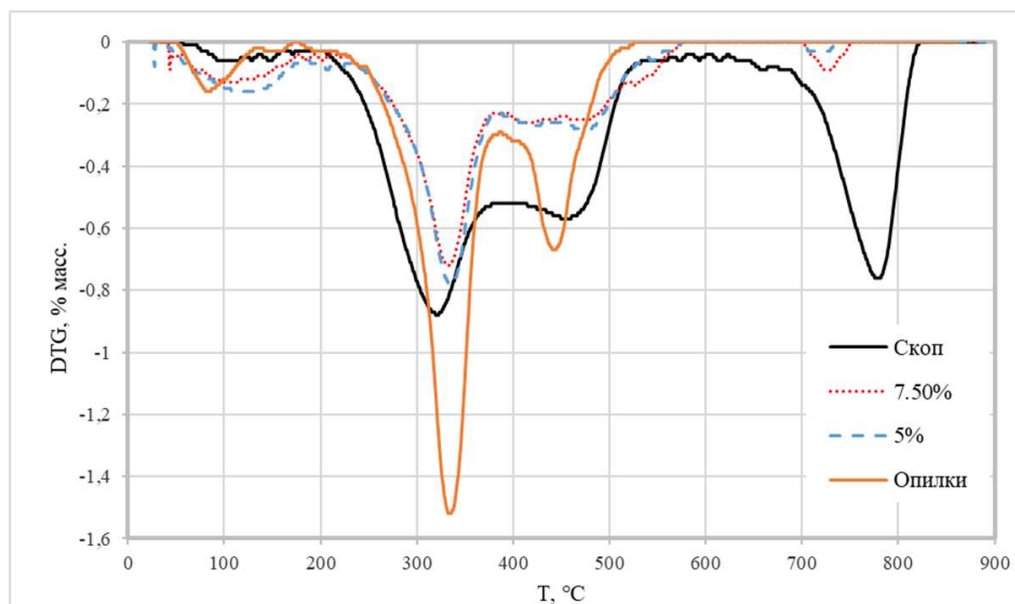


Рисунок 2. – Кривые дифференциального термогравиметрического анализа скопа, древесных опилок и их смесей

Потеря массы смеси опилок и скопа (5% масс) (рисунок 3) при нагревании в воздушной среде составила 77,43% масс. На кривых термогравиметрического анализа наблюдается три равновеликих пика с температурами 343,7 °С, 411,1 °С и 475,2 °С при энтальпиях порядка 474,5 Дж/г. Первая часть пика объясняется сгоранием органического вещества древесины и органической части скопа, но в отличие от чистых опилок его скорость сгорания при увеличении температуры снизилось

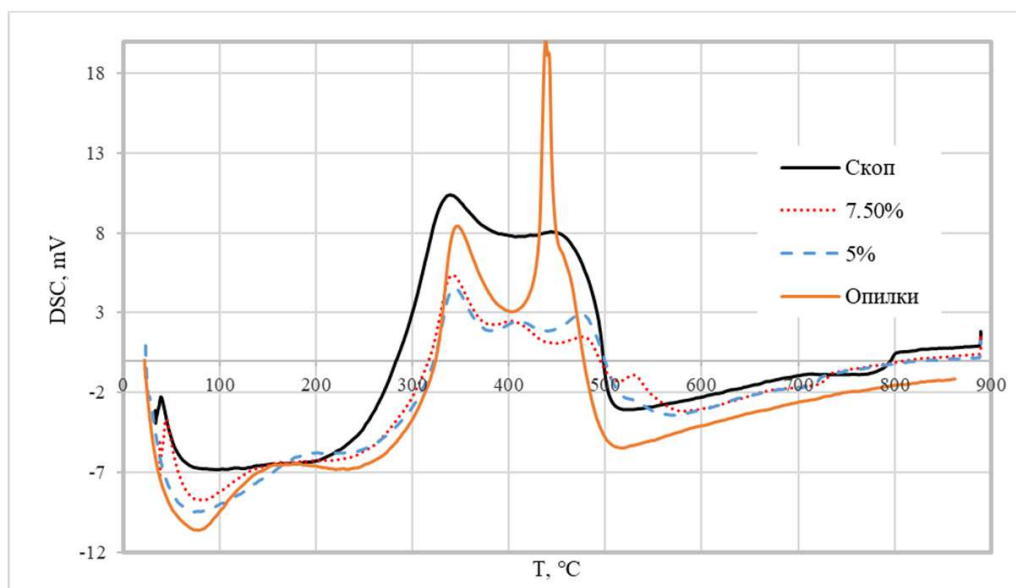


Рисунок 3. – Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии скопа, древесных опилок и их смесей

Потеря массы смеси опилок и скопа (7,5% масс) (рисунок 4) при нагревании в воздушной среде составила 78,49% масс. На кривых термогравиметрического анализа наблюдается три пика с температурами 341,1 °C и энтальпией 588,33 Дж/г, а также менее выраженные пики на температурах 403,1 °C и 476,9 °C с энтальпиями порядка 306,9 Дж/г и один пик (слабо выраженная эндотермический эффект) с температурой 713,8 °C с энтальпией 4,1302 Дж/г. Второй пик объясняется появлением в смеси карбонатов.

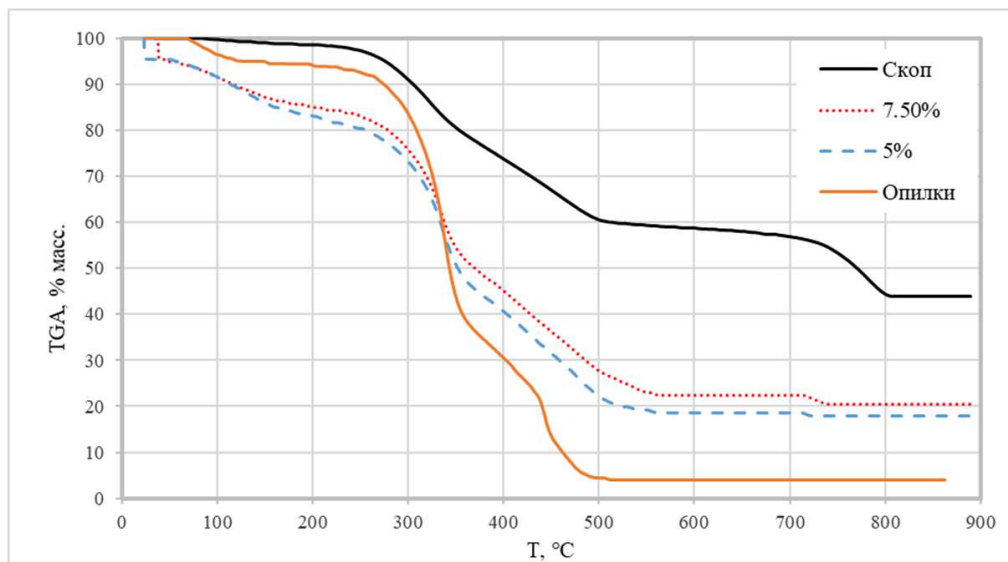


Рисунок 4. – Результаты интегрального термогравиметрического анализа скопа, древесных опилок и их смесей

До температуры примерно 280 °C веден эндотермический эффект, когда происходит полное испарение несвязанной воды из смеси, после 280 °C – небольшие пики у смесей чистого воздушно-сушеного скопа и скопосодержащих смесей. Вероятно, имеет место термическое разложение (пиролиз) биомассы, которое начинается при температуре 150 °C (температура самовоспламенения находится около 330 °C). Остальная часть графика в виде основного пика – это сгорание органической части скопа и опилок при температурах около 350–500 °C.

Таким образом, после проведения термогравиметрического анализа можно сделать вывод, что с увеличением концентрации скопа полнота сгорания смеси снижается, при этом более существенный эффект появляется при концентрации скопа более 10% масс.

Заключение. Перспективными способами утилизации скопа является его переработка путем термодеструкции с целью дальнейшего использования в качестве компонента твердых топлив. Результаты, полученные в ходе проведенных исследований, свидетельствуют о том, что при добавлении целлюлозосодержащего скопа к древесным опилкам не наблюдается искомым синергетических тепловых эффектов. Использование данного конкретного скопа в пеллетах бесперспективно, т.к. его зольность значительно выше, чем у аналогичных скопов на других заводах. Очевидно, это обусловлено плохой фильтрацией песка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холуденева А.О., Ефремова С.Ю. Снижение негативного влияния осадка сточных вод картонно-бумажного производства на почву // Плодородие. – 2021. – № 5. – С. 101–104. DOI: 10.25680/S19948603.2021.122.25
2. Ширинкина Е.С., Айтжанова У.М. Переработка скопа, образующегося в технологическом процессе картонно-бумажного производства // European science. – 2016. – № 2(12). – С. 13–16.
3. Баталин Б., Козлов И. Строительные материалы на основе скопа – отхода целлюлозно-бумажной промышленности // Строительные материалы. – 2004. – № 1. – С. 42–43.
4. Баталин Б., Козлов И. Скоп как сорбционно-активное вещество // Изв. выс. учеб. заведений. Стр.-во. – 2006. – № 2. – С. 37–40.
5. Дулькин Д. А. Утилизация осадков и макулатуры, не используемой в бумажном производстве // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2006. – № 9. – С. 50–55.

REFERENCES

1. Kholudeneva, A.O. & Efremova, S.Yu. (2021). Snizhenie negativnogo vliyaniya osadka stochnykh vod kartonno-bumazhnogo proizvodstva na pochvu [Reduction of Wastewater Sludge and their Negative Impact on the Soil]. *Plodorodie [Fertility]*, (5), 101–104. DOI: 10.25680/S19948603.2021.122.25 (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Shirinkina, E.S. & Aitzhanova, U.M. (2016). Pererabotka skopa, obrazuyushchegosya v tekhnologicheskom protsesse kartonno-bumazhnogo proizvodstva [Recovered stock recycling formed on pulp and paper organization]. *European science*, 2(12), 13–16. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Batalin, B. & Kozlov, I. (2004). Stroitel'nye materialy na osnove skopa – otkhoda tsellyulozno-bumazhnoi promyshlennosti. *Stroitel'nye materialy*, (1), 42–43. (In Russ.).
4. Batalin, B. & Kozlov, I. (2006). Skop kak sorbtionno-aktivnoe veshchestvo. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*, (2), 37–40. (In Russ.).
5. Dul'kin, D.A. (2006). Utilizatsiya osadkov i makulatury, ne ispol'zuemoi v bumazhnom proizvodstve. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, (9), 50–55. (In Russ.).

Поступила 15.01.2025

STUDY OF THE POSSIBILITY OF RECYCLING MIXTURES OF OSPREY TREATMENT PLANTS AND WOOD PROCESSING WASTE

V. YEMELYANOVA, A. YERMAK
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

A literary analysis of the methods of disposal of osprey of sewage treatment plants has been carried out, promising ways of its disposal have been identified. The composition of the osprey of the treatment facilities of JSC Slonim Cardboard and Paper Plant "Albertin" was considered, as well as the composition of ash after calcination of the osprey. Samples of osprey, sawdust and mixtures with different osprey content were studied. The curves of differential thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry of osprey, sawdust and their mixtures are obtained. The dependence of the change in mass loss of osprey samples, sawdust and their mixtures when heated to 900 °C in air on the content of osprey in the mixture was determined. The dependence of the thermal characteristics of osprey samples, sawdust and their mixtures is shown.

Keywords: waste from sewage treatment plants, osprey, osprey disposal, thermogravimetric analysis, sawdust.

УДК 66.021.3

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-97-106

**ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЧИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ
ЭЛЕМЕНТА РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРИРОВАННОЙ НАСАДКИ**

*канд. техн. наук Д.Ю. МЫТЬКО, Я. ЯН, Х. ЧЖАО, ЧЖ. СУНЬ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)*

Исследовалось смачивание поверхности элементов регулярной структурированной насадки, применяемой в процессах разделения фаз в химической промышленности. В ходе экспериментов оценивалось влияние геометрических характеристик гофрированных листов, таких как длина образующей и наличие перфорации, на эффективность смачивания и гидродинамические параметры. Результаты показали, что перфорация гофрированных элементов значительно улучшает смачивание, способствуя равномерному распределению жидкости по поверхности и повышая интенсивность взаимодействия фаз. На основе полученных данных был определен оптимальный размер образующей гофры. В частности, размер образующей 8 мм был признан наиболее эффективным и использован для проектирования двух типов насадок с удельной поверхностью 250 м²/м³ и 400 м²/м³. Полученные результаты имеют значительное практическое значение и могут использоваться для разработки более эффективных аппаратов в химической промышленности, что в свою очередь будет способствовать улучшению производительности и снижению затрат.

Ключевые слова: *смачивание, гофрированные листы, перфорация, регулярная структурированная насадка, гидродинамика, гидравлическое сопротивление, проектирование насадок, химическая промышленность.*

Введение. Регулярная структурированная насадка широко используется в процессах разделения фаз в химической промышленности благодаря своей высокой пропускной способности и эффективности массопередачи, а также низкой вероятности затопления насадки при малых расходах газа. Эти характеристики делают ее незаменимой в различных технологических процессах, таких как абсорбция, дистилляция и ректификация. Наиболее известной компанией, занимающейся разработкой и исследованием подобных конструкций, является Sulzer Chemtech. Их продукция в виде насадок Montzpak, Rombopak и Raschig-Superpak часто встречается в колонных аппаратах на предприятиях по всему миру [1–4].

