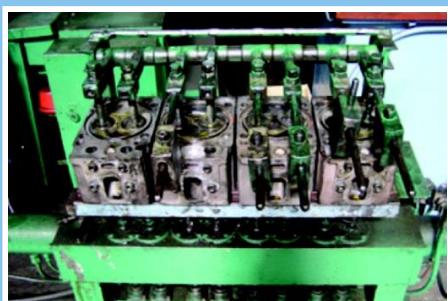


ВГЛТУ
95
1930 – 2025

ВНТВ

Воронежский научно-технический вестник
Юбилейный выпуск № 4 (54) декабрь 2025





Главный редактор
Воронежского научно-технического вестника
Д-р техн. наук, профессор кафедры
машиностроительных технологий ВГЛПУ
Кадырметов Анвар Минирович

Уважаемые коллеги, авторы!

*В 2025 г. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Т.Ф. Морозова» отметил 95 лет!
В этой связи 4-ый выпуск нашего журнала приурочен к Юбилею
ВГЛПУ!*

На протяжении 13 лет Воронежский научно-технический вестник издает научные труды наших уважаемых авторов, среди которых не только ученые и специалисты, но и студенты публикуют результаты своих исследований и достижений в области автомобильного транспорта и машиностроения.

Современные машиностроительные технологии машиностроительных производств во всех отраслях нашей страны, в том числе и в лесопромышленном комплексе, невозможно представить без применения современной техники, оборудования, машин, автомобильного транспорта, автотракторной и специальной техники. Благодаря научным и инженерным решениям, в том числе наших авторов, разрабатываются новые технологии, техника становится более совершенной, надежной и эффективной.

Редакция Воронежского научно-технического вестника поздравляет Вас с юбилеем ВГЛПУ и приглашает к продолжению сотрудничества!!!



Научно-технический
журнал ⁽¹²⁾

Издается с 2012 года

Выходит четыре раза в год

Учредитель - федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**«Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»**

Главный редактор:
Кадырметов А.М. д.т.н., доцент

Заместителя главного редактора:
Дорохин С.В. д.т.н., доцент

Отв. секретарь:
Попов Д.А. к.т.н., доцент

Редколлегия:
Смоленцев Е.В. д.т.н., профессор
(г. Воронеж, Российская Федерация)
Козлов А.М. д.т.н., профессор
(г. Липецк, Российская Федерация)
Лебедев В.А. к.т.н., профессор
(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
Кузовкин А.В. д.т.н., профессор
(г. Воронеж, Российская Федерация)
Болдырев А.И. д.т.н. профессор
(г. Воронеж, Российская Федерация)
Сухочев Г.А. д.т.н., профессор
(г. Воронеж, Российская Федерация)
Кириллов О.Н. д.т.н., профессор
(г. Воронеж, Российская Федерация)
Куц В.В. д.т.н., доцент
(г. Курск, Российская Федерация)
Терентьев А.В. д.т.н., доцент
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)
Клявин В.Э. д.т.н., доцент
(г. Липецк, Российская Федерация)
Рассоха В.И. д.т.н., доцент
(г. Оренбург, Российская Федерация)
Новиков И.А. д.т.н., доцент
(г. Белгород, Российская Федерация)
Евтиков С.С. д.т.н., доцент
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)
Агеев Е.В. д.т.н., профессор
(г. Курск, Российская Федерация)
Новиков А.Н. д.т.н., профессор
(г. Орел, Российская Федерация)
Шевцов А.Г. д.т.н., доцент.
(г. Белгород, Российская Федерация)
Никонов В.О. к.т.н., доцент
(г. Воронеж, Российская Федерация)
Лихачев Д.В. к.т.н., доцент
(г. Воронеж, Российская Федерация)

Адрес редакции:
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева,
8, корпус, 4
E-mail: vestnikvgta@mail.ru
Телефон: (473) 253-73-11
Сайт: <http://vestnikvgta.ru/>

Зарегистрировано в Федеральной
службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор).

Свидетельство:
ЭЛ № ФС 77 - 66383 от 14.07.2016

© ФГБОУ ВО ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

- Марченко А. А.** Трибодеформационные и термодинамические показатели процесса чистового точения жаропрочной стали 10ГН2МФА..... 4

- Кадырметов А. М., Дроздов И. Г., Сухочев Г. А., Смольянникова Е. Г., Попов Д. А., Пустовалов А. С., Попов П. Н.** Обзор путей повышения тепловой эффективности плазмотронов для процессов плазменного нанесения покрытий... 12

- Дементьев В. Б., Волков К. Г., Мишарин С. А., Пряхин А. Б., Халявин В. В.** Изготовление трубных заготовок с повышенным комплексом свойств методом винтового обжатия..... 46

- Сухоруков В. Н., Смоленцев Е. В., Милинчук К. А., Бабенков Н. Н.** Прошивание отверстий и пазов многоэлектродной электроэррозионнохимической обработкой..... 53

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

- Ануфриев К. А., Евтиков С. А., Ануфриев Е. А.** Возможности применения усовершенствованного способа дорожной диагностики для повышения безопасности дорожного движения..... 63

- Котов Р. А., Дорохин С. В.** Разработка маршрутного индекса эффективности городского общественного транспорта на основе трёхмерной оценки..... 73

- Белокуров С. В., Кононов М. С., Белокуров В. П., Кораблев Р. А., Голев А. Д., Сподарев Р. А.** Моделирование процессов массового обслуживания в условиях парковирования автотранспорта в крупных городах..... 80

- Печатнова Е. В., Кирюшин И. И., Нагорный Н. Н.** Характеристики дтп с участием водителей в состоянии алкогольного опьянения..... 90

- Иванников В. А., Шаталов Е. В., Зеликов В. А., Жайворонок Д. А., Бухтояров В. Н.** Оптимизация мониторинга автотранспортной инфраструктуры с использованием технологии централизованной обработки данных..... 100

- Кущенко Л. Е., Дорохин С. В., Камбур А. С.** Модель управления движением пешеходного потока для регулируемого пешеходного перехода..... 109

- Снятков Е. В., Хлистун В. Р., Кириченко И. А.** К вопросу обоснования компоновочной схемы для зоны зарядки электромобилей..... 119



2.5.5 – технология и оборудование
механической и физико-технической
обработки

**ТРИБОДЕФОРМАЦИОННЫЕ
И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ
ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА
ЧИСТОВОГО ТОЧЕНИЯ
ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 10ГН2МФА**

Марченко Андрей Анатольевич,
аспирант, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону,
e-mail: tobago13@yandex.ru

Аннотация. Данная статья посвящена оценке связи между трибодеформационными и термодинамическими показателями процесса обработки жаропрочной реакторной стали. Экспериментально исследован процесс продольного чистового точения стали 10ГН2МФА пластинами твёрдого сплава Т15К6 без применения охлаждения при различных режимах резания. На основании полученных опытных путём трибодеформационных показателей процесса произведено математическое моделирование температурного распределения на передней поверхности резца. Установлено, что в исследованном диапазоне режимов обработки кривые зависимости температуры резания, максимальной расчётной температуры передней поверхности резца, а также интенсивности изнашивания пластин от скорости резания проходят через минимум. Наибольшей износстойкости инструмента соответствует диапазон скоростей обработки, при которых температура передней поверхности резца минимальна, при этом снижение общей температуры резания фиксируется в области более низких скоростей точения.

**TRIBODEFORMATION AND
THERMODYNAMIC INDICATORS
OF THE FINISH TURNING PROCESS
OF HEAT-RESISTANT STEEL
10GN2MFA**

Marchenko Andrey Anatolyevich,
Postgraduate student, Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: tobago13@yandex.ru

Annotation. This article is devoted to assessing the relationship between tribodeformation and thermodynamic parameters of the heat-resistant reactor steel processing process. The process of longitudinal finishing turning of 10GN2MFA steel with T15K6 hard alloy plates without cooling under various cutting modes has been experimentally investigated. Based on the experimental tribodeformation parameters of the process, mathematical modeling of the temperature distribution on the front surface of the cutter was performed. It is established that in the studied range of processing modes, the curves of the dependence of the cutting temperature, the maximum calculated temperature of the front surface of the cutter, as well as the wear rate of the plates on the cutting speed pass through a minimum. The maximum wear resistance of the tool corresponds to the range of machining speeds at which the temperature of the front surface of the die is minimal, while a decrease in the overall cutting temperature is recorded in the area of lower turning speeds.

Ключевые слова: ПРОДОЛЬНОЕ ТОЧЕНИЕ, ЖАРОПРОЧНАЯ СТАЛЬ, ТВЁРДЫЙ СПЛАВ, ТЕМПЕРАТУРА РЕЗАНИЯ, ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННАЯ ТРИБОСИСТЕМА, УСАДКА СТРУЖКИ, ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ, ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ.

Keywords: LONGITUDINAL TURNING, HEAT-RESISTANT STEEL, HARD ALLOY, CUTTING TEMPERATURE, HEAVILY LOADED TRIBOSYSTEM, CHIP SHRINKAGE, PLASTIC DEFORMATIONS, WEAR INTENSITY.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Интенсивное тепловыделение в ходе резания металлов является причиной проявления ряда негативных факторов, существенно снижающих эффективность процесса обработки. К ним относится ухудшение физико-механических свойств инструментального режущего материала (ИРМ), наростообразование на рабочих поверхностях режущего инструмента (РИ), интенсификация диффузионного и окислительного видов изнашивания, снижение качества обработанной поверхности и пр. [1]. При этом на процесс изнашивания ИРМ влияет не только среднее значение температуры, но и характер температурного распределения на рабочих гранях инструмента и прилегающих к ним поверхностных объёмах ИРМ [2, 3]. Температура контактной зоны в значительной степени зависит от режимов резания, поэтому её величина способна ограничивать производительность процесса обработки. Оценка термодинамических явлений в зоне резания различными методами является актуальной темой многочисленных исследований [4-12]. В настоящее время увеличивается число предприятий металлообрабатывающей отрасли, стремящихся к сокращению использования смазывающе-охлаждающих технологических сред (СОТС), либо же вообще к полному отказу от них [11, 12]. В этой связи разработка надежных методов контроля и прогнозирования теплового состояния зоны резания становится все более важной, особенно при резании материалов с низкой теплопроводностью [4, 9-11].