Экспериментальная работа является традиционной частью исследования, демонстрирующей как преимущества, так и недостатки изучаемых конструкций [5–12]. Ранее нами был выполнен ряд экспериментов по изучению гидродинамики и эффективности массопередачи регулярных структурированных насадок, изготовленных из гофрированных листов. Эти работы дали возможность оценить влияние геометрии насадок и технологических режимов на их производительность. Были проанализированы методы изменения конфигурации элементов конструкции, способствующие увеличению интенсивности взаимодействия фаз и снижению гидравлического сопротивления. Одним из таких методов является перфорация, которая позволяет оптимизировать распределение жидкости и улучшить смачивание поверхности [13–16].

Целью данной работы являются экспериментальное исследование смачивания поверхности гофрированного элемента и проектирование насадки. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: изготовление исследуемых образцов, сборка экспериментального стенда, фотосъемка течения жидкости, получение результатов и расчет удельной величины смачивания поверхности.

Основная часть. Нами были подготовлены образцы гофрированных листов с длиной ребра образующей гофры 5, 8, 11 мм. Угол гофрирования составил 90°. Высота и ширина гофры – 100 мм. Материал, из которого изготавливалась гофра, – алюминий. Для сопоставления деталей было принято решение дополнительно изготовить три аналогичных листа, основным отличием которых стало наличие перфорации. Она выполнялась на каждой второй ступени гофры сверху (в ряд), кроме первой, которая являлась распределяющей поверхностью для жидкости. Диаметр отверстий – 3 мм. На рисунке 1 представлена модель одного из образцов гофрированного листа с перфорацией.

Экспериментальная установка состояла из резервуара с водой 1, к которому подключался центробежный насос 2, вентилей 3, ротаметра 4, трубопроводной системы 5, гофрированного листа 6, штатива 7 и камеры 8.

Принцип работы установки следующий. Вода из резервуара 1 подавалась с помощью центробежного насоса 2 по трубопроводной системе 5 через вентиль 3, который позволял регулировать расход жидкости. Вода проходила через ротаметр 4 и далее направлялась по трубе через сопло на поверхность гофрированного листа 6. Когда устанавливался режим пленочного/струйного течения жидкости, включалась камера 8, закрепленная на штативе 7.

На рисунке 2 представлена схема экспериментальной установки для исследования пленочного течения на поверхности гофрированного листа.

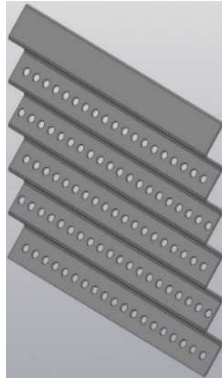
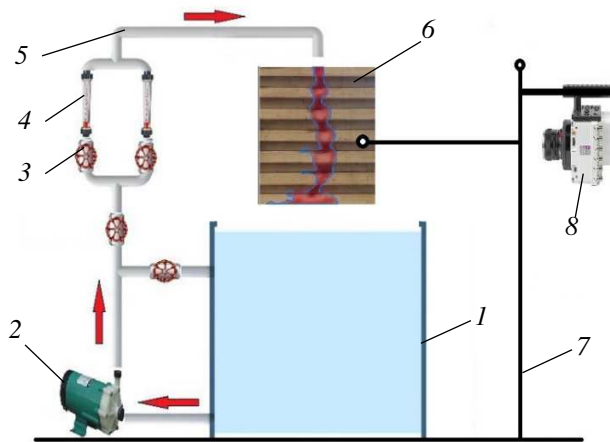


Рисунок 1. – Модель образца гофрированного листа с перфорацией



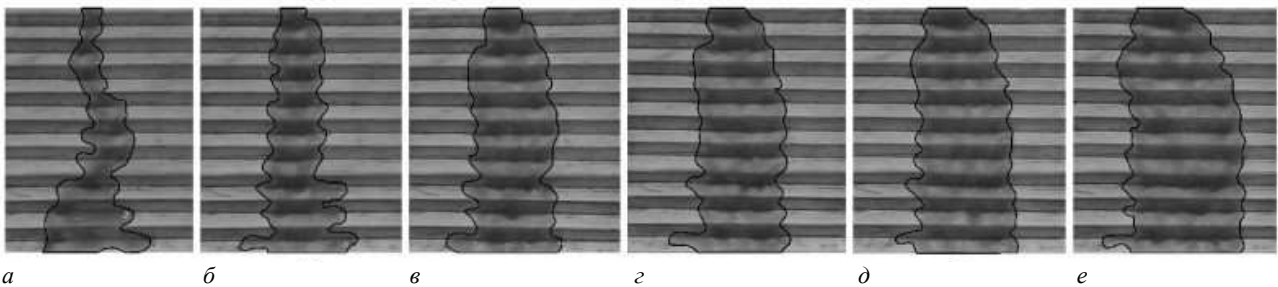
1 – резервуар; 2 – центробежный насос; 3 – вентиль; 4 – ротаметр;
5 – трубопроводная система; 6 – гофрированный лист; 7 – штатив; 8 – камера

Рисунок 2. – Схема экспериментальной установки

Экспериментальное исследование пленочного течения проводилось для диапазона расходов жидкости $Q = 0,01-0,054 \text{ м}^3/\text{ч}$.

В ходе экспериментальных исследований были получены фотографии установившегося пленочного/струйного течения для шести образцов с перфорацией и без нее, которые представлены на рисунках 3–10.

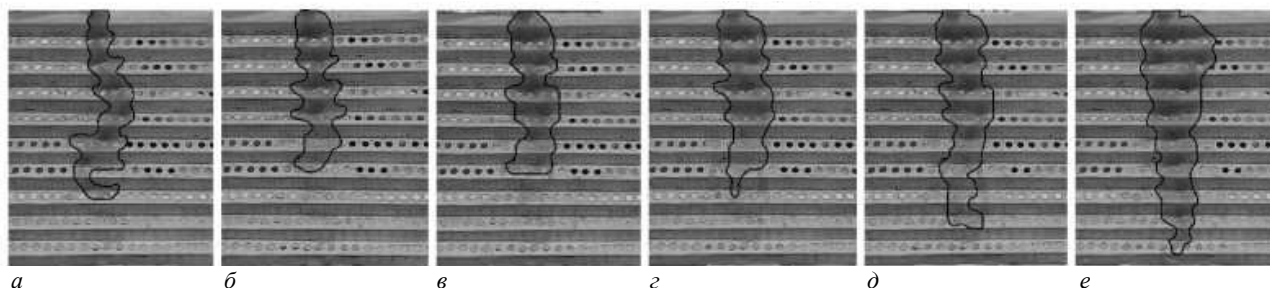
Из рисунка 3 видно, что ширина ручейка увеличивается с повышением расхода воды. При меньших расходах (рисунок 3, *а, б*) это явление наблюдается преимущественно в нижней части гофрированного листа. Также можно заметить, что ручеек имеет изогнутую траекторию движения по высоте листа (рисунок 3, *а*).



а – $0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$; *б* – $0,024 \text{ м}^3/\text{ч}$; *в* – $0,026 \text{ м}^3/\text{ч}$; *г* – $0,0324 \text{ м}^3/\text{ч}$; *д* – $0,047 \text{ м}^3/\text{ч}$; *е* – $0,054 \text{ м}^3/\text{ч}$

Рисунок 3. – Пленочное течение на гофрированном листе без перфорации и длиной образующей 5 мм

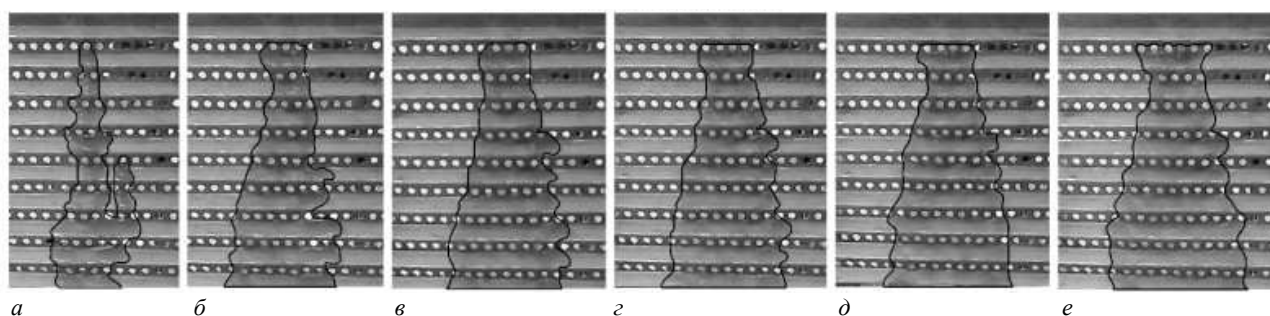
Согласно рисунку 4, ручеек не достигает края листа, что свидетельствует о его перетекании на обратную сторону. Это явление наблюдается при относительно низких расходах воды. Однако при увеличении расхода (рисунок 4, *e*) вода проходит весь путь, что указывает на более эффективное распределение жидкости по поверхности.



a – 0,01 м³/ч; *б* – 0,024 м³/ч; *в* – 0,026 м³/ч; *г* – 0,0324 м³/ч; *д* – 0,047 м³/ч; *e* – 0,054 м³/ч

Рисунок 4. – Пленочное течение на гофрированном листе с перфорацией (лицевая сторона) и длиной образующей 5 мм

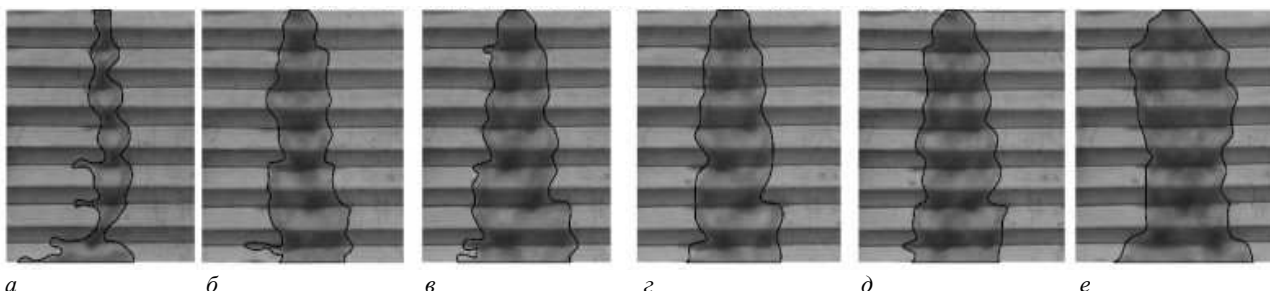
На оборотной стороне (рисунок 5) наблюдается более равномерное распределение жидкости по сравнению с лицевой. Преимущественно в нижней части листа ширина ручейка увеличивается с повышением расхода воды. Можно предположить, что из-за увеличенного перетекания воды на обратную сторону происходит стягивание части жидкости с лицевой стороны, что приводит к исчезновению течения ручейка на лицевой поверхности.



a – 0,01 м³/ч; *б* – 0,024 м³/ч; *в* – 0,026 м³/ч; *г* – 0,0324 м³/ч; *д* – 0,047 м³/ч; *e* – 0,054 м³/ч

Рисунок 5. – Пленочное течение на гофрированном листе с перфорацией (оборотная сторона) и длиной образующей 5 мм

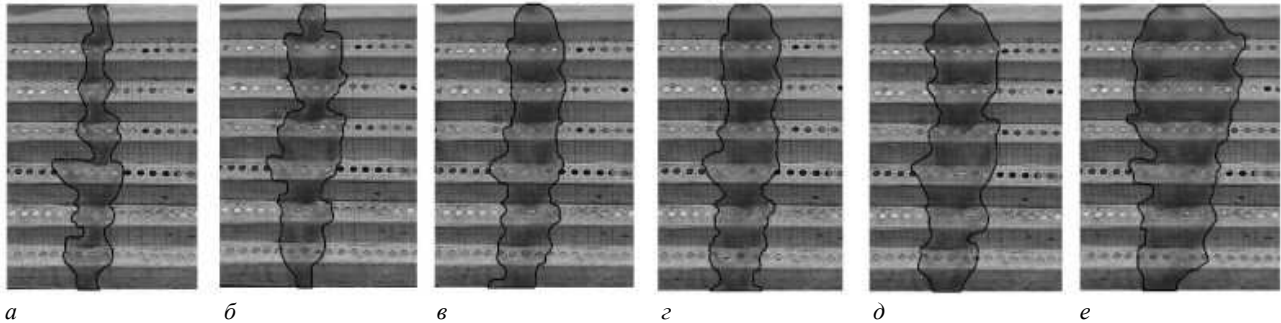
На рисунке 6 ручек ведет себя, как и на поверхности гофрированного листа с длиной образующей 5 мм. Однако следует отметить, что увеличение длины образующей уменьшает количество ступеней гофры, что ухудшает ее смачивание.



a – 0,01 м³/ч; *б* – 0,024 м³/ч; *в* – 0,026 м³/ч; *г* – 0,0324 м³/ч; *д* – 0,047 м³/ч; *e* – 0,054 м³/ч

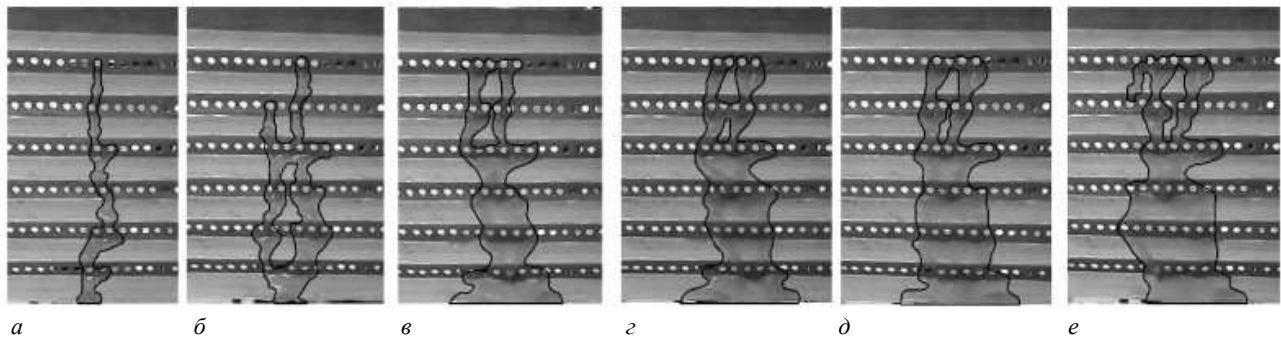
Рисунок 6. – Пленочное течение на гофрированном листе без перфорации и длиной образующей 8 мм

Из рисунков 7 и 8 видно, что распределение ручейка на лицевой стороне гофрированного листа с перфорацией лучше, чем у гофры с длиной образующей 5 мм. Здесь ручеек достигает нижнего края листа. Часть жидкости перетекает на обратную сторону, но в меньшем количестве, чем в случае с длиной образующей 5 мм. Это может быть связано с меньшим количеством ступеней и отверстий по высоте гофры.



$a - 0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$; $b - 0,024 \text{ м}^3/\text{ч}$; $в - 0,026 \text{ м}^3/\text{ч}$; $г - 0,0324 \text{ м}^3/\text{ч}$; $д - 0,047 \text{ м}^3/\text{ч}$; $e - 0,054 \text{ м}^3/\text{ч}$

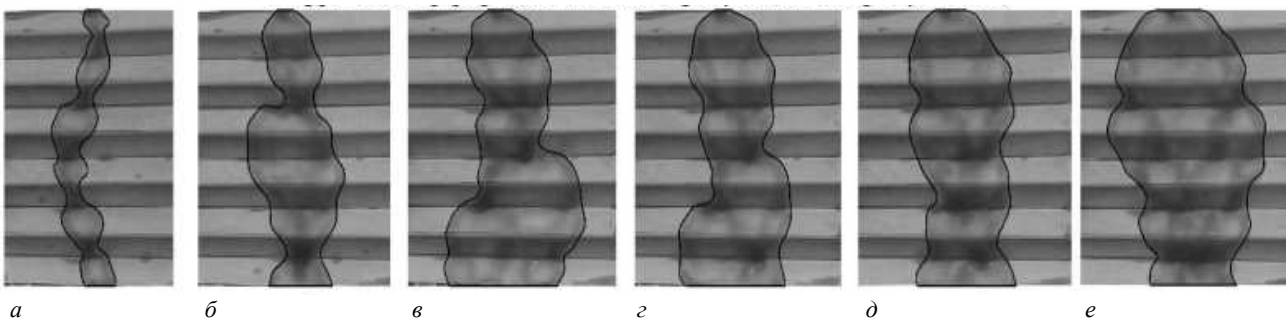
Рисунок 7. – Пленочное течение на гофрированном листе с перфорацией (лицевая сторона) и длиной образующей 8 мм



$a - 0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$; $b - 0,024 \text{ м}^3/\text{ч}$; $в - 0,026 \text{ м}^3/\text{ч}$; $г - 0,0324 \text{ м}^3/\text{ч}$; $д - 0,047 \text{ м}^3/\text{ч}$; $e - 0,054 \text{ м}^3/\text{ч}$

Рисунок 8. – Пленочное течение на гофрированном листе с перфорацией (оборотная сторона) и длиной образующей 8 мм

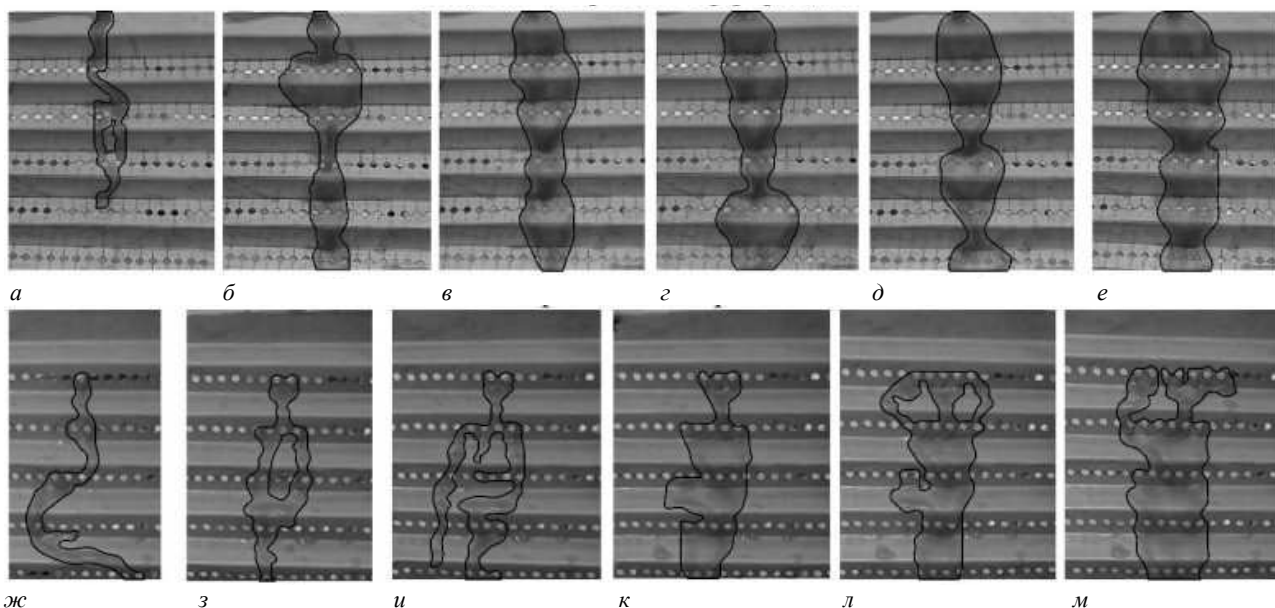
Ручеек ведет себя более нестабильно на поверхности гофрированного листа (рисунок 9) по сравнению с другими образцами. Наблюдается расширение вблизи истечения жидкости из сопла, за которым следует сужение из-за увеличения скорости потока. Это приводит к снижению смачивания поверхности в нижней части листа.



$a - 0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$; $b - 0,024 \text{ м}^3/\text{ч}$; $в - 0,026 \text{ м}^3/\text{ч}$; $г - 0,0324 \text{ м}^3/\text{ч}$; $д - 0,047 \text{ м}^3/\text{ч}$; $e - 0,054 \text{ м}^3/\text{ч}$

Рисунок 9. – Пленочное течение на гофрированном листе без перфорации и длиной образующей 11 мм

Согласно рисунку 10, увеличение размера образующей гофры ухудшает смачивание поверхности и ведет к нестабильному течению пленки/струйки с локальными разрывами.



a, ж – 0,01 м³/ч; *б, з* – 0,024 м³/ч; *в, и* – 0,026 м³/ч; *г, к* – 0,0324 м³/ч;
д, л – 0,047 м³/ч; *е, м* – 0,054 м³/ч

Рисунок 10. – Пленочное течение на гофрированном листе с перфорацией и длиной образующей 11 мм

На основании полученных фотографий были определены границы пленочного и струйного течения. Для смоченной поверхности рассчитывалась удельная величина в процентном соотношении.

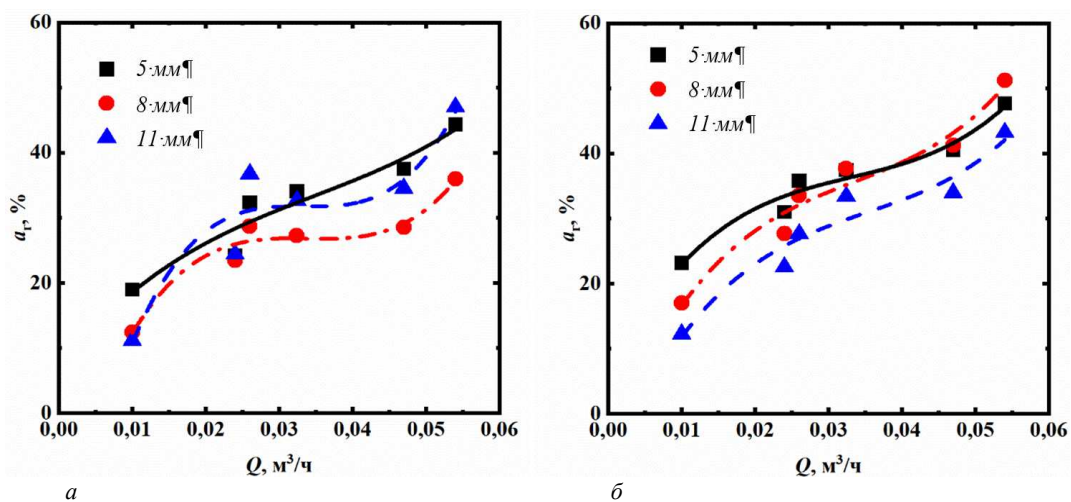
Удельная величина смоченной поверхности гофрированного листа a_r определялась как

$$a_r = \frac{S_{см}}{S_{сух}} \cdot 100\%, \tag{1}$$

где $S_{сух}$, $S_{см}$ – площадь сухой и смоченной поверхности одной из стороны гофрированного листа, м², соответственно [9].

На основании (1) были выполнены расчеты и построены графические зависимости изменения удельной величины смоченной поверхности гофрированного листа от расхода жидкости.

На рисунке 11 представлена графическая зависимость изменения удельной величины смоченной поверхности от расхода воды для все образцов.

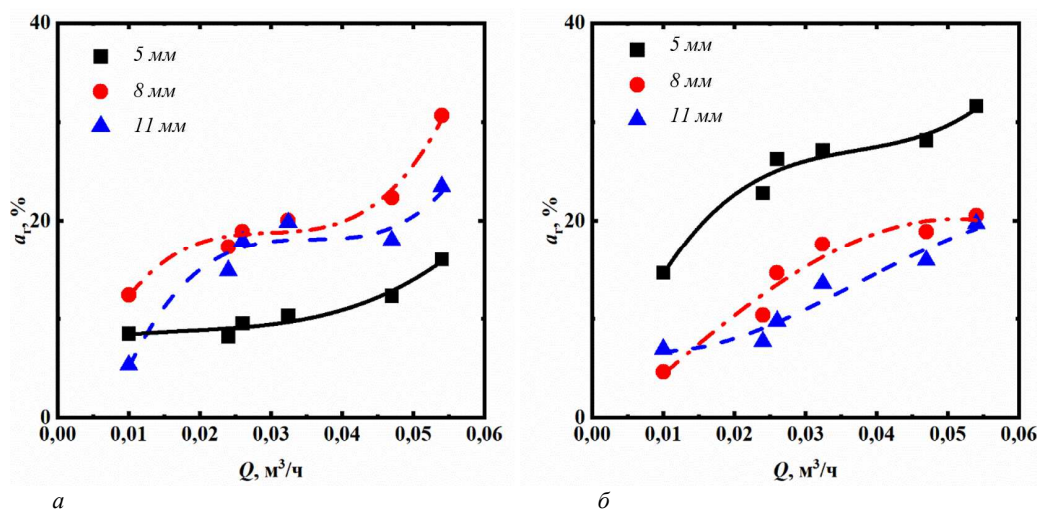


***a* – без перфорации; *б* – с перфорацией**

Рисунок 11. – Изменение удельной величины смоченной поверхности a_r от расхода жидкости Q , м³/ч, для гофрированных листов

На рисунке 11, *a* видно, что смачивание поверхностей с разной длиной образующей различается. Для сторон 8 и 11 мм изменение зависимости схоже, но отличается по величине. Для образующей длиной 5 мм наблюдается линейная зависимость, что обусловлено большим количеством ступеней, формирующих гофру, которые равномерно распределяют поток воды. Исследование листов с перфорацией (см. рисунок 11, *б*) показало, что наибольшим значением обладает гофрированный лист с длиной образующей 5 мм. Зависимости для образующих 5 мм и 8 мм сходятся после значения расхода 0,03 м³/ч и далее имеют идентичные показатели на оставшемся промежутке изменения расходов. По сравнению с зависимостями для гофрированных листов без перфорации, которые представлены на рисунке 11, *a*, видно, что перфорация позволяет увеличить удельную величину смачивания преимущественно для размера образующей канала 8 мм. Для двух других образцов зависимости отличаются незначительно.

На рисунке 12 представлены графические зависимости изменения удельной величины смоченной поверхности от расхода воды на лицевой и оборотной сторонах для гофрированных листов с перфорацией.



a – лицевая сторона; *б* – оборотная сторона

Рисунок 12. – Изменение удельной величины смоченной поверхности a_r от расхода жидкости Q , м³/ч, для лицевой и оборотной сторон гофрированных листов с перфорацией

Согласно рисунку 12, *a*, для размера образующей гофру 5 мм смачивание лицевой стороны, как отмечалось выше на фотографиях, хуже. Это связано с большим числом перфорированных отверстий и перетеканием воды на оборотную сторону. Для образцов с длиной образующей 8 и 11 мм зависимости похожи. Однако для размера 8 мм удельная величина смоченной поверхности выше на всем промежутке.

Наилучшее смачивание по оборотной стороне гофрированных листов достигается для размера образующей гофру 5 мм (см. рисунок 12, *б*). Для двух других образцов зависимости пересекаются и не существенно отдаляются друг от друга.

На основании полученных графических зависимостей и проделанного анализа можно подытожить, что наиболее предпочтительным для дальнейшего проектирования насадки является образец с перфорацией гофрированного листа и длиной образующей 8 мм. Здесь стало очевидным, что увеличение отверстий ухудшает смачивание лицевой поверхности.