Тепловыделение в зоне резания происходит на участках первичных деформаций (ПД), вторичных деформаций (ВД) и упругого контакта (УК) на рабочих гранях РИ. Максимальной величины температура в контактной зоне достигает на границе зон ВД и УК на передней поверхности РИ; в этом же месте происходит формирование лунки износа. Протекающие на передней поверхности РИ теплофизические процессы не только напрямую определяют ряд показателей процесса резания в целом, но и тесно связаны с контактными явлениями и износом по задней грани. Так, для большинства скоростей резания виды контактного взаимодействия по передней и задней граням во многом идентичны, а характер тепловыделения на передней поверхности в значительной степени определяет температуру и ход протекания процессов изнашивания на задней грани РИ [13, 14]. Сопряжения «передняя поверхность инструмента – стружка» и «задняя поверхность инструмента – заготовка» на участках ВД представляет собой параллельно функционирующие тяжелоагруженные трибосистемы. Их входные характеристики (скорость скольжения, касательные напряжения и др.) определяются как непосредственно самими режимами резания, так и особенностями протекания деформационных процессов на участке ПД и ВД, имеющих место при этих режимах. Применение А.В. Чичинадзе и К.Г. Шучевым гидродинамических аналогий к оценке деформационных процессов в обрабатываемом материале на участке ВД позволило получить аналитические зависимости, описывающие температурное распределение внутри деформируемого микрообъёма, а также вдоль участка ВД на рабочих поверхностях РИ [15]. В этом случае поверхностный деформируемый микрообъём в материале заготовки (стружке) рассматривается в качестве зоны квазивязкого течения материала с объёмно распределённым источником тепловыделения, функционирующим за счёт вязкой диссипации энергии трения.

Широкое распространение в качестве материала для изготовления деталей в различных сферах энергетического машиностроения получила жаропрочная высоколегированная сталь 10ГН2МФА. Чистовая токарная обработка деталей из этого материала может осуществляться без

применения СОТС, и в этом случае важной задачей является выбор режимов резания, обеспечивающих минимальные контактные температуры и высокое качество обработанной поверхности.

Данная работа посвящена исследованию трибодеформационных характеристик процесса обработки и оценке теплового состояния контактной зоны на передней поверхности резца при наружном чистовом точении заготовок из жаропрочной стали 10ГН2МФА без применения охлаждения.

2 Материалы и методы

Исследован комплекс характеристик наружного продольного точения заготовок из стали 10ГН2МФА диаметром $D = 160$ мм и длиной 400 мм на чистовых режимах обработки. Опыты проводились на модернизированном универсальном токарном станке с системой бесступенчатого регулирования оборотов шпинделя Mitsubishi. Фактическая твёрдость обрабатываемого материала определялась при помощи твердомера комбинированного портативного Мет-УДА. Обработка осуществлялась твердосплавными пластинами T15K6 с покрытием на следующих режимах: скорость резания $V = 100\text{-}240$ м/мин, подача $s = 0,097\text{-}0,26$ мм/об, глубина резания $t = 0,5$ мм. Геометрические параметры режущей части: передний угол $\gamma = 10^\circ$; задний угол $\alpha = 10^\circ$; главный угол в плане $\varphi = 95^\circ$. Общая температура в зоне резания T , а также силы резания по трём координатным осям P_x , P_y и P_z фиксировалась в режиме реального времени при помощи измерительного лабораторного стенда STD 201.1. Оценка теплового состояния зоны резания осуществляется на данном стенде методом измерения термоЭДС, для чего предварительно проводилась тарировка термопары.

Коэффициент усадки стружки K_a определялся весовым методом с применением лабораторных весов Масса-К-150-1. Величина износа по задней грани h_3 и геометрические параметры площадки контакта по передней поверхности измерялись на металлографическом инвертированном микроскопе ЛабоМЕТ-И4 с цифровой системой визуализации. Моделирование температурного распределения на рабочих поверхностях резца осуществлялось по зависимости Чичинадзе-Шучева [14] с использованием части параметров, полученных опытным путём: коэффициента усадки стружки K_a , длины l_k , площади A_k и периметра P_k контакта стружки с передней поверхностью резца, фактического предела прочности заготовок. Обработка результатов экспериментов производилась с использованием стандартных функций дисперсионного анализа программы MathCAD.

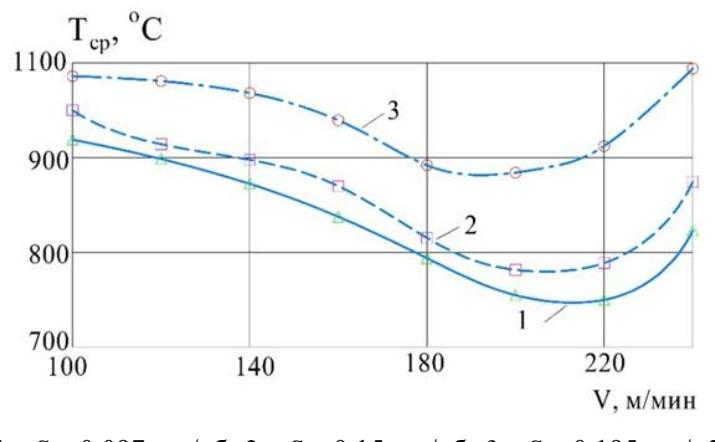
3 Результаты исследований

Средняя температура в зоне обработки T_{cp} для каждого режима определялась на основании показаний измерительного стенда для участка установившегося резания. По результатам экспериментов установлено, что зависимости $T_{cp}(V)$ носят экстремальных характер (рис.1). При этом диапазон скоростей резания, обеспечивающих минимальные значения температуры, смещается с ростом подачи в область более низких скоростей.

Произведём моделирование температурных распределений на участке ВД передней поверхности резца для подачи $S = 0,26$ мм/об. Геометрические параметры площадок контакта на рабочих поверхностях пластины при равных значениях пути резания L для различных скоростей обработки существенно отличаются. Поэтому для моделирования при каждой скорости V выделим такой квазистатический момент в эволюции системы резания, когда износ по задней поверхности достигает критического значения, $h_3 = h_{kp} \approx 0,12$ мм. В такой момент длину трибоконтакта на задней грани (одного из ключевых параметров, определяющих контактную температуру согласно [14]) для всех скоростей диапазона можно считать одинаковой, при этом геометрические параметры контактной зоны на передней поверхности будут значительно различаться. Это позволит уменьшить влияние геометрического фактора на температуру задней поверхности и его вклад в общую температуру в зоне резания. Таким образом, по результатам

моделирования возможно с большой степенью точности оценить взаимосвязь скорости резания, износа РИ и общей температуры в зоне обработки, с одной стороны, и теплового состояния участка ВД на передней поверхности пластины, с другой стороны.

По результатам стойкостных испытаний для каждого значения V установлен путь резания L , соответствующий возникновению критического износа по задней грани, а также определены геометрические параметры контакта на передней поверхности в этот момент – длины l_k , площади A_k и периметра P_k контакта (рис. 2).



1 – $S = 0,097$ мм/об; 2 – $S = 0,15$ мм/об; 3 – $S = 0,195$ мм/об

Рисунок 1 – Кривые зависимости средней температуры в зоне резания T_{cp} от скорости обработки V при различных подачах S

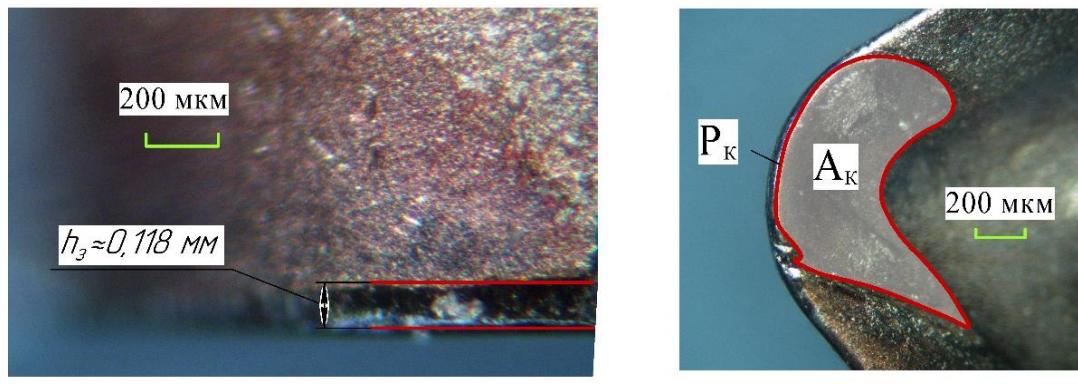


Рисунок 2 – Величина износа по задней грани h_3 (а) и оценка геометрических параметров контакта на передней поверхности пластины (б)
при $V = 160$ м/мин, $S = 0,26$ мм/об, $L = 3267$ м

Также в качестве входных данных для математической модели [14] используется толщина пластически деформированного слоя в стружке h и величина касательных напряжений τ_k , причём связь этих параметров может быть описана эмпирической зависимостью [1]:

$$h = \frac{\tau_k \cdot \left(\frac{l_k}{2} \right)}{\lambda \cdot T_{пл}}, \quad (1)$$

где λ и $T_{пл}$ – коэффициент теплопроводности и температура плавления обрабатываемого материала соответственно.

Среднее значение касательных напряжений примем равным $\tau_k = F_{XY} / A_k$, где F_{XY} – результирующая сила резания для продольного (X) и радиального (Y) направлений. Это позволит учесть влияние изменений сил резания и геометрических характеристик пятна контакта на параметры h и τ_k при различных скоростях обработки. В табл. 1 представлены триботехнические показатели процесса обработки, полученные опытным путём (столбцы 3-7) и параметры, рассчитанные на их основании (столбцы 8-10).