Для проектирования регулярно-структурированной насадки необходимо задаться необходимыми геометрическими характеристиками. К ним относятся: удельная поверхность насадки a_n , м²/м³; удельный свободный объем ε , м³/м³, занимаемый насадкой; диаметр колонны $d_k = 0,15$ м.

Известно, что высота, ширина и толщина перфорированного гофрированного листа с длиной образующей 8 мм и оптимальными результатами смачивания поверхности по данным эксперимента 100, 100 и 1 мм, поэтому высоту насадки примем такой же.

Из [13–16] было определено, что удельная поверхность насадок варьируется в пределах $a_n = 64–750$ м²/м³, поэтому для этого диапазона рассчитаем минимальную плотность орошения U_{\min} , м³/(м² · ч), гидравлическое сопротивление Δp , Па/м, и скорость захлебывания w_z , м/с. Для дальнейшего проектирования возьмем две величины удельной поверхности из нашего диапазона, а именно: 250, 400 м²/м³.

Определим объем насадки $V_{з.н.}$, м³, занимаемый насадкой:

$$V_{з.н.} = h_n \cdot \frac{\pi \cdot d_n^2}{4}, \quad (2)$$

где h_n – высота насадки, м;

d_n – диаметр насадки, м;

Объем и площадь насадочного тела равны $V_n = 0,0000126 \text{ м}^3$, $S_n = 0,044 \text{ м}^2$.

Зная необходимую удельную поверхность, определим количество насадочных тел n , шт, в насадке:

$$n = \frac{a_n \cdot V_{з.н.}}{S_n} \quad (3)$$

Удельный свободный объем, занимаемый гофрированным листом ε , $\text{м}^3/\text{м}^3$, определим по формуле

$$\varepsilon = 1 - \frac{n \cdot V_n}{V_{з.л.}} \quad (4)$$

Определим из рисунка 11, б удельную смоченную поверхность гофрированного листа при расходах жидкости $Q = 0,01; 0,032; 0,054 \text{ м}^3/\text{ч}$, получим $a_r = 0,17; 0,38; 0,51 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Плотность орошения U , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

$$U = Q / 0,785 \cdot d_k^2, \quad (5)$$

где Q – объемный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$;

d_k – диаметр колонны, м.

Если при заданном значении U величина a_r близка к единице, расчет заканчивают. Если меньше – то смачивание считают неудовлетворительным. В этом случае повышают U с пересчетом скорости захлебывания.

По формуле (5) получены три плотности орошения $U = 0,566; 1,812; 3,057 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Определим расход жидкости, необходимый для полного смачивания гофрированного листа. Для этого используем расход, при котором происходит максимальное смачивание, и с помощью пропорции найдем полное.

$$Q_{п.г.} = \frac{0,054}{0,51} = 0,106 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Тогда минимальная плотность орошения для полного смачивания всей поверхности насадки по формуле (5) будет равна $6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Для проектируемых нами насадок расходы буду равны.

Эквивалентный диаметр насадки определяется как

$$d_{э.кв.} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a_n} \quad (6)$$

В таблице представлены геометрические параметры для проектируемых насадок.

Таблица – Геометрические параметры проектируемой насадки

Геометрическая характеристика насадки	Насадка 250	Насадка 400
$V_{з.н.}, \text{м}^3$	0,0018	
n , шт	10	16
ε	0,929	0,886
$d_{э.кв.}$	0,014	0,013

Гидравлическое сопротивление без орошения жидкостью насадочного абсорбера можно определить по формуле (7) [17]:

$$\Delta p_{сух} = \frac{H_{нас} \cdot \xi_0 \cdot w_r^2 \cdot \rho_r \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3}, \quad (7)$$

где $H_{нас}$ – высота насадки, м;

ξ_0 – эффективный коэффициент трения;

w_r – средняя скорость газа в колонне, м/с;

ρ_r – плотность газовой смеси при рабочих условиях, $\text{кг}/\text{м}^3$ [17].

Для расчета гидравлического сопротивления используем данные, полученные ранее [13–16], и определим эффективный коэффициент трения ξ_0 . Подставив все известные данные в уравнение (7), рассчитаем гидравлическое сопротивление при скоростях газа в диапазоне 0–3 м/с.

В результате расчетов получены графические зависимости гидравлического сопротивления без орошения от скорости газа для насадок с зигзагообразной формой каналов 250 и 400 м²/м³ (рисунок 13).

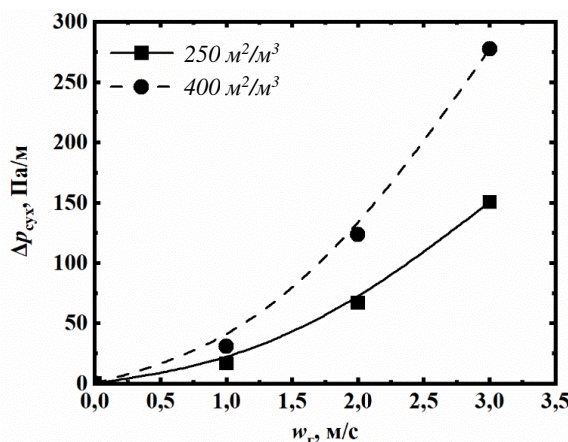


Рисунок 13. – Изменение гидравлического сопротивления для насадок зигзагообразной формы без орошения жидкостью

Из рисунка 13 видно, что гидравлическое сопротивление у насадки с удельной поверхностью 400 м²/м³ выше, чем у насадки 250 м²/м³.

Полученные зависимости позволяют определить необходимое количество мощности для преодоления сопротивления газом и осуществить корректный подбор воздухоподогревателя.

Заключение. В результате проведенного исследования смачивания гофрированных листов, используемых в регулярных структурированных насадках, были сделаны выводы, касающиеся их гидродинамических характеристик. Перфорация гофрированных элементов была определена как ключевой фактор, способствующий улучшению смачивания и равномерному распределению жидкости по поверхности. Это, в свою очередь, ведет к повышению интенсивности взаимодействия фаз, что критически важно для оптимизации процессов разделения в химической промышленности.

Однако, несмотря на положительные результаты, следует отметить ряд ограничений и недостатков данного исследования. Во-первых, эксперименты проводились в контролируемых условиях, что может не полностью отражать реальную работу насадок в промышленных условиях, где влияние множества факторов, таких как температура, давление и состав рабочей жидкости, может значительно варьироваться. Во-вторых, влияние перфорации на долговечность и устойчивость гофрированных листов требует дальнейшего изучения, поскольку увеличение числа отверстий может ослабить конструкцию и привести к механическим повреждениям.

Также важно подчеркнуть, что выбор оптимальных геометрических параметров, таких как длина образующей, не всегда является универсальным. Рекомендуется провести дополнительные исследования, направленные на анализ влияния различных геометрий и конфигураций на эффективность смачивания в разных условиях эксплуатации.

Таким образом, данное исследование подтверждает значимость регулярных структурированных насадок и их оптимизации для повышения эффективности процессов в химической промышленности. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований и разработок, направленных на создание более эффективных и надежных насадок, способных справляться с растущими требованиями современных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Croce G., Suzzi N. Instability of a Film Falling Down a Bounded Plate and Its Application to Structured Packing // Fluids. – 2025. – Vol. 10, No. 2. – P. 30. DOI: 10.3390/fluids10020030
2. Suzzi N., Croce G. Numerical Simulation of Rivulet Build Up via Lubrication Equations // J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – Vol. 923, No. 1. – P. 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/923/1/012020
3. Studying the process of freons mixture separation on a structured packing Sultzer 500X / A. Pavlenko, V. Zhukov, N. Pecherkin et al. // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 258. – P. 11008. DOI: 10.1051/e3sconf/202125811008
4. Mazarei Sotoodeh M., Zivdar M., Rahimi R. CFD Simulation of Dry and Wet Pressure Drops and Flow Pattern in Catalytic Structured Packings // Journal of Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 51, No. 1. – P. 27–37. DOI: 10.22059/jchpe.2017.62163
5. Experimental and numerical study of mass transfer efficiency in new wire gauze with high capacity structured packing / Y. Amini, J. Karimi-Sabet, M. Nasr Esfahany et al. // Separation Science and Technology. – 2018. – Vol. 54, No. 1. – P. 1–12. DOI: 10.1080/01496395.2018.1549076

6. Experimental Investigation of Pressure Drop, Liquid Hold-Up and Mass Transfer Parameters in a 0.5 m Diameter Absorber Column / A. Zakeri, A. Einbu, P.O. Wiig et al. // *Energy Procedia*. – 2011. – Vol. 4. – P. 606–613. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.01.095
7. Haroun Y., Raynal L. Use of Computational Fluid Dynamics for Absorption Packed Column Design // *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*. – 2015. – Vol. 71, No. 3. – P. 1–18. DOI: 10.2516/ogst/2015027
8. Marcelo H.B. Gas absorption experiments in a pilot plant column with the Sulzer structured packing Mellapak. – Lausanne: EPFL, 1992. – 276 p. DOI: 10.5075/epfl-thesis-984
9. Smutek J., Isoz M. Numerical Simulation of Flow in Superpak Family Packings // *Proceedings of the TPFM Conference*. – 2018. – P. 257–264. DOI: 10.14311/TPFM.2018.035
10. Isoz M. CFD Study of Gas Flow Through Structured Separation Columns Packings Mellapak 250.X and Mellapak 250.Y // *Proceedings of the TPFM Conference*. – 2017. – P. 171–184. DOI: 10.14311/TPFM.2017.023
11. Novikova I., Pushnov A. New Structured Packing CUB for Purification of Exhaust Gases // *Mokslas – Lietuvos Ateitis / Science – Future of Lithuania*. – 2016. – Vol. 8, No. 4. – P. 438–442. DOI: 10.3846/mla.2016.954
12. Minimal Surfaces as Constant-Energy Surfaces for Maximum Heat and Mass Transfer Efficiency in Structured Packing of the Distillation Column / I.A. Arkharov, A.M. Arkharov, E.S. Navasardyan et al. // *Journal of Enhanced Heat Transfer*. – 2018. – Vol. 25, No. 2. – P. 143–159. DOI: 10.1615/JEnhHeatTransf.2018026639
13. Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е. Гидравлическое сопротивление регулярных насадок массообменных аппаратов // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки*. – 2020. – № 8. – С. 33–38.
14. Вайтехович П.Е., Мытько Д.Ю. Сравнительный анализ эффективности регулярных насадок для массообменных аппаратов // *Тр. БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнологии, геоэкология*. – 2020. – № 2(235). – С. 44–49.
15. Вайтехович П.Е., Мытько Д.Ю. Технично-экономическое обоснование и выбор оптимальной насадки // *Тр. БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнологии, геоэкология*. – 2021. – № 1(241). – С. 69–73.
16. Вайтехович П.Е., Мытько Д.Ю., Волк А.М. Влияние геометрических параметров регулярной структурированной насадки на гидродинамику и массообмен // *Тр. БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнологии, геоэкология*. – 2021. – № 2(247). – С. 67–71.
17. Рамм, В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. – 656 с.

REFERENCE

1. Croce, G. & Suzzi, N. (2025). Instability of a Film Falling Down a Bounded Plate and Its Application to Structured Packing. *Fluids*, 10(2), 30. DOI: 10.3390/fluids10020030
2. Suzzi, N. & Croce, G. (2017). Numerical Simulation of Rivulet Build Up via Lubrication Equations. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 923(1), 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/923/1/012020
3. Pavlenko, A., Zhukov, V., Pecherkin, N., Slesareva, E., Boyadjiev, C. & Dzhonova-Atanasova, D. (2021). Studying the process of freons mixture separation on a structured packing Sulzer 500X. *E3S Web of Conferences*, (258), 11008. DOI: 10.1051/e3sconf/202125811008
4. Mazarei Sotoodeh, M., Zivdar, M. & Rahimi, R. (2017). CFD Simulation of Dry and Wet Pressure Drops and Flow Pattern in Catalytic Structured Packings. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 51(1), 27–37. DOI: 10.22059/jchpe.2017.62163
5. Amini, Y., Karimi-Sabet, J., Nasr Esfahany, M., Haghshenasfard, M. & Dastbaz, A. (2018). Experimental and numerical study of mass transfer efficiency in new wire gauze with high capacity structured packing. *Separation Science and Technology*, 54(4), 614–623. DOI: 10.1080/01496395.2018.1549076
6. Zakeri, A., Einbu, A., Wiig, P.O., Øi, L. E. & Svendsen, H.F. (2011). Experimental Investigation of Pressure Drop, Liquid Hold-Up and Mass Transfer Parameters in a 0.5 m Diameter Absorber Column. *Energy Procedia*, (4), 606–613. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.01.095
7. Haroun, Y. & Raynal, L. (2015). Use of Computational Fluid Dynamics for Absorption Packed Column Design. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 70(4), 667–678. DOI: 10.2516/ogst/2015027
8. Marcelo, H.B. (1992). *Gas absorption experiments in a pilot plant column with the Sulzer structured packing Mellapak*. Lausanne: EPFL. DOI: 10.5075/epfl-thesis-984
9. Smutek, J. & Isoz, M. (2018). Numerical Simulation of Flow in Superpak Family Packings. *Proceedings of the TPFM Conference*, (257–264). DOI: 10.14311/TPFM.2018.035
10. Isoz, M. (2017). CFD Study of Gas Flow Through Structured Separation Columns Packings Mellapak 250.X and Mellapak 250.Y. *Proceedings of the TPFM Conference*, (171–184). DOI: 10.14311/TPFM.2017.023
11. Novikova, I. & Pushnov, A. (2016). New Structured Packing CUB for Purification of Exhaust Gases. *Mokslas – Lietuvos Ateitis / Science – Future of Lithuania*, 8(4), 438–442. DOI: 10.3846/mla.2016.954
12. Arkharov, I.A., Arkharov, A.M., Navasardyan, E.S. & Dontzov, A.V. (2018). Minimal Surfaces as Constant-Energy Surfaces for Maximum Heat and Mass Transfer Efficiency in Structured Packing of the Distillation Column. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 25(2), 143–159. DOI: 10.1615/JEnhHeatTransf.2018026639
13. Мытько, Д.Ю. & Вайтехович, П.Е. (2020). Гидравлическое сопротивление регулярных насадок массообменных аппаратов [Hydraulic Resistance of Regular Attachments of Mass Exchange Devices]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, (8), 33–38. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Вайтехович, П.Е. & Мытько, Д.Ю. (2021). Сравнительный анализ эффективности регулярных насадок для массообменных аппаратов [Comparative Analysis of the Effectiveness of Regular Attachments for Mass Transfer Devices]. *Trudy BGTU*.

- Seriya 2, Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geokologiya [Proceedings of BSTU. Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology]*, 2(235), 44–49. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Vaitekhovich, P.E. & Myt'ko, D.Yu. (2021). Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie i vybor optimal'noi nasadki [Technical and economic comparison and selection of the optimal nozzle]. *Trudy BGTU. Seriya 2, Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geokologiya [Proceedings of BSTU. Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology]*, 1(241), 69–73. (In Russ., abstr. in Engl.).
 16. Vaitekhovich, P.E., Myt'ko, D.Yu. & Volk, A.M. (2021). Vliyanie geometricheskikh parametrov regul'yarnoi strukturirovanoi nasadki na gidrodinamiku i massoobmen [Influence of Geometric Parameters of Regular Structured Packing on Hydrodynamics and Mass Transfer]. *Trudy BGTU. Seriya 2, Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geokologiya [Proceedings of BSTU. Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology]*, 2(247), 67–731 (In Russ., abstr. in Engl.).
 17. Ramm, V.M. (1976) *Absorbtsiya gazov [Absorption of Gases]*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)

Поступила 01.10.2024

STUDY OF WETTING OF THE SURFACE OF A REGULAR STRUCTURED PACKING ELEMENT

D. MYTSKO, YA. YANG, X. ZHAO, ZH. SUN
(Belarusian State Technological University, Minsk)

This work presents a study of the wetting of the surface of elements of regular structured packing used in phase separation processes in the chemical industry. Regular structured packings are known for their high throughput and mass transfer efficiency, making them important for optimizing processes. The experiments assessed the influence of geometric characteristics of corrugated sheets, such as the length of the generating line and the presence of perforation, on the efficiency of wetting and hydrodynamic parameters. The results showed that perforation of the corrugated elements significantly improves wetting, promoting uniform distribution of the liquid over the surface and increasing the intensity of phase interactions.

Based on the obtained data, the optimal size of the generating corrugation was determined. In particular, a generating size of 8 mm was recognized as the most effective and was used for designing two types of packings with specific surfaces of 250 m²/m³ and 400 m²/m³. The results are of significant practical importance and can be used for the development of more efficient equipment in the chemical industry, which in turn contributes to improved performance and reduced costs.

Keywords: wetting, corrugated sheets, perforation, regular structured packing, hydrodynamics, hydraulic resistance, packing design, chemical industry.

УДК 66.021.3

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-107-112

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НАСАДОК
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АБСОРБЦИИ**

Р.И. ЛАНКИН, канд. техн. наук, доц. **В.С. ФРАНЦКЕВИЧ**, канд. техн. наук, доц. **А.М. ВОЛК**
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Развитие промышленности, вызванное увеличением объемов производства, приводит к росту выбросов промышленных отходящих газов, содержащих вредные вещества, негативно влияющие на окружающую среду и здоровье людей. В химической и других отраслях промышленности активно используются насадочные колонны, которые играют ключевую роль в массо- и теплообменных процессах, таких как абсорбция, ректификация и экстракция. Особое внимание уделяется аппаратам с подвижной (псевдооживленной) насадкой, которые обеспечивают высокую эффективность благодаря улучшенному распределению потоков и увеличению площади контакта между фазами. В данной статье описывается запатентованный элемент насадки для массообмена, разработанный с учетом современных требований к эффективности и экологической безопасности. Также представлен способ расположения впадин на поверхности шарового элемента, который оптимизирует распределение потока и увеличивает площадь обмена. Исследуется толщина водяной пленки на поверхности шара, что важно для эффективности массообменного процесса. Результаты исследования могут значительно повлиять на проектирование и эксплуатацию массообменных аппаратов в различных отраслях.

Ключевые слова: абсорбция, насадка, подвижная насадка, расположение впадин, площадь поверхности, водяная пленка, массообмен, гидравлическое сопротивление.

Введение. В настоящее время развитие промышленности наряду с резким подъемом объемов производства сопровождается возрастанием выбросов в атмосферу промышленных отходящих газов. Строящиеся заводы создаются на основе мощных единичных технологических систем и высокоэффективных аппаратов. Очистка отходящих промышленных газов должна обеспечить утилизацию ценных компонентов, которые находятся в них, и охрану окружающей среды от загрязнения. Обычно на очистку поступает большой объем газов, и при этом требуется высокая степень извлечения компонентов [1; 2].

В химической промышленности, как и в других отраслях, часто используются насадочные колонны для процессов массо- и теплообмена при абсорбции, ректификации и экстракции, в т.ч. для охлаждения газов и жидкостей. В большинстве случаев данные процессы происходят в противоточных потоках газовой и жидкой фаз. Насадочные колонны относятся к группе массообменных установок, жидкость в которых под действием силы тяжести стекает через неупорядоченную или структурированную насадку в виде пленки либо капель [3; 4].

Наиболее часто применяются насадочные абсорберы с подвижной насадкой, пригодной для работы в условиях агрессивной и коррозионной сред, при наличии жидкостей, склонных к вспениванию, при высоких соотношениях жидкость–газ, при наличии твердых включений в жидкой фазе, а также в тех случаях, когда важно низкое гидравлическое сопротивление установки [5; 6].

Подвижная насадка в абсорбционном аппарате играет роль дробящего и турбулизирующего устройства для жидкой фазы и объемного барботера для газовой фазы. Она характеризуется тем, что может работать в значительном интервале плотностей орошения ($1\text{--}200\text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$). Преимуществом таких конструкций является способность к самоочищению насадок, стенок колонны и опорно-распределительных решеток от осадка в процессе эксплуатации, что позволяет функционировать такому слою с кристаллизующимися, загипсовывающимися и закоксовывающимися растворами [7–9].

В абсорбционных аппаратах с подвижной насадкой насадочные тела поддерживаются за счет газовой фазы в псевдооживленном (кипящем) состоянии. В качестве насадочных тел могут использоваться сплошные или полые шары из полиэтилена, пенополистерола, полипропилена и других полимерных материалов. Положение шаров фиксируется опорной и ограничительной решетками. Опорная (нижняя) решетка необходима для поддержания насадки, а ограничительная (верхняя) – предотвращает унос насадки из аппарата [9; 10].

В аппаратах увеличение эффективности процессов массообмена создается псевдооживлением насадочных тел. Жидкость, поступающая в аппарат, формирует пленку, обтекающую поверхность насадочных тел, или с большими скоростями газа включается в состав барботажного слоя газа и жидкости, или находится в виде струй и капель, распределенных в газе [11]. В слое насадки направление движения и длина пути каждого элемента носит случайный характер [2].

Важной задачей изучения процесса массообмена является создание простой и надежной конструкции элемента насадочных массо- и теплообменных колонн, обеспечивающей увеличение эффективной поверхности массообмена за счет пленочного течения жидкости по поверхности элемента, снижение гидравлического сопротивления путем изменения профиля поверхности межфазного контакта жидкость–газ.

Проблема равномерного распределения точек на поверхностях имеет значение для различных фундаментальных и прикладных исследований. Она важна для таких научных направлений и групп методов, как статистическое и имитационное математическое моделирование¹.

Для равномерного распределения точек на плоскости, во-первых, можно помещать их в узлах координатной сетки. Во-вторых, можно генерировать независимо друг от друга две координаты (работая в декартовой системе координат), используя генератор случайного числа (ГСЧ) с равномерным распределением на заданных интервалах. Оба способа являются самыми простыми в использовании и наиболее распространенными.

Поскольку равномерно распределять точки на плоскости представляется несложным, то, соответственно, можно получить равномерное распределение точек на разгибающихся поверхностях (поверхностях нулевой гауссовой кривизны) путем применения соответствующих преобразований поверхностей.

Намного сложнее дело обстоит с задачей равномерного распределения точек на поверхности сферы и в целом на поверхностях ненулевой гауссовой кривизны.

Наиболее полно проблема равномерного распределения точек на поверхностях представляется при рассмотрении частного случая задачи – проблемы равномерного распределения точек на поверхности сферы.

Основная часть. Насадка для массообменных процессов представляет собой сплошную сферу, в которой расположены впадины в форме полусфер, количество которых зависит от величины диаметра шара, измеряемого в миллиметрах. Глубина таких впадин варьируется в пределах 0,08–0,095 от диаметра шара, также измеряемого в миллиметрах, расстояние между ними – 0,3–0,7 диаметра впадин².

При обтекании насадочного тела газом пограничные слои наблюдаются на всей поверхности шара, а впадины задерживают отделение пограничных газовых слоев. Это способствует уменьшению вихревой зоны за сферой, а, следовательно, и снижению гидравлического сопротивления. Как показали проведенные исследования, в предложенной насадке гидравлическое сопротивление в 1,5–2 раза меньше, по сравнению с гладким шаром такого же диаметра. Кроме того, в шаре со впадинами на 50% увеличивается поверхность контакта фаз².

В исследуемой конструкции для увеличения площади контакта жидкой фазы с газом в качестве насадок использовались шары с впадинами запатентованной конструкции². Предложенный элемент насадки представлен на рисунке 1.

Важной задачей стало выявление способа равномерного расположения впадина на поверхности шара. Для определения мест расположения впадин на шаре применялась сферическая система координат (рисунок 2).

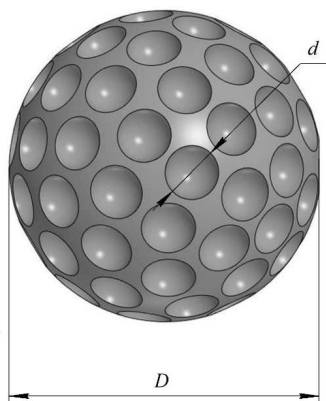


Рисунок 1. – Шар со впадинами

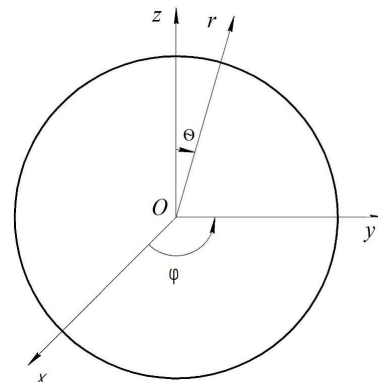


Рисунок 2. – Схема сферической системы координат

При распределении впадин было выбрано 9 уровней, через каждые $\pi/8$ рад. На I уровне координаты, на которых располагаются впадины, будут записаны следующим образом:

$$r = R \quad \theta = 0 \quad \varphi = 0.$$

На II уровне:

$$r = R \quad \theta = \frac{\pi}{8} \quad \varphi = \frac{\pi}{6} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 5.$$

¹ Копытов, Н.П. Равномерное распределение точек на поверхностях и его применение в исследованиях структурно-неоднородных сред: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Н.П. Копытов. – Екатеринбург, 2015. – 121 л.

² Насадка для массообменных процессов: полез. модель № 20230256 ВУ 13477, МПК В 01J 19/30 (2006.01) / В.С. Францкевич, Р.И. Ланкин. – Опубл. 20.05.2024.

Аналогично запишем для III–IX уровней:

$$\begin{aligned}
 r = R \quad \theta = \frac{\pi}{4} \quad \varphi = \frac{\pi}{11} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 10. \\
 r = R \quad \theta = \frac{3 \cdot \pi}{8} \quad \varphi = \frac{\pi}{14} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 13. \\
 r = R \quad \theta = \frac{\pi}{2} \quad \varphi = \frac{\pi}{15} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 14. \\
 r = R \quad \theta = \frac{5 \cdot \pi}{8} \quad \varphi = \frac{\pi}{14} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 13. \\
 r = R \quad \theta = \frac{3 \cdot \pi}{4} \quad \varphi = \frac{\pi}{11} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 10. \\
 r = R \quad \theta = \frac{7 \cdot \pi}{8} \quad \varphi = \frac{\pi}{6} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 5. \\
 r = R \quad \theta = \pi \quad \varphi = 0.
 \end{aligned}$$

Площадь шара вычисляется по формуле

$$S = 4 \cdot \pi \cdot R^2. \tag{1}$$

Найдем площадь шара со впадинами (рисунок 3).