На рис. 3 представлены примеры температурного распределения на участке ВД передней поверхности $T_{ПП}(x)$, где $x = 0 \dots l_k/2$ для скоростей резания 100 и 240 м/мин. Максимальные температуры достигаются на передней поверхности при различных длинах l_k , а их величина $T_{ПП}$ и форма кривой определяется комплексом трибодеформационных показателей при этих режимах обработки.

Таблица 1 – Триботехнические параметры процесса точения стали 10ГН2МФА

$\mathcal{N}\circ$	V , м/мин	K_a	F_{XY} , Н	l_k , мм	A_k , мм^2	P_k , мм	V_c , м/мин	τ_k , МПа	h , мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100	2,455	136	0,481	0,38	2,95	40,7	356	16
2	130	2,230	126	0,458	0,371	3,05	58,3	340	14
3	160	2,037	136	0,390	0,397	3,12	78,5	343	13
4	190	1,975	131	0,321	0,417	2,93	96,2	314	10
5	220	1,823	133	0,414	0,351	3,08	120,7	321	10
6	240	1,771	137	0,411	0,416	3,17	135,5	329	11

Представленные на рис. 3 расчётные значения $T_{ПП}(x)$ характеризуют мгновенную температуру, возникающую на контакте за счёт тепловыделения в пластически деформированном слое стружки при её взаимодействии с поверхностью инструмента, и не учитывают термодиссипацию внутри поверхностных объёмов ИРМ режущей пластины.

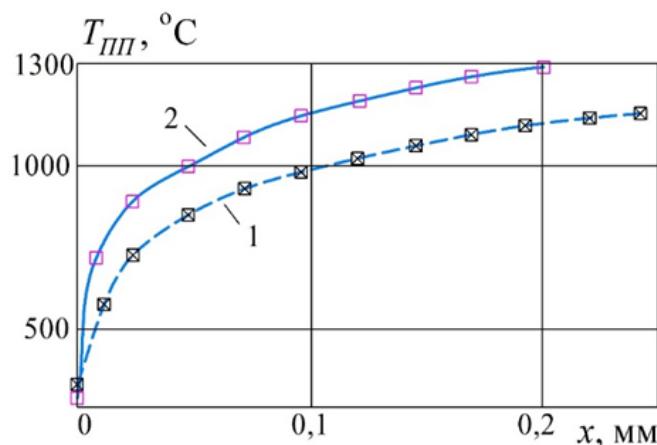


Рисунок 3 – Распределение температуры на участке ВД передней поверхности при скоростях резания: 1 – $V = 100$ м/мин; 2 – $V = 240$ м/мин

Интенсивности изнашивания РИ при различных скоростях обработки $J(V)$ и теплового состояния зоны резания для данной скорости, характеризуемого средней температурой в зоне резания и максимальной температурой передней поверхности представлены на рис. 4. Видно, что параметр T_{cp} принимает свои наименьшие значения в области $V = 160$ м/мин. При этом минимальные величины интенсивности изнашивания J соответствуют более высоким скоростям обработки (180-200 м/мин), причём именно в этом диапазоне скоростей температура передней поверхности $T_{ПП}^{max}$ пластин характеризуется минимальными значениями.

4 Обсуждение и заключение

В результате исследования процесса продольного чистового точения заготовок из жаропрочной стали 10ГН2МФА были установлены зависимости триботехнических и термодинамических показателей от режимов резания. Произведено моделирование температурного распределения на передней поверхности резца при различных сочетаниях величины подачи и скорости обработки с использованием ряда экспериментальных триботехнических параметров. Были построены кривые температурного распределения на передней поверхности режущей пластины для таких квазистатических моментов в эволюции системы резания, при которых соблюдается равенство длины контакта по задней поверхности. При анализе влияния теплового состояния передней поверхности на процесс изнашивания инструмента и среднюю температуру в зоне резания это позволило минимизировать погрешность от разницы в геометрических параметрах пятна контакта на задней грани.

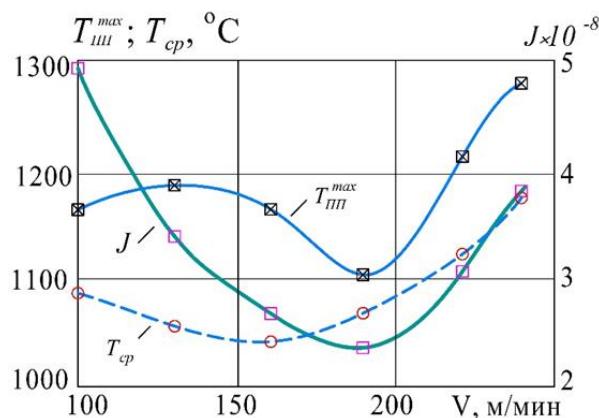


Рисунок 4 – Зависимости интенсивности изнашивания J , средней температуры резания T_{cp} и максимальной температуры передней поверхности от скорости резания V при постоянной подаче $S = 0,26$ мм/об

По результатам экспериментальных данных и моделируемых показателей установлено, что зависимость средней и максимальной температуры в зоне обработки, а также износа пластин от скорости резания в исследованном диапазоне режимов носят экстремальный характер. При этом наиболее низкие значения интенсивности изнашивания пластин наблюдаются в том случае, когда температура передней поверхности минимальна. В этом диапазоне скоростей резания формируется такой комплекс трибологических и деформационных показателей процесса обработки, определяющих входные параметры объёмно распределённого источника тепловыделения в пластически деформируемом поверхностном микрообъёме стружки, при которых значения мгновенных температур нагрева поверхности тяжелонагруженного трибоконтакта «передняя грань инструмента – стружка» значительно ниже в сравнении с другими скоростными режимами. Такой режим функционирования трибосистемы трибоконтакта «передняя грань инструмента – стружка» способствует снижению градиента температур в режущем клине, что сопровождается повышением износостойкости инструмента.

Список литературы

- 1 Рыжкин, А. А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке: монография // Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2019. – 289 с.
- 2 Алиев, М.М. Влияние износостойких покрытий на теплофизические процессы в контактной зоне при резании конструкционных материалов / М.М. Алиев, А.В. Фоменко, Е.В. Фоминов, К.Г. Шучев, А.Е. Мироненко // Вестник машиностроения, 2023. – №7. – С. 596–600.

- 3 Фоминов, Е.В. Влияние покрытий на основе нитридов циркония и титана на трибодеформационные процессы трения в условиях резания твердосплавными пластинами / Е.В. Фоминов, М.М. Алиев, А.В. Фоменко, К.Г. Шучев // Трение и износ, 2024. – С. 29– 37.
- 4 Гвинджилия В.Е. Влияние скорости резания на импульсные изменения температуры передней поверхности резца при точении жаропрочной стали 15Х2НМФА / В.Е. Гвинджилия, Е. В. Фоминов, А.А. Марченко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 2025. – Т. 27, № 3. – С. 23-26.
- 5 Фоминов, Е.В. Влияние периодических флуктуаций параметров режимов резания на температуру передней поверхности токарного резца / Е.В. Фоминов, А.А. Марченко, К.Г. Шучев // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don), 2025. – Т. 25, № 1. – С. 32– 42.
- 6 Заковоротный, В.Л. Влияние производства тепла на динамику процесса резания / В.Л. Заковоротный // Вестник Донского государственного технического университета, 2017. – №17. – С. 14–26.
- 7 Фоминов Е.В. Оценка трибодеформационных и термоэлектрических характеристик процесса трения при точении гибридной детали со сварным швом / Е.В. Фоминов, М.М. Алиев, К.Г. Шучев, Т.В. Лавренова // Трение и износ, 2025. – Т. 46, № 2. – С. 127-135.
- 8 Veiga F. Analytical thermal model of orthogonal cutting process for predicting the temperature of the cutting tool with temperature-dependent thermal conductivity / F.Veiga, M. Arizmendi, A. Jiménez, A. G. D. Val // International Journal of Mechanical Sciences, 2021; 204: 106524.
- 9 Ślusarczyk Ł. Experimental-Analytical Method for Temperature Determination in the Cutting Zone during Orthogonal Turning of GRADE 2 Titanium Alloy // Materials, 2021; 14(15): 4328.
- 10 Ślusarczyk, Ł.; Twardowska, A. Method for Determining Contact Temperature of Tool Rake Face During Orthogonal Turning of Ti-6Al-4V Alloy / Ł. Ślusarczyk, A. Twardowska // Materials, 2025, 18, 2980. <https://doi.org/10.3390/ma18132980>
- 11 Binali R. Different Aspects of Machinability in Turning of AISI 304 Stainless Steel: A Sustainable Approach with MQL Technology // Metals, 2023; 13:1088.
- 12 Mane, S. Analysis of Thermal Aspect in Hard Turning of AISI 52100 Alloy Steel Under Minimal Cutting Fluid Environment Using FEM / S. Mane, R.B. Patil, M.L. Kolhe, A. Roy, A.G. Kamble, A. Chaudhari // Appl. Mech. 2025, 6, 26. <https://doi.org/10.3390/applmech6020026>
- 13 Резников А. Н. Теплофизика резания // М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
- 14 Талантов Н. В. Влияние скорости резания на закономерности контактных процессов и износ инструмента // Перспективы развития резания конструкционных материалов. – М., 1980. – С. 77–83.
- 15 Чичинадзе А.В. Температурный режим при трении инструментальных материалов с учётом объёмности источника тепловыделения / А.В. Чичинадзе, К.Г. Шучев, А.А. Рыжкин, А.И. Филипчук, М. М. Климов // Трение и износ, 1986. – №7. – С. 43– 51.