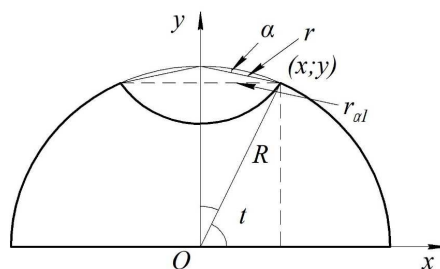


Рисунок 3. – Сечение шара с впадиной

Найдем координаты точки (x, y) пересечения шаров в декартовой системе координат:

$$\begin{cases}
 x^2 + y^2 = R^2, \\
 x^2 + (y - R)^2 = r^2.
 \end{cases} \tag{2}$$

Вычитаем уравнения системы (2)

$$y^2 - (y - R)^2 = R^2 - r^2. \tag{3}$$

Откуда получим

$$2Ry = 2R^2 - r^2. \tag{4}$$

Выразим y

$$y = \frac{2R^2 - r^2}{2R}. \tag{5}$$

Запишем параметрическое уравнение окружности (рисунок 3)

$$\begin{cases}
 x = R \cos t, \\
 y = R \sin t.
 \end{cases} \tag{6}$$

Подставим y в (5) и выразим $\sin t$

$$\sin t = \frac{2R^2 - r^2}{2R^2}. \tag{7}$$

Выразим t

$$t = \arcsin \left(\frac{2R^2 - r^2}{2R^2} \right). \tag{8}$$

Площадь поверхности вращения вычисляется по формуле

$$S_{Oy} = \int_{\alpha}^{\beta} 2\pi x dl. \quad (9)$$

Длина дуги будет

$$dl = \sqrt{(x'_t)^2 + (y'_t)^2} dt = R dt. \quad (10)$$

Получаем площадь поверхности шара, вырезанной одним элементом одним элементом

$$S_{Oy} = \int_t^{\frac{\pi}{2}} 2\pi R \cos t \cdot R dt = 2\pi R \sin t \left| \begin{array}{l} \frac{\pi}{2} \\ \arcsin\left(\frac{2R^2 - r^2}{2R^2}\right) \end{array} \right. = 2\pi R^2 \left(1 - \frac{2R^2 - r^2}{2R^2}\right) = \pi r^2. \quad (11)$$

Вычисляем площадь поверхности одной впадины:

$$\frac{R - y}{r} = \sin \alpha. \quad (12)$$

$$y = \frac{2R^2 - r^2}{2R^2}. \quad (13)$$

$$\frac{R - \frac{2R^2 - r^2}{2R^2}}{r} = \sin \alpha. \quad (14)$$

$$\frac{r}{2R} = \sin \alpha. \quad (15)$$

$$S_{Oy} = 2\pi \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} 2 \cos t r dt = 2\pi r^2 \sin t \left| \begin{array}{l} \frac{\pi}{2} \\ \alpha \end{array} \right. = 2\pi r \left(1 - \sin \alpha\right) = 2\pi r^2 \left(1 - \frac{r}{2R}\right). \quad (16)$$

Увеличение площади шара с учетом одного элемента

$$S - S_1 = 2\pi r^2 \left(1 - \frac{r}{2R}\right) - \pi r^2 = \pi r^2 \left(2 - \frac{r}{R} - 1\right) = \pi r^2 \left(1 - \frac{r}{R}\right). \quad (17)$$

Получим общее увеличение площади шара

$$S_O = \pi r^2 \left(1 - \frac{r}{R}\right) \cdot n. \quad (18)$$

Общая площадь поверхности шара будет

$$S_{\text{общ}} = 4\pi R^2 + \pi r^2 \left(1 - \frac{r}{R}\right) \cdot n. \quad (19)$$

Данная зависимость будет учитываться в дальнейшем при исследовании процесса массообмена в колонне с запатентованным видом шаровой насадки.

Шар, с которым были проведены экспериментальные исследования по вычислению толщины водяной пленки на единичном элементе (шаре со впадинами), с описанными выше параметрами был распечатан на 3D-принтере. Изучение толщины пленки важно для проведения процесса массообмена. Суть эксперимента заключалась во взвешивании шара до и после погружения в жидкость, что позволило количественно оценить взаимодействие шара с жидкой средой и измерить толщину водяной пленки, образующейся на его поверхности.

Перед началом эксперимента шары, использовавшиеся в качестве насадок, были тщательно подготовлены. Их поверхность была очищена для минимизации влияния загрязнений на результаты взвешивания.

Взвешивание проводилось в два этапа:

– шар помещался на весы, и фиксировалась его масса в сухом состоянии. Это значение записывалось для дальнейших расчетов;

– затем шар аккуратно погружался в заранее подготовленную жидкость, после чего снова взвешивался. Этот шаг позволял измерить массу шара с прилипшей к нему жидкостью.

Разность между массой шара до и после погружения позволила определить количество жидкости, которая прилипла к его поверхности. Результаты были представлены на рисунке 4, где графически отображены изменения массы.

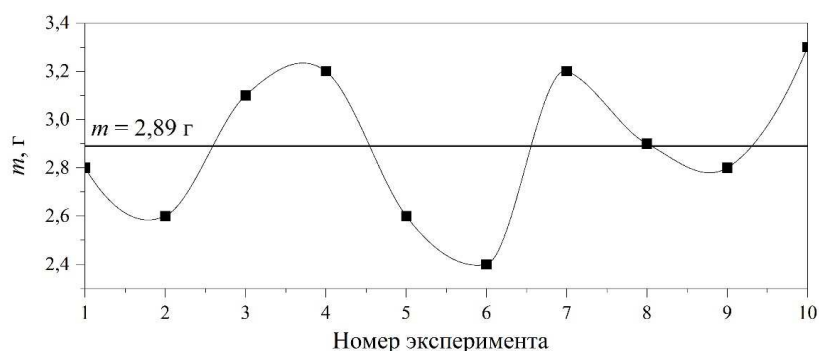


Рисунок 4. – Результаты экспериментального исследования

В ходе серии испытаний средняя разность масс шара до и после погружения составляла $m = 2,89$ г. Используя эту массу и плотность воды ($\rho = 1000$ кг/м³), найдем объем жидкости, который остался на шаре (так называемая пленка):

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{1000} = 2,89 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (20)$$

Толщина пленки δ рассчитывалась следующим образом. По формуле (19) была найдена площадь поверхности шара. Для исследуемого шара $D = 40$ мм она составила $S_{\text{общ}} = 7530,96$ мм².

Подставив полученный объем из формулы (20) и площадь поверхности шара в формулу (21), найдем толщину водяной пленки δ_p , находящейся на шаре после погружения в жидкость:

$$\delta_p = \frac{V}{S_{\text{общ}}} = \frac{2,89 \cdot 10^{-6}}{7,53 \cdot 10^{-3}} = 0,385 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (21)$$

После перевода: толщина водяной пленки составляет $\delta_p = 385$ мкм.

Заключение. В ходе проведенного исследования были проанализированы ключевые аспекты массообменных процессов в аппаратах с подвижной насадкой. Разработка и внедрение запатентованного элемента насадки, а также методика расположения впадин на поверхности шарового элемента показали высокую эффективность в оптимизации процессов абсорбции и ректификации. Увеличение площади контакта между фазами и снижение гидравлического сопротивления открывают новые горизонты для повышения производительности и устойчивости работы массообменного оборудования.

Полученные результаты, в т.ч. измерение толщины водяной пленки, подчеркивают важность детального изучения характеристик насадочных элементов для улучшения технологических процессов в химической и других отраслях. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к созданию более действенных и экологически безопасных решений, что будет способствовать не только улучшению производственных показателей, но и защите окружающей среды.

Таким образом, предложенные инновации и методы имеют значительный потенциал для применения в практической деятельности, что подтверждает их актуальность и необходимость дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Замянин А.А., Рамм В.М. Абсорберы с подвижной насадкой. – М.: Химия, 1980. – 184 с.
2. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбера с подвижной шаровой насадкой // Тр. БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – № 2(259). – С. 107–114.
3. Рамм В.М. Абсорбция газов. – 2-е изд., переработ. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
4. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Влияние геометрических параметров опорно-распределительных решеток на гидродинамику в массообменном аппарате с подвижной шаровой насадкой // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2023. – № 2(48). С. 108–112. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-48-2-108-112.
5. Maćkowiak J. Fluid Dynamics of Packed Columns. Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 355 p.
6. Левш И.П., Убайдуллаев А.К. Тарельчатые абсорберы и скрубберы с псевдооживленным (подвижным) слоем орошаемой насадки. – Ташкент: Узбекистан, 1981. – 236 с.
7. Kohl A.L., Neilsen R.B. Gas purification. – 5th ed. – Texas: Gulf Publishing Company, 1997. – 1395 p.

8. Billet R. *Packed Towers in Processing and Environmental Technology* / Translated by Fullarton J.W. – Weinheim: VCH, 1995. – 382 p.
9. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Влияние формы и геометрии насадки на гидродинамику в массообменном аппарате с псевдооживленным слоем // Горная механика и машиностроение. – 2024. – № 1. – С. 89–95.
10. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. – Л.: Химия, 1972. – 248 с.
11. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбционной колонны с подвижной насадкой // Химическая технология и техника: материалы 86-й науч.-техн. конф. (с международным участием) / Минск (31 янв. – 12 февр. 2022 г.). – Минск: БГТУ, 2022. – С. 148–151.

REFERENCES

1. Zaminyan, A.A. & Ramm, V.M. (1980). *Absorberty s podvizhnoi nasadkoi*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
2. Lankin, R.I. & Frantskevich, V.S. (2022). Gidravlichesкое soprotivlenie absorbera s podvizhnoi sharovoi nasadkoi [Hydraulic Resistance of the Absorber with a Movable Ball Nozzle]. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geokologiya* [Proceedings of BSTU. Iss. 2, Chemical technologies, biotechnology, geoecology], 2(259), 107–114. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Ramm, V.M. (1976). *Absorbtsiya gazov*. Moscow: Khimiya. (In Russ.).
4. Lankin, R.I. & Frantskevich, V.S. (2023). Vliyanie geometricheskikh parametrov oporno-raspredelitel'nykh reshetok na gidrodinamiku v massoobmennom apparate s podvizhnoj sharovoi nasadkoi [Influence of geometric parameters of support-distribution grides on hydrodynamics in a mass exchanger with a movable ball nozzle]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science], 2(48), 108–112. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-48-2-108-112. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Maćkowiak, J. (2010). *Fluid Dynamics of Packed Columns. Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems*. Heidelberg: Springer-Verlag.
6. Levsh, I.P. & Ubaidullaev, A.K. (1981). *Tarel'chatye absorberty i skrubbery s psevdoozhivlennym (podvizhnym) sloem oroshaemoi nasadki*. Tashkent: Uzbekistan. (In Russ.).
7. Kohl, A.L. & Neilsen, R.B. (1997). *Gas purification*. – 5th ed. Texas: Gulf Publishing Company.
8. Billet, R. (1995). *Packed Towers in Processing and Environmental Technology*. Translated by Fullarton J.W. Weinheim: VCH.
9. Lankin, R.I. & Frantskevich, V.S. (2024). Vliyanie formy i geometrii nasadki na gidrodinamiku v massoobmennom apparate s psevdoozhivlennym sloem [Influence of the shape and geometry of the nozzle on the hydrodynamics in a mass transfer apparatus with a fluidized layer]. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie* [Mining Mechanical Engineering and Machine-Building], (1), 89–95. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Uzhov, V.N. & Val'dberg, A.Yu. *Ochistka gazov mokrymi fil'trami*. Leningrad: Khimiya. (In Russ.).
11. Lankin, R.I. & Frantskevich, V.S. (2022). Gidravlichesкое soprotivlenie absorbtionnoi kolonny s podvizhnoi nasadkoi // *Khimicheskaya tekhnologiya i tekhnika: materialy 86-i nauch.-tekhn. konf. (s mezhdunarodnym uchastiem)*. Minsk, 31 yanv. – 12 fevr. 2022 g. (148–151). Minsk: BGTU.

Поступила 27.09.2024

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF PACKING ELEMENTS TO ENHANCE ABSORPTION EFFICIENCY

R. LANKIN, V. FRANTSKEVICH, A. VOLK
(Belarussian State Technological University, Minsk)

The development of industry, driven by increased production volumes, leads to a rise in emissions of industrial waste gases that contain harmful substances, negatively impacting the environment and human health. In the chemical and other industries, packed columns are actively used, playing a key role in mass and heat transfer processes such as absorption, rectification, and extraction. Special attention is given to apparatuses with moving (fluidized) packing, which provide high efficiency due to improved flow distribution and increased contact area between phases. This article describes a patented packing element for mass transfer, developed with modern efficiency and environmental safety requirements in mind. It also presents a method for positioning depressions on the surface of the spherical element, optimizing flow distribution and increasing the exchange area. The thickness of the liquid film on the surface of the sphere is investigated, as this is important for the efficiency of the mass transfer process. The results of this research could significantly impact the design and operation of mass transfer apparatuses across various industries.

Keywords: absorption, nozzle, movable nozzle, location of depressions, surface area, water film, mass transfer, hydraulic resistance.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

УДК 378.2

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-113-119

КАК НАПИСАТЬ ДИССЕРТАЦИЮ ХОРОШЕГО КАЧЕСТВА И В СРОК

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Введение. Движущей силой развития производительных сил общества является наука. Стремление к совершенству технических объектов и процессов – суть инженерной и научной деятельности коллективов и отдельных специалистов. В ряде случаев результаты такой деятельности проявляются в написании научной работы – диссертации, автор которой претендует на общественное признание.

Однако часто работа соискателя по написанию диссертации движется натужно, «со скрипом», в течение длительного времени. Стремление сделать этот процесс результативным и эффективным и определило написание данной статьи. При этом под результативностью понимается подготовка качественной диссертации с благоприятным исходом на всех стадиях ее экспертизы (особенно на заключительной стадии), а под эффективностью – организация работы соискателя без переделок, добавления или исключения частей диссертации с сопоставлением достигнутого результата с затраченными усилиями на его достижение.