References

- 1 Ryzhkin A. A. Synergetics of Wear of Tool Materials in Bladed Processing: Monograph // Rostov-on-Don: Publishing Center of DSTU, 2019. P. 289.
- 2 Aliev M.M. Influence of Wear-Resistant Coatings on Thermophysical Processes in the Contact Zone during Machining of Structural Materials / M.M. Aliev, A.V. Fomenko, E.V. Fominov, K.G. Shuchev, A.E. Mironenko // Bulletin of Mechanical Engineering, 2023, No. 7. – P. 596–600.
- 3 Fominov E.V. Influence of Zirconium and Titanium Nitride-Based Coatings on Tribo-Deformation Processes of Friction in Conditions of Cutting with Carbide Inserts / E.V. Fominov, M.M. Aliev, A.V. Fomenko, K.G. Shuchev // Friction and Wear, 2024. – P. 29–37.
- 4 Gvindzhilia V.E. Influence of Cutting Speed on Pulsed Temperature Changes of the Tool's Front Surface During Turning of Heat-Resistant Steel 15Kh2NMFA / V.E. Gvindzhilia, E.V. Fominov, A.A. Marchenko // Metalworking (Technology, Equipment, Tools), 2025. – Vol. 27, No. 3. – P. 23-26.
- 5 Fominov E.V. Influence of Periodic Fluctuations of Cutting Mode Parameters on the Temperature of the Lathe Tool's Front Surface / E.V. Fominov, A.A. Marchenko, K.G. Shuchev // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don), 2025. – Vol. 25, No. 1. – P. 32–42.
- 6 Zakovorotny V.L. Influence of Heat Generation on the Dynamics of the Cutting Process / V.L. Zakovorotny // Bulletin of Don State Technical University, 2017. – No. 17. – P. 14–26.
- 7 Fominov E.V. Assessment of tribodeformation and thermoelectric characteristics of the friction process during turning of a hybrid part with a welded seam / E.V. Fominov, M.M. Aliev, K.G. Shuchev, T.V. Lavrenova // Friction and Wear, 2025. – Vol. 46, No. 2. – P. 127-135.

- 8 Veiga F. Analytical thermal model of orthogonal cutting process for predicting the temperature of the cutting tool with temperature-dependent thermal conductivity / F. Veiga, M. Arizmendi, A. Jiménez, A.G.D. Val // International Journal of Mechanical Sciences, 2021; 204: 106524.
- 9 Ślusarczyk Ł. Experimental-Analytical Method for Temperature Determination in the Cutting Zone during Orthogonal Turning of GRADE 2 Titanium Alloy // Materials, 2021; 14(15): 4328.
- 10 Ślusarczyk, Ł.; Twardowska, A. Method for Determining the Contact Temperature of the Tool Rake Face During Orthogonal Turning of Ti-6Al-4V Alloy / Ł. Ślusarczyk, A. Twardowska // Materials, 2025, 18, 2980. <https://doi.org/10.3390/ma18132980>
- 11 Binali R. Different Aspects of Machinability in Turning of AISI 304 Stainless Steel: A Sustainable Approach with MQL Technology // Metals, 2023; 13:1088.
- 12 Mane, S. Analysis of the Thermal Aspect in Hard Turning of AISI 52100 Alloy Steel Under Minimal Cutting Fluid Environment Using FEM / S. Mane, R.B. Patil, M.L. Kolhe, A. Roy, A.G. Kamble, A. Chaudhari // Appl. Mech. 2025, 6, 26. <https://doi.org/10.3390/applmech6020026>
- 13 Reznikov A. N. Heat Physics of Cutting // Moscow: Mashinostroenie, 1969. – P. 288.
- 14 Talantov N. V. Influence of Cutting Speed on Patterns of Contact Processes and Tool Wear // Prospects for the Development of Cutting of Structural Materials. – Moscow, 1980. – P. 77–83.
- 15 Chichinadze A.V. Temperature Regime during Friction of Tool Materials Considering the Heat Source Volume / A.V. Chichinadze, K.G. Shuchev, A.A. Ryzhkin, A.I. Filipchuk, M. M. Klimov // Friction and Wear, 1986. - No. 7. – P. 43–51.

© Марченко А. А., 2025



2.5.5 – технология и оборудование
механической и физико-технической
обработки

**ОБЗОР ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ
ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ
ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ
ПОКРЫТИЙ**

✉¹ Кадырметов Анвар Минирович,
д.т.н., профессор кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: kadymetov.a@mail.ru

Дроздов Игорь Геннадьевич,
д.т.н., профессор, проректор по взаимодействию с промышленными предприятиями, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Сухочев Геннадий Алексеевич,
д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: suhotchev@mail.ru

Смольянникова Евгения Геннадьевна,
к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: sm.evgeniya@gmail.com

Попов Дмитрий Анатольевич,
к.т.н., доцент кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Пустовалов Алексей Сергеевич,
ассистент кафедры машиностроительных технологий Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

**OVERVIEW OF WAYS TO INCREASE
THE THERMAL EFFICIENCY
OF PLASMA TORCHES FOR
PLASMA COATING PROCESSES**

✉¹ Kadymetov Anvar Minirovich,
doctor of technical sciences, professor of the department of mechanical engineering technologies, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: kadymetov.a@mail.ru

Drozdov Igor Gennadievich,
doctor of technical sciences, professor, vice-rector for cooperation with industrial enterprises, professor of the department of rocket engines, Voronezh state technical university, Voronezh.

Sukhochev Gennady Alekseevich,
doctor of technical sciences, professor of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: suhotchev@mail.ru

Smolyannikova Evgeniya Gennadyevna,
candidate of technical sciences, associate professor, department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, e-mail: sm.evgeniya@gmail.com

Popov Dmitry Anatolyevich,
candidate of technical sciences, associate professor, department of mechanical engineering technology, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Pustovalov Alexey Sergeevich,
assistant professor at the department of mechanical engineering technologies, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Попов Петр Николаевич,
аспирант, Воронежский государственный
лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж

Popov Petr Nikolaevich,
graduate student, Voronezh state forestry university
named after G.F. Morozov, Voronezh

Аннотация. Представлен обзор вопросов энергетической эффективности электродуговых плазмотронов линейной схемы для нанесения покрытий. Рассмотрены плазмотроны с самоустанавливающейся длиной дуги, меньшей (с уступом) и большей самоустанавливающейся (с межэлектродными вставками) длины дуги. Показаны актуальность изучения и схемы плазмотронов с многоводным введением порошка в канал плазмотрона и плазменную струю, тенденция комбинирования многодуговых плазмотронов из линейных модулей, позволяющих увеличить мощность плазмотрона и уменьшить эрозию катодов. Представлена проблемность вопроса разработки методики выбора схемы и конструкции плазмотрона.

Annotation. An overview of the issues of energy efficiency of electric arc plasma torches of a linear circuit for coating is presented. Plasma torches with a self-aligning arc length, shorter (with a ledge) and longer self-aligning (with interelectrode inserts) arc lengths are considered. The relevance of studying and schematics of plasma torches with multi-water injection of powder into the plasma torch channel and plasma jet, the tendency of combining multi-arc plasma torches from linear modules, allowing to increase the power of the plasma torch and reduce the erosion of cathodes, is shown. The problematic issue of developing a methodology for selecting a plasma torch circuit and design is presented.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМОТРОН, ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, КОМБИНИРОВАННЫЙ ПЛАЗМОТРОН, МИКРОПЛАЗМОТРОН, МНОГОВОДНЫЙ ПЛАЗМОТРОН, МЕЖЭЛЕКТРОДНЫЕ ВСТАВКИ.

Keywords: ELECTRIC ARC PLASMA TORCH, THERMAL EFFICIENCY, COMBINED PLASMA TORCH, MICROPLASMA TORCH, MULTI-INPUT PLASMA TORCH, INTERELECTRODE INSERTS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Актуальность, постановка вопроса, план обзора

На поверхностях деталей машин в различных отраслях промышленности, транспортной, сельскохозяйственной, лесной, строительно-дорожной и др. техники используются различные защитные и функциональные покрытия. К прогрессивным методам получения таких покрытий относится широко используемые методы плазменного нанесения покрытий и, в частности, плазменное напыление, являющееся одним из наиболее универсальных методов и позволяющее наносить наиболее широкую номенклатуру материалов на различные детали. Объем мирового рынка технологий плазменного напыления непрерывно растет [1]. Вопросам совершенствования плазменного напыления покрытий и плазмотронов как инструмента этого процесса посвящены многие работы ведущих зарубежных и российских научных школ: института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН [2-7], института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН [8-14], Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [15-18], института металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН [19-20], Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана [21-23] и др.

Однако существенными недостатками данной технологии являются низкие тепловой и общий КПД процесса. Энергетическая эффективность плазменного нанесения покрытий определяется значениями теплового КПД плазмотрона η_t , энергетическим КПД плазменного напыления η_ϑ , коэффициентом использования материала η_m и общим энергетическим КПД $\eta_{\text{общ}}$:

$$\eta_t = 1 - Q_p / E_d; \quad \eta_\vartheta = E_q / E_d; \quad \eta_m = M_p / M_n; \quad \eta_{\text{общ}} = \eta_\vartheta \cdot \eta_m; \quad Q_p = Q_l + Q_k + Q_t,$$

где E_d – энергия, выделяемая дугой за время t ; Q_p – суммарные тепловые потери в элементы плазмотрона; E_q – энергия, передаваемая частицам за время t ; M_p, M_n – масса покрытия и расходуемого порошка соответственно; Q_l, Q_k, Q_t – тепловые потери в элементы плазмотрона излучением дуги и нагретого газа, конвективным теплообменом между нагреваемым газом и поверхностями разрядной камеры и теплопроводностью в опорных пятнах дуги соответственно.

Известно, что лучистые потери Q_l не превышают 2 %, кондуктивными потерями можно пренебречь при напряжениях дуги, меньших 200 В, и тепловой КПД плазмотронов линейной схемы в основном определяется конвективным теплообменом [24].

Общий КПД процесса плазменного напыления до сих пор составляет всего лишь 3-5 %, что является его главной практической и научной проблемой. Это определяет цель информационного поиска, заключающегося в нахождении путей повышении энергетической и общей эффективности плазменного нанесения и упрочнения покрытий за счет совершенствования плазмотрона путем повышения его энергетического КПД и развития в отношении увеличения количества одновременно вводимых компонентов в плазменный поток плазмотрона (рис. 1) [15].



Рисунок 1 – Составляющие тепловой эффективности плазменного напыления

Решение данной проблемы обеспечивает актуальность решения проблемы и предполагает, прежде всего, выбор и оптимизацию типа и параметров конструкции плазмотрона, чему посвящено множество исследований, анализ которых представлен ниже и соответствует плану информационного поиска:

- 1) Состояние проблемы тепловой эффективности дуговых плазмотронов для плазменного напыления.
- 2) Анализ теплофизической эффективности схемных решений плазмотронов для плазменного напыления и выбор оптимальных вариантов.
- 3) Исследования газодинамических процессов при модуляции электрических параметров.
- 4) Теплофизические вопросы повышения тепловой эффективности плазмотронов.

2 Состояние проблемы эффективности плазмотронов для процессов плазменного нанесения покрытий

2.1 Состояние проблемы тепловой эффективности дуговых плазмотронов для плазменного напыления

Качество покрытий, получаемых плазменным напылением, и энергетическая эффективность плазменного напыления определяются множеством факторов, которые при прочих равных условиях в конечном итоге сводятся к конструктивным факторам плазмотрона и энергетическим факторам напыляемых частиц (температурам и скоростям) в момент удара их о подложку [25]. Общая схема структурно-следственной связи факторов и критериев плазменного нанесения и упрочнения покрытий, иллюстрирующая это, представлена на рис. 2. Согласно этой схеме роль плазмотрона состоит в формировании и упрочнении покрытия и реализуется в 1-м этапе – в формировании потока частиц с оптимальными выходными параметрами (скорости и температуры газовой и дисперсной фаз, энтальпии плазменной струи, структуры и химического состава частиц, их гранулометрического состава и концентрации в потоке). Выбор плазмотрона определяется, в первую очередь, схемным решением дуговых плазмотронов.

2.1.1 Анализ схемных решений дуговых плазмотронов для плазменного напыления

Генерация плазмы в плазмотронах с помощью нагрева электрической энергией по сравнению с другими видами нагрева газа, например, с помощью высокочастотного или сверхвысокочастотного излучения, оптического излучения, имеет ряд неоспоримых преимуществ [21]. В электродуговых плазмотронах для получения плазмы могут быть использованы практически любые вещества. Плазмотроны обладают широкими возможностями нагрева плазмы газов. Среднемассовая температура струи на выходе из плазмотрона составляет $(4 \dots 6) \cdot 10^3$ К для двухатомных и многоатомных газов и $(1 \dots 2) \cdot 10^4$ – для одноатомных газов [2]. Установки с плазмотронами относительно просты в обслуживании, их производство базируется на хорошо развитых отраслях электромашиностроения, что облегчает внедрение плазменных устройств в современную технику.

Многообразие существующих электродуговых плазмотронов образует и многообразие признаков классификации, каждый из которых характеризует особенности, свойства и эффективность плазмотрона. Классификация плазмотронов по схеме подачи плазмообразующего газа относительно дуги подразделяются на плазмотроны поперечных и осевых схем подачи газа (рис. 3) [2]. Плазмотроны поперечных схем для обеспечения равномерности прогрева газа работают при высокой частоте вращения дуги вокруг электрода и, как следствие, при высоком давлении, доходящем до 6,5 МПа и выше, что приводит к дополнительным сложностям в отношении практического применения технологии, обусловленным необходимостью использования дополнительных агрегатов высокого давления и обеспечения повышенных мер безопасности [26].

Вследствие указанной проблемы гораздо большее распространение получили плазмотроны осевых или линейных схем. Применение данных плазмотронов обусловлено также их преимуществами. Во-первых, такие плазмотроны позволяют переводить режимы их работы с горения косвенной дуги (режим плазменной струи) на режимы горения прямой дуги, либо на режимы горения двух дуг (прямой и косвенной) [2]. Во-вторых, данные плазмотроны обеспечивают возможность получения максимально возможного тепломассообмена между плазменной дугой и обдуваемым ею газом, приводящем к максимальному тепловому КПД плазмотрона [2]. В-третьих, к числу достоинств плазмотронов линейной схемы относится возможность работы как на высоких мощностях, так и на малых, позволяющих проектировать миниатюрные плазмотроны – микроплазмотроны [27]. Последние позволяют минимизировать теплоподвод к деталям, что особенно актуально для малогабаритных деталей.

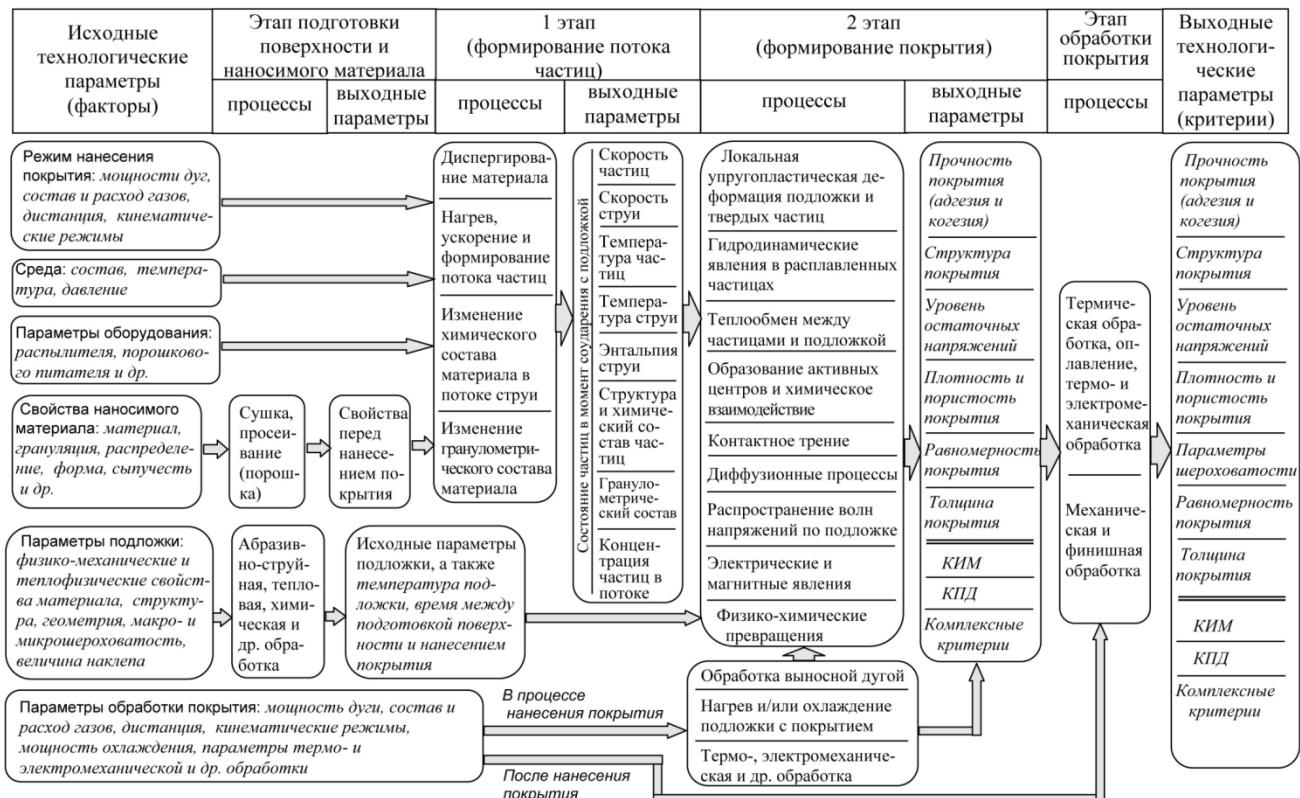
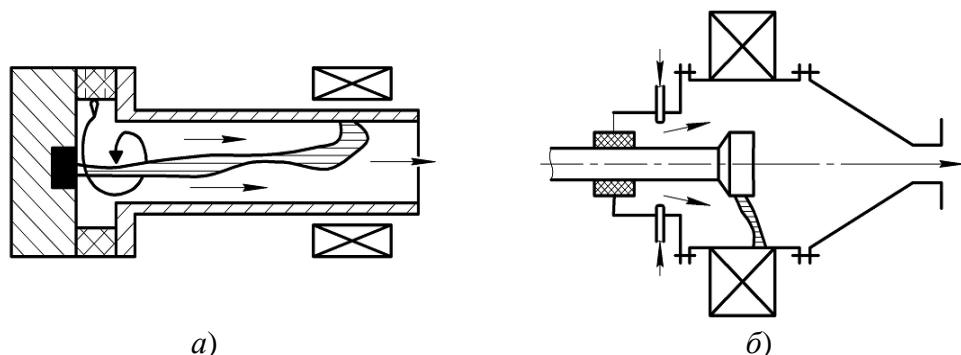


Рисунок 2 – Схема структурно-следственной связи факторов и критериев плазменного нанесения и упрочнения покрытий



a, b – продольная и поперечная подача газа соответственно

Линейные электродуговые генераторы плазмы обладают многообразием конструктивных схем. Выбор той или иной схемы плазмотрона определяется критериями, которые к нему предъявляются, и влияющими на него факторами. К основным критериям относятся потребная температура нагрева газа и степень чистоты потока плазмы, мощность дугового разряда, эффективность нагрева газа (тепловой КПД плазмотрона) и напыляемых частиц (общий КПД процесса), ресурс работы, требования по пространственной и временной однородности плазменного потока, технологические и габаритные требования и др. [2]. К основным факторам относятся параметры конструкции плазмотрона, род газа, свойства напыляемого материала, давление в разрядной камере, режимные параметры.

Для линейных плазмотронов, предназначенных для плазменного напыления или же имеющих технологические возможности их переоборудования под напыление, классификацию

обычно представляют по признакам, определяющим основные характеристики организации процесса в плазмотроне, включая варианты рекуперации тепла при охлаждении плазмотрона, и характеристики ввода материала напыления. К признакам, определяющим основные характеристики организации процесса и тепловой КПД плазмотрона, относят (рис. 4, 5, табл. 1) [2]:

- длину дуги;
- способ пространственной стабилизации дугового разряда;
- условия, влияющие на интенсивность эрозии электродов в зоне действия опорных пятен дуги;
- место и конструктивные особенности ввода материала напыления.