Основная часть. *Качество диссертации* – степень соответствия ее общего содержания и структурных элементов требованиям нормативных документов. Требования к диссертации определены Положением о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь¹ [п. 20]. Эти требования нацелены на то, чтобы диссертация представляла собой самостоятельно выполненную квалификационную научную работу, имела внутреннее единство, свидетельствовала о личном вкладе автора в науку и была посвящена решению научной задачи.

Определение качества диссертации содержит необходимое условие ее положительной оценки, но достаточным условием такой оценки является отсутствие критической массы недостатков, выявленных при ее экспертизе на различных стадиях рассмотрения. При кажущейся простоте требований и обязательности их выполнения в жизни наблюдается или их незнание, или неумышленное игнорирование, что при экспертизе диссертации становится очевидным, с последующими нежелательными для соискателя выводами и санкциями. При экспертизе диссертаций в ряде случаев выявляются недочеты, снижающие оценку ее качества (порой до критического уровня), к числу которых относятся:

- неправильное описание объекта, предмета и цели исследования и связанная с этим неточная формулировка названия диссертации;
- неполное или неубедительное изложение со смысловым подобием формулировок научной новизны, положений, выносимых на защиту, задач исследования и выводов диссертации;
- декларативность научных результатов работы из-за слабости аргументов и неполноты выводов;
- слабая аргументация достоверности результатов исследования по причине незнания или игнорирования методов математической статистики;
- недостаточное раскрытие связей или отсутствие их между структурными элементами диссертации;
- слабое внедрение результатов работы, обеспечивающих повышение технического уровня производства Республики Беларусь, обслуживаемого наукой;
- неубедительная оценка или отсутствие представления экономического эффекта от внедрения результатов диссертаций;
- некорректное заимствование или подача чужого материала под своим именем.

Большое количество недостатков выявляют до представления диссертации в совет по защите диссертаций, но ряд их – в экспертном совете ВАК, до которого доводить эти недостатки не следует.

Чтобы избежать в будущем указанных коллизий, излишних потерь времени и жизненных ресурсов на подготовку диссертации, необходимо работать без перерывов и придерживаться требований к изложению структурных составляющих элементов диссертации. Эти элементы определены как нормативными документами ВАК, так и практикой оформления научных работ. К ним относятся: объект, предмет и цель исследования; тема (название) диссертации; актуальность; научная задача; задачи исследования; гипотеза и концепция; материалы глав; выводы по главам; пункты научной новизны; положения, выносимые на защиту; основные научные

¹ Указ Президента Респ. Беларусь от 17 нояб. 2004 г. № 560 «Положение о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий». URL: <https://vak.gov.by/presidentialDecree560.1>

результаты (выводы по диссертации); рекомендации по практическому использованию результатов. Указанные элементы должны быть содержательными и согласованными между собой.

Цель данного статейного материала – нацелить работу соискателей на полное и четкое описание структурных элементов диссертации, соответствующее нормативным требованиям.

Экспертиза диссертаций. Качество диссертаций оценивают при их экспертизе. Можно выделить два блока экспертизы отдельных диссертаций с принимаемыми решениями.

Первый блок промежуточной и итоговой экспертиз диссертаций выполняют силами учреждения научно-ориентированного образования, в котором соискатель выполнял работу. Этот блок включает в себя:

- рассмотрение работы на кафедре;
- годовую аттестацию соискателя;
- государственную аттестацию соискателя с присвоением квалификации «Исследователь»;
- предварительную экспертизу диссертации.

Второй блок экспертизы диссертаций под контролем и частично силами ВАК включает следующие стадии:

- экспертизу в совете (первичную, официальными оппонентами, оппонировавшей организацией, защиту в совете);
- заключительную экспертизу (в экспертном совете и Президиуме ВАК).

Диссертация при ее экспертизе будет рассмотрена в целом, а также разделена на структурные элементы и подвергнута анализу, т.е. рассмотрена и оценена каждая ее часть.

Объект исследования. Исследовательская работа соискателя начинается с выбора и обоснования объекта исследования.

Объект исследования – часть изменяющегося и развивающегося материального мира, которая познается и совершенствуется исследователем. Другими словами, объект исследования – это часть объективной реальности, до поры являющейся непонятной и не эффективной для использования, на которую направлена познавательная деятельность исследователя с целью ее совершенствования и последующего эффективного применения. Совершенствование объекта исследования требует новых знаний о нем, полученных в результате научной деятельности. В технических приложениях объектом исследования могут быть устройства, материалы, процессы и организация производства.

Объект исследования характеризуется глубиной изучения и масштабом использования. Глубина изучения определяется переходом от целого к его частям, например: для устройств – машина–агрегат–деталь; при изучении процессов – процесс–операция–переход–ход; при изучении материалов – макро-, микро- или наноуровень; при исследовании организации производства – в пространстве–во времени. Масштаб использования объекта исследования распространяется на отдельные предприятия (организации), группы предприятий, отрасль производства страны, межгосударственные структуры. Чем больше глубина изучения и масштаб использования объекта исследования, тем более существенны и значимы знания о нем. Это подтверждает и обзор лучших защищенных работ, отмеченных ВАК Республики Беларусь.

Цель исследования – второй рассматриваемый структурный элемент диссертации.

Цель исследования – желаемый основной конечный результат при совершенствовании объекта исследования, на достижение которого направлено действие исследователя.

Работа без цели подобна переливанию из пустого в порожнее. Цель пронизывает всю работу, дисциплинирует автора, придает работе цельность и лаконичность, стройность и упорядоченность, не позволяет отклоняться в сторону. Цель формулируют четко и конкретно, иначе соискатель не сможет мотивированно сосредоточить свои усилия на пути к ее достижению.

Исторический пример. 1936 год, война в Испании. Скорость немецких самолетов – 500 км/ч, советских – 400 км/ч, большие потери. На совещании с авиаконструкторами И.В. Сталин поставил цель – повысить скорость советских самолетов до недостижимого по тем временам значения – 600 км/ч, что потребовало научных и производственных подвигов. Поставленная цель потребовала новых научных знаний и решений в области аэродинамики, материаловедения, двигателестроения, приборостроения и др. Через год она была достигнута.

Примеры формулировок цели:

- снизить расход тепловой энергии на технологические нужды предприятия на 20%;
- обеспечить нормативный ресурс автомобилей 2 млн км;
- снизить расход запасных частей на ремонт автомобилей в течение их жизненного цикла на 50%;
- исключить загрязнение окружающей среды производственными отходами определенного вида.

Таким образом, цель выражается более высоким результатом в обслуживаемом наукой производстве в виде освоения продукции новых видов, повышения технического уровня и качества продукции или услуг, повышения производительности труда и обеспечения его безопасности, исключения аварий, защиты окружающей среды, снижения расхода производственных ресурсов и т.д.

В формулировках объекта и цели исследования их научная окраска не просматривается.

Цель технической работы выражают количественным показателем. В заключении работы сопоставляют значения этого показателя – каким оно было до выполнения работы и каким стало в результате ее выполнения, что убеждает читателя в факте и значимости достигнутой цели.

К сожалению, в большинстве работ, представленных в объявлении на сайте ВАК, цель в названии или не приведена, или прослеживается с трудом. Формулировка целей в виде разработки каких-то методик и моделей, изучения процессов, исследования вещей, непонятных соискателю, и подобное не проходит.

Научная задача (диссертации). Достижение цели предполагает постановку научной задачи, задач исследования и их решение.

Научная задача (следующий необязательный структурный элемент диссертации) – это состояние противоречий между, с одной стороны, запросами производства в знаниях, которые обеспечат более полное удовлетворение потребностей общества силами этого производства, и недостаточным уровнем соответствующих научных знаний, с другой.

Решение научной задачи позволяет объяснить и предсказать те факты и явления, которые с прежних позиций нельзя было предвидеть и объяснить, а также открыть новые пути создания и совершенствования технических объектов.

Научная задача обосновывается и формулируется в первой (обзорной) главе диссертации. На наш взгляд, формулировку научной задачи целесообразно нормативными документами ВАК включить в число обязательно описываемых структурных элементов диссертации.

Концепция – как стратегия действий – предполагает описание системы решения научной задачи. Концепция по части признаков совпадает с понятием «гипотеза». Она является необязательным структурным элементом диссертации, но соискателю желательно привести ее в конце обзорной главы.

Задачи исследования. Определение термина «задачи исследования» существенно отличается от определения термина «научная задача (диссертации)».

Задачи исследования определяют стадии исследовательской работы, они являются обязательным структурным элементом диссертации.

Задачи исследования выбирают таким образом, чтобы *их число и содержание было необходимо и достаточно для достижения цели исследования*. Некоторые члены советов рекомендуют численно и содержательно связывать задачи исследования с выводами заключения диссертации. Описание решений поставленных задач определяет содержание соответствующих глав диссертации, названия которых должны быть созвучны задачам.

Формулировка задач исследования основывается, в основном, на тех же принципах, что и формулировка цели. Однако имеются некоторые особенности:

- формулировку каждой задачи исследования начинают с глагола, при этом в отдельных случаях допускается использование глагола «исследовать»;
- количество задач исследования коррелирует с количеством положений, выносимых на защиту, но число задач чаще превышает число положений.

При экспертизе диссертации контролируют, полностью ли решены задачи исследования в соответствующих ее главах. Неполнота этих решений может завершиться нежелательным для соискателя общим вердиктом по диссертации.

Предмет исследования – носитель (вместилище) научного знания. Качество этому носителю придает научная новизна, наполняющая его и имеющая название. Предмет исследования по объему понятия, как правило, шире научной новизны. Бывает так: носитель есть, а новизны нет, т.е. объем предмета исследования не наполнен научной новизной (что очень плохо).

Предметом исследования могут быть: теории, законы, принципы, закономерности, зависимости, гипотезы, концепции, генезис процесса, экспериментальные методики, связи данного явления с другими явлениями, алгоритмы, программы, пределы и перспективы практического использования теории на практике, технологические процессы, новые материалы, системы практических рекомендаций, методические рекомендации и др. Чем ближе к началу перечисления находится носитель научного знания, тем он более значим. Развитие предмета исследования проявляется в новых знаниях об объекте исследования, а научную новизну составляют новые свойства, связи и отношения частей этого объекта.

Отнесение содержания диссертации к паспорту научной специальности (по объекту и предмету исследования) сначала нестрогое, а затем строго, отслеживают при утверждении темы диссертации, промежуточной и итоговой аттестаций соискателей, а позже на всех последующих стадиях экспертизы диссертации.

Границы объекта исследования, изучаемого данной научной специальностью, приведены в формуле паспорта этой специальности (ч. II паспорта). Соответствие выбранного объекта исследований паспорту специальности – первое условие соответствия содержания диссертации отрасли науки и специальности.

Границы предмета исследования, относящегося к данной специальности, приведены в ч. III ее паспорта. Эта часть называется «Области исследования». Соответствие носителей научного знания, приведенных соискателем, в сравнении с указанной частью паспорта специальности – второе условие соответствия содержания диссертации отрасли науки и специальности.

Другими словами, если объект и предмет исследования вписываются в ч. II и III паспорта специальности, то диссертация соискателя соответствует заявленной специальности. Важность правильного отнесения содержания диссертации заявленной специальности ее паспорту обусловлено следующим. Если экспертным советом ВАК будет установлено² [п. 52], что содержание диссертации не соответствует специальности или отрасли науки, по которой она защищена, то Президиум ВАК вправе снять диссертацию с рассмотрения. В этом случае ВАК приостанавливает или прекращает деятельность соответствующего совета по защите диссертаций.

Название (тема) диссертации – концентрированное выражение сути научного исследования. Тема диссертации должна отражать цель проведенных исследований и соответствовать ее содержанию² [п. 22]. Коллеги моего возраста считают, что название работы состоит из ее цели и средств достижения этой цели. В названии работы просматриваются объект и цель исследования, а также средства достижения цели, причем цель стоит на первом месте.

Примеры названий диссертаций (здесь цель подчеркнута, объект исследования обозначен *курсивом*, а остальное определяет средства достижения поставленной цели):

Снижение аварийности на подходах к регулируемым перекресткам путем управления движением *попутных транспортных средств*,

Повышение эффективности тормозных систем автомобилей за счет снижения гистерезисных потерь в *дисковых тормозных механизмах*,

Обеспечение безопасности труда и охраны окружающей среды внедрением технологий утилизации *нефтепродуктов*.

Актуальность – обоснование необходимости выполнения работы. Ее кратко приводят во введении и обстоятельно обосновывают в первой (обзорной) главе диссертации.

Научная новизна – свойство рассматриваемого предмета исследования, отличающее его от одноименных предметов исследования.

Научная новизна – это до времени неизвестное, но опубликованное соискателем научное знание об объекте исследования. Она проявляется и заключается в выявлении и теоретическом обосновании этого знания в виде его уточнения, дополнения или преобразования. Уточнение конкретизирует отдельные теоретические или практические положения, дополнение расширяет известные положения, открывает новые грани решения научной задачи, а преобразование излагает принципиально новое решение научной задачи, которому нет аналогов. Естественно, цена научного знания в последнем случае самая высокая.

При изложении научной новизны соискатель формулирует – что нового своими исследованиями он вносит в теорию и практику. В объеме научной новизны включают те и только те сведения, которые способствуют достижению цели исследования при совершенствовании объекта исследования.

Характеристика научной новизны работы не означает, что вся работа должна быть совершенно новой, но элементы новизны в необходимом количестве (за что и присуждается ученая степень) должны обязательно присутствовать в каждом ее положении. В формулировке научной новизны обязательно нужно указать на ее отличие от фрагментов ранее выполненных работ, при этом требуется оценка ее степени отличия (что установлено впервые, что получило развитие).

Качественная сторона наличия научной новизны выражается ее определением и характеристикой в соответствующих частях текста. Количественная оценка научной новизны – это доля объема понятия научной новизны в объеме понятия [1] соответствующего предмета исследования.