По признаку стабилизации дуги плазмотроны можно разделить на группы:

- 1) со стабилизацией дуги стенками разрядной камеры;
- 2) с газовихревой стабилизацией дугового разряда;
- 3) со стабилизацией дуги внешним магнитным полем;
- 4) со стабилизацией дугового разряда электродами;
- 5) со стабилизацией по комбинированным схемам.

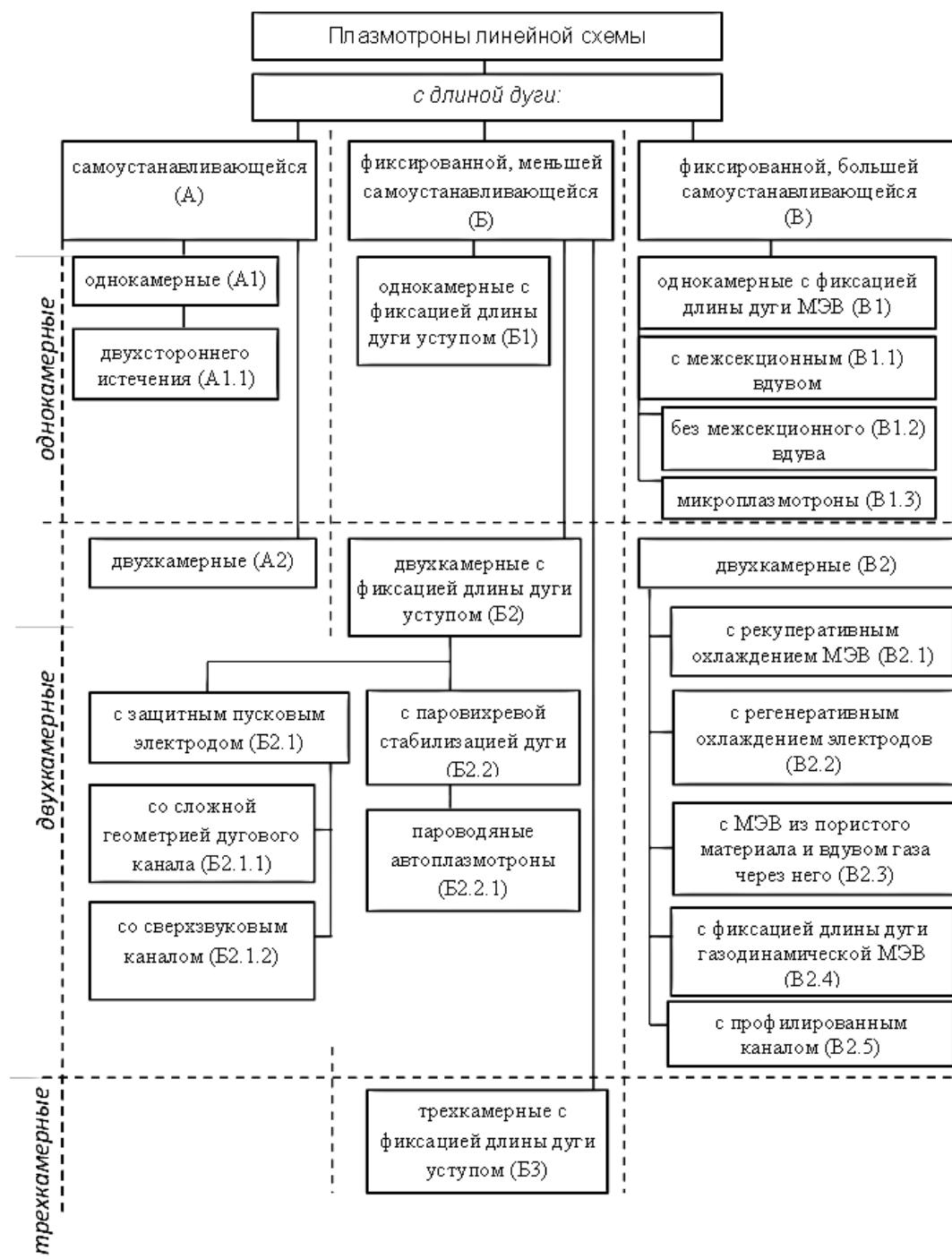
По признаку, связанному со снижением эрозии электродов, плазмотроны подразделяются на две группы:

- 1) с неподвижным опорным пятном дуги на горячем катоде;
- 2) с подвижными дуговыми пятнами, когда приэлектродные участки дуги перемещаются под действием аэродинамических или электродинамических сил (или обеих сил одновременно).

Данная классификационная схема дополняется другими определяющими признаками:

– род тока – постоянный или переменный промышленной частоты. Использование постоянного тока в плазмотронах объясняется, прежде всего, физической особенностью дуги, заключающейся в том, что на аноде дуги выделяется большее количество тепла, чем на катоде. Тепловая мощность, выделяемая в электроде плазмотрона, в отличие от плавящегося электрода сварочной дуги, является не только бесполезной, но и вредной. Наименьшую тепловую нагрузку при использовании постоянного тока несет электрод, являющийся катодом. Предельно допустимая токовая нагрузка на лантанированный вольфрамовый электрод на переменном токе примерно в два раза, а на обратной полярности при использовании постоянного тока, в десять раз ниже, чем на прямой полярности. Поэтому плазмотроны постоянного тока прямой полярности имеют наиболее высокий коэффициент использования полезной мощности [28]. Столб интенсивно сжатой дуги должен быть жестко стабилизирован по оси электрода и сопла плазмотрона. При смене полярности электрода эта стабилизация нарушается, поэтому дугу переменного тока сжать труднее, чем дугу постоянного тока. Это обеспечивает важное преимущество плазмотронов постоянного тока по сравнению с плазмотронами переменного тока, заключающееся в высокой стабильности горения дуги. Прохождение тока через нуль при смене направления может вызвать погасание дуги, поэтому обычно напряжение холостого хода источника питания переменным током не менее чем вдвое превышает рабочее напряжение дуги. При питании плазмотронов постоянным током можно достичь отношения напряжения дуги к напряжению холостого хода U_d/U_{xx} , равного 0,8-0,9. Следовательно, при одинаковой мощности дуги установленная мощность и габариты источника постоянного тока меньше, чем мощность и габариты источника переменного тока. Кроме того, источник постоянного тока обеспечивает равномерную загрузку трехфазной сети. Плазмотроны переменного тока имеют существенные проблемы их использования, связанные с поджигом дуги и дальнейшим поддержанием горения, и особенно управлением процессами [29];

- род нагреваемого газа – инертный, восстановительный, окислительный;
- тип катода – горячий или холодный;
- технологическое назначение – прямого (одно опорное пятно дуги горит на обрабатываемом металле) и косвенного (генерация плазменной струи) действия.



МЭВ – межэлектродные вставки в канале плазмотрона

Рисунок 4 – Классификация плазмотронов линейной схемы по признакам фиксации длины дуги и количества камер [2]

Основные схемы электродуговых генераторов термической плазмы включают многие из вышеперечисленных признаков и групп плазмотронов. Выбор принципиального конструктивного решения плазмотрона определяет качество и уровень физических явлений в разрядной камере, оптимизация которых позволит повысить тепловой и общий КПД процесса плазменного напыления.

Таким образом, вследствие сложности применения плазмотронов поперечной или продольной схем подачи газа гораздо большее распространение получили плазмотроны осевых

или линейных схем. Для этих линейных схем плазмотронов просто реализуется работа в режимах косвенной и прямой дуги с возможностью работы в широком диапазоне мощностей от высоких до малых для микроплазмотронов и обеспечением высокого теплового КПД. Для линейных плазмотронов целесообразным по сравнению с переменным током является использование постоянного тока, обеспечивающего высокую стабильность горения дуги. Дальнейший выбор схемного решения плазмотрона определяется вариантом стабилизации дуги в работе, схемой подачи материала в плазменный поток или струю и др. параметров.

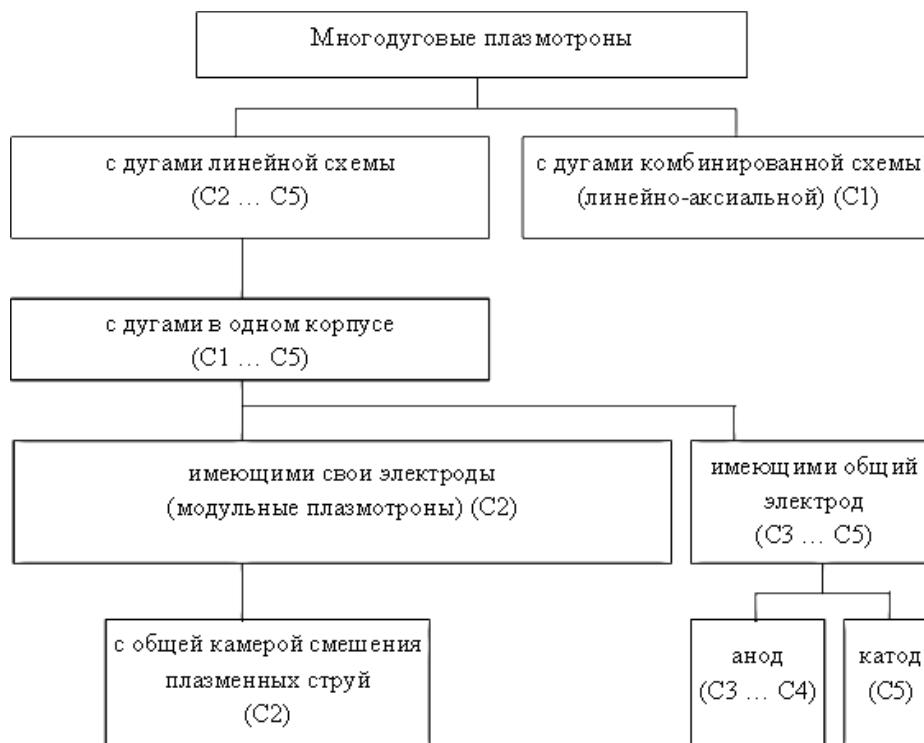


Рисунок 5 – Классификация многодуговых плазмотронов

Схемы плазмотронов с самоустанавливающейся длиной дуги (A) согласно рис. 4 представлены в табл. 1.

В большинстве случаев в плазмотронах данной группы для пространственной стабилизации дуги в разрядной камере используется закрученный поток газа, поэтому они называются плазмотронами с газовихревой стабилизацией дуги.

Такими плазмотронами оснащались серийные установки УПУ-ЗД, УМП-5-68 (СССР), Metco (США, Германия, Италия), Plasmatechnik, Snecma (Швейцария), Plasmadyne, TAPA, Miller Thermal Inc. (США) и др.

Закрутка газового потока в таких плазмотронах осуществляется с помощью вихревой камеры (одной или нескольких), в которой вращательный импульс сообщается газу за счет его тангенциального ввода в разрядную камеру. Столб дуги стабилизируется по оси трубчатого электрода из-за градиента давления в вихре. С ростом тока длина дуги уменьшается. Напряжение на разряде для аргона невысокое – 30 ... 100 В. Вольтамперная характеристика (ВАХ) дуги имеет падающий вид [6]. Для получения мощности плазмотрона, достаточной для качественного напыления при использовании в качестве плазмообразующего газа аргона или азота, необходимы большие токи (300 ... 500 А) [30]. При этом ресурсы работы стержневого вольфрамового катода и выходного электрода-анода существенно уменьшаются. При использовании в качестве плазмообразующего газа воздуха и его смесей с углеводородными газами и при сопоставимой мощности дуги величина силы тока меньше (100 ... 200 А), однако в этом случае повышена скорость эрозии электродов вследствие окислительного воздействия на них

кислорода воздуха. В связи с этим в качестве материала катода используется цирконий или гафний, что позволяет повысить его ресурс [3].

Таблица 1 – Плазмотроны линейной схемы с самоустанавливающейся длиной дуги

Название плазмотрона, источник	Особенности, схема
A1 Плазмотроны однокамерные (типа ЭДП-104, ЭДП-107 [30])	
A1.1 Плазмотроны двухстороннего истечения [3]	
A2 Плазмотроны двухкамерные (ПТ-74А, ПТ-84)	

Однокамерные плазмотроны (схема А1, табл. 1), с несколькими камерами (схема А2, табл. 1) и плазмотроны двухстороннего истечения (схема А1.1 табл. 1) могут иметь в качестве катодов не только запрессованные в медную обойму стержни вольфрама, циркония, или гафния, но и полые медные электроды. Использование последних существенно уменьшает их ресурс, и поэтому требует интенсивного охлаждения, что приводит к низкой величине теплового КПД.

Таким образом, наибольшее распространение среди этой группы плазмотронов получила схема газовихревой стабилизации дуги. Выгодно использование газовоздушных смесей с углево-

дородными газами с точки зрения энергетической эффективности с учетом дешевизны газов, простоты регулирования коэффициента избытка кислорода, высокой равномерности температурных и скоростных полей в поперечных сечениях плазменных потоков и струй, а также высокой степенью теплопередачи от газовой фазы к дисперсной [30]. Для этого требуются жаростойкие материалы катодов, такие как цирконий и гафний в виде вставок в медные втулки.

Схемы плазмотронов с фиксированной длиной дуги, меньшей самоустановливающейся (Б) (см. рис. 4) представлены в табл. 2.

Плазмотронами группы Б (табл. 2) оснащались серийно выпускаемые комплектные установки для напыления типа УМП-7, УПУ-7 и Киев-7 (СССР). Для установок типа УМП-7, УПУ-7 в качестве плазмообразующих газов используются аргон, азот и смеси с добавлением водорода, для установок типа Киев-7 – воздух, природный газ и их смеси. В отличие от плазмотронов с самоустановливающейся длиной дуги последние позволяют существенно (во много раз) снизить пульсации скорости и температуры плазменной струи [2]. Это наиболее простой способ поддержания необходимого напряжения на дуге.

Внезапное расширение канала создает условия преимущественного шунтирования дуги непосредственно за зоной срыва потока и обеспечивает постоянство ее средней длины в достаточно широком диапазоне изменения определяющих параметров, таких как ток дуги, расход газа и давление [30].

Качественно новой особенностью вольт-амперной характеристики по сравнению с дугой с фиксированной длиной является наличие наряду с падающей ветвью еще и восходящей. Это обеспечивает устойчивое горение дуги в точке пересечения электрических характеристик дуги и источника питания без балластного сопротивления в цепи даже при «жесткой» характеристике источника питания. Вольт-амперная характеристика дуги, если не приняты особые меры, лежит, как правило, ниже вольт-амперной характеристики дуги, горящей в плазмотроне с самоустановливающейся длиной дуги. Если элемент выходного электрода до уступа электрически изолировать от электрода большего диаметра, то часть восходящей ветви будет лежать над вольт-амперной характеристикой дуги с самоустановливающейся длиной.

В подгруппе Б2.1 (табл. 2) отличием от других схем плазмотронов является то, что для зажигания дуги используется защитный пусковой электрод – диафрагма.

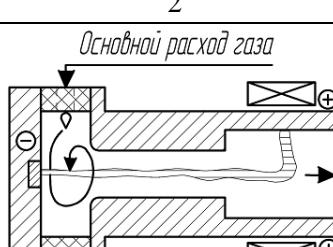
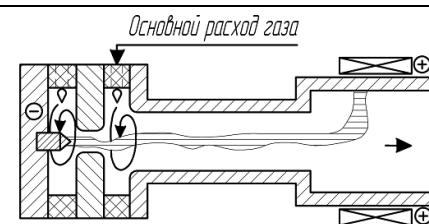
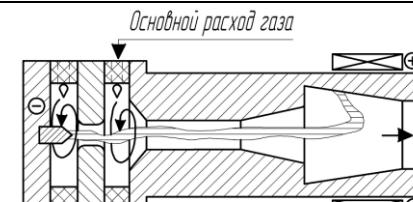
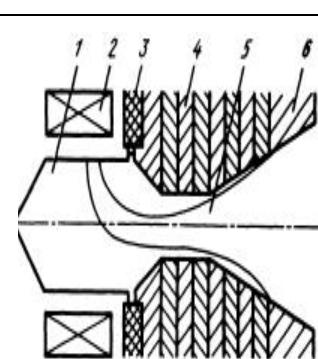
В схеме Б2.1.1 (табл. 2) возрастает эффективность воздействия на напряженность электрического поля, что позволяет формировать вольт-амперную характеристику дуги желаемой формы, что повышает эффективность нагрева конвертированного природного газа таким плазмотроном [30].

В схеме Б2.1.2 (табл. 2) используются сверхзвуковые плазмотроны [24]. Данная конструкция позволяет осуществлять диффузную привязку дуги на аноде. Проблемой является низкая температура частиц из-за малого времени пребывания в потоке. Плазмотроны подгруппы Б2.1.1 (табл. 2) имеют схемный аналог с профилированным анодным каналом – плазмотрон типа ПУН-1 (группа В2.5) (табл. 3) [25]. Плазмотрон ПУН-1 отличается от плазмотронов схемы Б2.1.1 наличием ступенчатого выходного электрода, имеющего сложную геометрию дугового канала со ступенчатым расширением и последующим сужением в его конце. Такая сложная геометрия разрядного канала способствует формированию восходящей вольт-амперной характеристики и диффузной привязки дуги на аноде (при наличии сверхзвукового течения газа) [24]. В другой конструкции [33] повышение энталпии дуговой плазмы, снижение уровня турбулентности и аэродинамического шума достигается за счет сброса пристеночного непрогретого в дуге газа с большой окружной скоростью в атмосферу из прианодного участка канала большего диаметра. У такого плазмотрона газ не полностью используется по назначению, и это снижает общий КПД процесса напыления.

Паровихревые плазмотроны, схема которых представлена в группе Б2.2 (табл. 2) [3], предназначены для нагрева водяного пара и имеют трудности, связанные с некоторыми особенностями рабочего тела и, в первую очередь, с конденсацией его на относительно холодных

поверхностях начального участка электродугового канала. В данном случае требуются дополнительные исследования, т.к. водяная пленка будет забирать на себя тепло от лучистого теплового потока и преобразовывать эту энергию в парообразование, а это может повысить КПД. Наличие капель приводит к преждевременному шунтированию «дуга-стенка» и, следовательно, к значительным пульсациям напряжения и тока дуги, приводящим к повышенной эрозии электродов, уменьшению мощности дуги и т.д. Присутствие на начальном участке канала в виде межэлектродной вставки подожмёт плазменный столб, отделил начальную часть дуги от жидкости, будет способствовать повышению температуры в потоке, что необходимо для предотвращения конденсации пара на начальном участке канала.

Таблица 2 – Плазмотроны линейной схемы с фиксированной длиной дуги, меньшей самоустанавливающейся

Обозначение плазмотрона согласно рис. 4	Схема
1	2
Б1 Плазмотроны однокамерные с фиксацией длины дуги уступом (ЭДП-104А [30])	
Б2.1 Плазмотроны двухкамерные с защитным пусковым электродом (А. с. №170270; пат. США. №3676638)	
Б2.1.1 Плазмотроны двухкамерные со ступенчатым выходным электродом со сложной геометрией дугового канала [30]	
Б2.1.2 Сверхзвуковые плазмотроны [24]	<p>Схема плазмотрона с электрической дугой в сверхзвуковом канале:</p> <p>1 – катод; 2 – соленоид; 3 – ввод рабочего газа; 4 – шайбы; 5 – дуга; 6 – анод-сопло</p> 

Продолжение табл. 2

1	2
Б2.2 Плазмотроны с паровихревой стабилизацией дуги (ЭДП-145 [30])	
Б2.2.1 Пароводяные автоплазмотроны [31; 32]	
Б3 Плазмотроны трехкамерные с фиксацией длины дуги уступом [3]	

Здесь необходимы исследования о влиянии данной конструкции на снижение теплового КПД плазмотрона. Предположительно устранение этого недостатка достигается путем снижения теплосъёма охлаждающей жидкостью и увеличением теплового сопротивления стенки канала на некотором расстоянии от входа.