Внутренне единство диссертации – изложение в связном виде ее материала без пропусков и повторений с достижением поставленной цели.

Положения, выносимые на защиту. Во время публичной защиты диссертации соискатель раскрывает и отстаивает ее научные положения перед членами совета и другими присутствующими. Положения, выносимые на защиту, составляют основной структурный элемент общей характеристики работы.

Положения, выносимые на защиту, – конкретные формулировки, содержащие отличительные признаки самостоятельно полученных новых научных результатов, характеризующие вклад соискателя ученой степени в отрасль науки, к которой относится тема диссертации, включающие сравнительную оценку их научной и практической значимости² [п. 20].

Положения представляют собой единство новых, достоверных и значимых результатов исследования. Положения излагают лаконично с отражением сущности и новизны полученных соискателем научных результатов, приращения научного знания в отрасли науки и практического вклада. Описание научной новизны аргументируют составляющими ее отличительными признаками. Положения констатируют новые сведения о предмете исследования с указанием возможных путей и способов их использования при совершенствовании объекта

² Указ Президента Респ. Беларусь от 17 нояб. 2004 г. № 560 «Положение о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий». URL: <https://vak.gov.by/presidentialDecree560.1>

исследования. При формулировке положений важно использовать количественные характеристики, оценивающие их значимость. Положения отражают решение сформулированных задач исследования, они составляют основу заключительных выводов.

Таким образом, в каждом отдельном положении отражают объект, предмет и цель исследования, научную новизну результатов и их практическую значимость.

Формулировку каждого отдельного положения рекомендуется строить в виде четырехзвенного предложения [2] (подобно описанию формулы изобретения), включающего следующие компоненты (таблица):

1. Название положения, относящееся к предмету и (или) объекту исследования. Оно качественно определяет наличие научной новизны работы.

2. Содержание положения в виде целостного множества его частей.

3. Признаки вклада соискателем в науку в виде научной новизны, обеспечивающей совершенствование объекта исследования и определяющие отличия данного положения от известных научных результатов. В составе положения, выносимого на защиту, содержание этого пункта является его основной составляющей. Количественная составляющая научной новизны описывается количеством и объемом отличительных признаков материала диссертации, выявленных путем сопоставления его с ранее опубликованными работами по данному научному направлению.

4. Значимый научный, практический, социальный или экономический результат, достигаемый за счет использования отличительных признаков положения, перечисленных в п. 3, и обеспечивающий частично или полностью достижение поставленной цели в виде вклада в науку и производство. Вклад в науку – это *приращение научного знания*, а вклад в производство – это *факт повышения технического уровня* объекта исследования. Вклад в производство желательно изложить и количественно.

Таблица. – Структура отдельного положения, выносимого на защиту

Компоненты положения	Содержание компонентов
1. Название	Наименование нового научного знания, заключенного в предмете исследования (теория, закон, принцип, закономерность, зависимость, особенность, процесс и др.) и (или) усовершенствованном объекте исследования
2. Содержание, начинающееся словом «включающий (ая, ее)»	Перечисление (описание) составных частей положения, относящихся к объекту и предмету исследования
3. Отличия, начинающиеся словом «отличающийся (аяся, щееся)» или подходящим синонимом	Раскрытие сути нового научного знания (научной новизны) с его приращением, заключенного в предмете исследования, и влияния этого знания на совершенствование объекта исследования
4. Вклад в теорию и практику, начинающийся словами: «что дает», «что обеспечивает» и др.	Раскрытие в количественном виде значения положения для теории и практики, касающиеся достижения цели исследования за счет использования новых знаний и совершенствования объекта исследования

Сумма сведений о цели исследования из п. 4 в виде подцелей по всем положениям составляет ее общий объем.

Положения приводят без авторской интерпретации, что дает возможность читателю оценить их значимость.

Примеры формулировки положений, выносимых на защиту (курсивом приведено название положения):

Механизм образования усталостных трещин в восстанавливаемой детали с покрытием,

– включающий образование дислокаций, появление очагов трещин и их рост,
– устанавливающий, что трещины возникают в переходной зоне «покрытие-материал детали», а их конечный размер зависит как от соотношения микротвердости материалов покрытия и детали, так и толщины переходной зоны,

– и обеспечивающий при отношении микротвердости материалов покрытия и детали 1,6 раза и уменьшении переходной зоны с 65–70 до 5–10 мкм повышение предела выносливости детали в 1,4–1,5 раза,

Структурный синтез процесса переработки нефтесодержащих отходов,

– включающий описание в виде графа с вершинами освоенных и гипотетически возможных операций процесса в их сочетаниях с использованием «морфологического анализа» и выражением затрат на реализацию каждой операции длиной дуг, связывающих вершины,

– отличающийся учетом ограничений по производительности и качеству процесса и выбором наилучшего решения с помощью динамического программирования,

– и обеспечивающий допустимый риск здоровью рабочих при минимальном расходе производственных ресурсов.

При указанном описании положений, выносимых на защиту, раздел «Научная новизна» общей характеристики работы при соответствующей корректировке нормативного документа ВАК может быть исключен из общей характеристики работы, т.к. описание частей научной новизны излагается в п. 3 каждого положения.

Описание положений, выносимых на защиту, недопустимо представлять в виде общих невыразительных конструкций типа «результаты анализа...», «результаты теоретических и экспериментальных исследований...» и т.п.

В ряде диссертаций в состав положений, выносимых на защиту, включают различные модели объектов исследования или их частей или соответствующие методики, с помощью которых получены сведения о поведении реальных объектов. Думается, что такие модели или методики не являются ни объектом, ни предметом исследования. Они служат только инструментами ученого для добывания новых знаний об объекте исследования, когда натуральный эксперимент невозможен или трудоемок, поэтому сведения о моделях не могут быть отдельными положениями. Сведения модельных экспериментов с помощью существующих правил и критериев подобия должны характеризовать поведение реальных технических объектов (объекта исследования), познаваемых и улучшаемых соискателем.

Содержание каждого из положений, выносимых на защиту, в качестве составной части выводов заключения диссертации должно быть отражено соискателем в научных изданиях, включенных в перечень изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертаций и (или) в иностранных научных изданиях³ [п. 19], до предварительной экспертизы диссертации.

Содержание положений, выносимых на защиту, ложится в основу заключения совета по защите диссертаций по результатам защиты отдельной диссертации. Это заключение (объемом в 1 страницу текста), подписанное председателем и ученым секретарем совета и скрепленное гербовой печатью учреждения научно-ориентированного образования, в свою очередь, является основой рекомендации экспертного совета ВАК ее Президиуму при утверждении решения совета о присуждении ученой степени. Если в заключении совета будет выявлено неконкретное описание вклада соискателя в науку или нечеткость изложения пунктов – за что соискателю следует присудить искомую степень, то такое заключение отправляют в совет на доработку со смещением сроков рассмотрения диссертации в ВАК. Таким образом, научное, выразительное и обоснованное описание положений, выносимых на защиту, является предпосылкой скорой и положительной оценки диссертации на последней стадии ее экспертизы.

Вклад соискателя ученой степени в совместные научные публикации с другими авторами разграничивают путем предоставления соответствующих справок, подписанных всеми соавторами. В справке содержательно отмечают: кто что написал (с установлением автора, разработчика конкретных фрагментов текстов статей). Естественно, что описание положений, выносимых на защиту, должно принадлежать только автору диссертации. Не допускается подмена содержательного описание вклада фиксацией участия в долях или процентах.

Следует отметить: то, что в народе называется воровством (кражей), в науке именуется возвышенным словом «плагиат» – некорректное заимствование чужого материала без ссылки на автора. Соискатель обязан делать ссылки на заимствованные источники (в т.ч. на диссертации и собственные публикации) с указанием соответствующих номеров страниц³ [п. 26],⁴ [п. 28]. При подозрении на наличие плагиата рассмотрение диссертации на любой стадии ее экспертизы (в т.ч. при защите в совете) приостанавливают и создают комиссию для установления факта присвоения авторства (плагиата), фальсификации или подлога материалов, включенных в диссертацию или аттестационное дело. Если такое нарушение установлено, то дальнейшее рассмотрение диссертации прекращают, а лицо, уличенное в нем, отлучают на 5 лет от повторной защиты диссертации.

Заключение диссертации – развернутое изложение того, что приведено в разделах «Научная новизна» и «Положения, выносимые на защиту», с описанием рекомендаций по практическому использованию результатов. Этот структурный элемент завершает диссертацию.

Выводы опираются только на те сведения, которые приведены в диссертации. Обычно первый вывод заключения посвящен ответу на вопрос о том, как и за счет чего достигнута цель исследования, а последний – с каким эффектом она достигнута. Промежуточные выводы подробно характеризуют научную составляющую работы.

Заключение. Описание структурных элементов диссертации, как и всю работу над ней, начинают с обоснования и характеристики объекта исследования, затем переходят к формулированию цели исследования. Основным структурным элементом диссертации являются положения, выносимые на защиту. Они базируются на всесторонних качественной и количественной характеристиках объекта и предмета исследования в их связях и отношениях, научной новизне результатов и влиянии этих результатов на достижение поставленной цели. Другие сведения здесь неуместны.

³ Указ Президента Респ. Беларусь от 17 нояб. 2004 г. № 560 «Положение о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий». URL: <https://vak.gov.by/presidentialDecree560.1>

⁴ Постановление Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 28 февр. 2014 г. № 3: в ред. от 22 авг. 2022 г. № 5) «О порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации». URL: <https://vak.gov.by/On-Approval-of-Instruction>

Целесообразно научную новизну работы описывать только в положениях, выносимых на защиту, а в общую характеристику работы включить описание научной задачи, однако, эта рекомендация связана с корректировкой нормативных документов ВАК.

Оцениваются две составляющие вклада соискателя: в науку (научную составляющую) и в производство (прикладную составляющую под влиянием научной).

Диссертация на различных стадиях экспертизы будет оценена положительно, если она удовлетворяет как нормативным требованиям ВАК, так и не содержит критического множества недостатков.

Использование приведенных рекомендаций позволит уменьшить время работы над диссертацией, повысить ее качество и сохранить душевные силы соискателя. Представленный материал способствует также самотестированию своего труда в виде экспертизы диссертационной работы собственными силами соискателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гегель Г.В.Ф. Наука логики. В 3 т. – М.: Мысль. – Т. 3: Учение о понятии. – 1972. – 374 с.
2. Иванов В.П. Изложение положений, выносимых на защиту, в диссертации // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышль. Приклад. науки. – 2023. – № 2(48). – С. 117–119. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-48-2-117-119

REFERENCES

1. Gegel', G.V.F. (1972). *Nauka logiki. V 3 t. T. 3: Uchenie o ponyatii*. Moscow: Mysl'. (In Russ.).
2. Ivanov, V.P. (2023). Izlozhenie polozhenii, vynosimyykh na zashchitu, v dissertatsii [Presentation in the of Provisions Made on Defense]. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye Nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 1(49), 71–78. DOI: 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78 (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 25.11.2024

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Попок Н.Н., Беляков Н.В., Селезнёв С.К., Базров Б.М.</i> Классификатор конструктивно-технологических элементов с границами зон переходных процессов для программирования обработки оригинальных некруглых деталей на станках с ЧПУ	2
<i>Рынкевич С.А.</i> Контроль механических и гидромеханических передач мобильных и технологических машин	13
<i>Попок Н.Н., Хмельницкий Р.С., Анисимов В.С., Баиладчев Д.А.</i> Универсализация вращающихся режущих инструментов на основе унифицированных конструктивных модулей	20
<i>Мисун Ал-й Л., Гаркуша А.В.</i> Прогнозирование производственных рисков при эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники	29
<i>Янкевич Н.С., Янкевич С.Н.</i> Очистка отработавших газов двигателя внутреннего сгорания производства ОАО «Мотовело»	33

ТРАНСПОРТ

<i>Капский Д.В., Богданович С.В., Бузова М.Г.</i> Влияние дорожной и интеллектуальной транспортной инфраструктуры на безопасность движения: новые подходы к классификации рисков	39
<i>Лю Юйвэй, Семченков С.С., Капский Д.В.</i> Обеспечение приоритетного движения маршрутного пассажирского транспорта за счет устройства выделенных полос	49
<i>Лю Юйвэй, Семченков С.С., Капский Д.В.</i> Анализ алгоритмов и методов обеспечения приоритетного движения маршрутного пассажирского транспорта	53
<i>Лю Юйвэй, Семченков С.С., Капский Д.В.</i> Мероприятия по обеспечению приоритетного движения маршрутного пассажирского транспорта	60
<i>Лебедева М.Р., Лобашов А.О., Семченков С.С.</i> Методы анализа данных и прогнозирования аварийности на примере города Минска	70
<i>Khodoskin D., Davhulevich V., Afanasenka I.</i> Evaluation of Analyses of the Influence of Various Factors on the Accident Rate Pedestrian Accidents at Pedestrian Crossings through the use of Statistica Tools	77

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Хамидов Д.Г., Фозилов С.Ф.</i> Изучение свойств и использование отдельной фракции из госсиполовой смолы	86
<i>Емельянова В.А., Ермак А.А.</i> Изучение возможности утилизации смесей скопа очистных сооружений и отходов деревопереработки	92
<i>Мытько Д.Ю., Я. Ян, Х. Чжао, Чж. Сунь</i> Исследование смачивания поверхности элемента регулярной структурированной насадки	97
<i>Ланкин Р.И., Францкевич В.С., Волк А.М.</i> Разработка и исследование элементов насадок для повышения эффективности абсорбции	107

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

<i>Иванов В.П.</i> Как написать диссертацию хорошего качества и в срок	113
--	-----