Для обеспечения стабильной работы паровихревых плазмотронов необходимо выполнение следующих требований [3]:

1. Пар должен быть сухим и перегретым до 250 ... 350 °C.
2. Пульсации расхода пара на входе в электродуговую камеру не должны превышать 5 %. Для этого подготовка водяного пара осуществляется в прямоточном парогенераторе, на выходе которого располагается демпфер.
3. Температура стенок вихревой и электродуговой камеры должна быть выше температуры насыщения пара. Несоблюдение всех трех требований приводит к конденсации пара на поверхности разрядной камеры и нарушению режима горения дуги.
4. Перед работой на водяном паре плазмotron должен быть прогрет до температур выше температуры насыщения пара. Прогрев конструкции осуществляется путем кратковременной работы плазмotronа на предварительно подогретых и неконденсирующихся при нормальных условиях газах.

Паровихревые плазмотроны предназначены, прежде всего, для подогрева большого количества газа и различных материалов. Из-за наличия внешнего источника пара общий КПД процесса ниже, чем у аналогичных плазмотронов, использующих плазмообразующие газы, из-за затрат большого количества энергии для перегрева пара и его транспортировки. Наряду с посадкой сухого и перегретого пара в плазмotron, существуют так называемые автоплазмотроны,

не требующие внешнего источника пара, и которые работают со встроенным в стенку парогенератором, вырабатывают плазмообразующий водяной пар за счет тепловых потерь [31].

К паровым плазмотронам также относятся жидкостные плазмотроны, производящие пар с помощью разогрева и испарения жидкости в электродуговой камере плазмотрона. В основном, они применяются для пайки, резки и сварки деталей из различных материалов. Примерами могут служить плазмотроны мобильных установок типа «Плазар», «Мультиплаз». Достоинством данных плазмотронов является возможность получать нужный состав плазмы путем ввода разнообразных растворов в плазмообразующую среду и создавать тем самым ещё и тонкие защитные пленки. Однако для напыления данные плазмотроны конструктивно не доработаны, и имеют недостаток, обусловленный высокой окисляющей активностью водяной плазмы по отношению к напыляемому материалу.

Пароводяные автоплазмотроны схемы Б2.2.1 (табл. 2) с внешним генератором пара представляют собой плазмотроны второго поколения [31-32]. Устранение внешнего парогенератора сильно упрощает эксплуатацию паровихревых плазмотронов. Полноту регенерации тепла характеризует коэффициент регенерации, представляющий собой отношение количества регенерируемой тепловой энергии ко всей энергии, излучаемой дугой в стенки камеры. Тепловой КПД автоплазмотрона с полной регенерацией тепла близок к единице. В таких автоплазмотронах система охлаждения полностью совмещена с системой парогенерации. Надежность охлаждения наиболее теплонапряженных электродных узлов требует принятия специальных приемов, например использования капиллярных структур. При работе плазмотрона в высокоэнтальпийных режимах одного регенеративного охлаждения может оказаться недостаточно; тогда необходимо дополнительное использование и внешнее охлаждение.

Энталпия водяной плазмы, генерируемая автоплазмотроном, зависит от теплового КПД (η), полноты регенерации и эффективности теплового охлаждения стенок электродуговой камеры. В любом случае тепловой КПД автоплазмотрона, работающего с регенерацией, всегда больше КПД плазмотрона без регенерации, но с идентичной проточной частью. Работа автоплазмотрона с заданным коэффициентом регенерации обеспечивается регулировкой системы подачи парогенераторной воды. Это очень важная проблема развития водяных автоплазмотронов.

Таким образом, плазмотроны схем с фиксированной длиной дуги, меньшей самоустанавливающейся, обеспечивают простой способ поддержания необходимого напряжения на дуге в достаточно широком диапазоне изменения определяющих параметров, таких как ток дуги, расход газа и давление. При этом в сравнении с плазмотронами схемы с самоустанавливающейся длиной дуги позволяют существенно (во много раз) снизить пульсации скорости и температуры плазменной струи. Схема позволяет реализовать сверхзвуковые плазмотроны. Паровихревые плазмотроны позволяют повысить КПД за счет использования воды в качестве охладителя стенок канала дуги с рекуперацией энергии на образование пара. Водяной пар позволяет получить высокую температуру плазмы до 50 тыс. градусов, что дает широкие технологические возможности использования такого плазмотрона. Однако у них есть и свои ранее отмеченные недостатки.

Схемы плазмотронов с фиксированной средней длиной дуги, большей самоустанавливающейся (B) (см. рис. 4) представлены в табл. 3

У плазмотронов подгруппы В1.1 межэлектродная вставка (МЭВ) набирается из секций (чаще всего медных), электрически изолированных друг от друга и от электродов. В силу этого все секции находятся под некоторым потенциалом относительно нейтрали, причем каждая секция имеет свой потенциал. Вдув газа в межсекционный зазор обеспечивает вентиляцию зазора и снижение тем самым тепловых потерь, защищает стенки камеры от конвективного теплового потока, увеличивает электроизоляционную прочность газового промежутка, устраняет при определенных условиях межсекционный пробой [2].

Распределение расхода газа по межсекционным зазорам может осуществляться различными способами – постановкой шайб с критическими сечениями или индивидуальным вдувом

через каждую щель или группу щелей. Конкретное решение определяется многими факторами, в том числе, и давлением в электродуговой камере.

Плазмотроны с МЭВ допускают управление напряжением дуги и турбулизацией потока газа на начальном участке канала. Вольт-амперная характеристика дуги может иметь как падающий, так и возрастающий участок [24].

У плазмотронов подгруппы В1.2 (табл. 3) МЭВ конструктивно выполнены в виде набора изолированных между собой коротких металлических охлаждаемых секций без вдува газа между ними. Система МЭВ эффективно работает в диапазоне токов дуги, при которых суммарная длина вставок больше длины самоустанавливающейся дуги. При этом, благодаря увеличению средней длины дуги падение напряжения на ней больше, чем в плазмотронах с самоустанавливающейся дугой при одинаковых расходе газа, силе тока разряда, давлении в камере и диаметре каналов. Это означает, что в дугу можно вложить большую мощность и получить более высокую температуру газа. Каждая секция МЭВ при горении дуги принимает потенциал, равный среднему потенциальному дуги в пределах длины секции. Недостатками могут служить повышенные тепловые потери в секциях при их большом количестве.

Плазмотроны подгруппы В1.3 (табл. 3) характеризуются наличием межэлектродной вставки с единичной секцией и острым вдувом плазмообразующего газа без его закрутки в камеру плазмотрона [34]. Данные плазмотроны применяются для напыления на тонкостенные детали тугоплавких пористых покрытий с использованием инертных газов, например, аргона. Преимущества – используют для особо тонких подложек и для получения покрытий с особыми свойствами. Недостатки – забивание сопла в зоне подачи порошка в канал плазмотрона, низкий тепловой КПД, низкий ресурс электродов из-за перегрева.

В группу В2 (табл. 3) входят плазмотроны с секционированной МЭВ (примеры – патент РФ №2225084, а.с.№503601). Характерной особенностью данных плазмотронов является, во-первых, наличие в их МЭВ двух электроизолированных от электродов секций, во-вторых, наличие узла подачи потока транспортирующего газа с порошком, предназначенным для напыления, через конусообразный канал, образованный между секциями межэлектродной вставки, в направлении к анодному узлу. Частицы порошка независимо от их размеров и массы попадают в центральную (приосевую) зону дугового разряда и захватываются плазменным потоком под действием вязкостных сил. В случае, если обрабатываемая деталь является анодом, то конечная секция МЭВ играет роль направляющего сопла и при этом возможен комбинированный процесс наплавки-напыления покрытий, что ещё раз подтверждает целесообразность выбора плазмотронов линейной схемы.

В схеме В2.1 (табл. 3) рекуперация тепла МЭВ позволяет поднять КПД плазмотрона до 90 %, такой плазмotron наиболее эффективен при работе с выносной дугой на сверхзвуковом режиме [30].

Плазмотроны подгруппы В2.2 и В2.3 (табл. 3) исследовались в 1980-х годах и были отработаны под конкретные рабочие газы и заданный диапазон мощностей [2]. Основным достоинством данных плазмотронов является возможность полной рекуперации тепловой энергии. Недостатки данных плазмотронов, обусловленные использованием пористых материалов, заключаются в трудности их изготовления, в проблеме повторяемости результатов из-за сплавления и забивания пор, в необходимости использования высокого давления и расхода подачи плазмообразующих газов, в неравномерности расхода газа через вставку по ее длине. Все эти недостатки не позволяют сделать выбор в пользу транспирационной конструкции. Плазмотроны В2.2 с полной рекуперацией тепла имеют те же преимущества что и В2.3, но их использование приводит к технологическим и экономическим сложностям.

Таблица 3 – Плазмотроны линейной схемы с фиксированной длиной дуги, большей самоустанавливающейся

Обозначение плазмотрона согласно рис. 4	Схема
1	2
B1.1 Однокамерные плазмотроны с фиксацией длины дуги МЭВ с межсекционным вдувом газа (ЭДП-119 [30])	
B1.2 Плазмотроны с фиксацией длины дуги МЭВ без межсекционного вдува газа (тип - ПН-6)	
B1.3 Однокамерные микроплазмотроны с фиксацией длины дуги одной секцией МЭВ [34]	
B2 Двухкамерные плазмотроны с фиксацией длины дуги МЭВ, защитным пусковым электродом (и дополнительной камерой) (Патент RU 2225084)	

Продолжение табл. 3

1	2
<p>B2.1 Плазмотроны с рекуперативным охлаждением МЭВ [30]</p>	
<p>B2.2 Плазмотроны с регенеративным охлаждением электродов [35]</p>	
<p>B2.3 Плазмотроны с фиксацией длины дуги МЭВ из пористого материала и вдувом газа через него (тип – ППЭД-0,3)</p>	
<p>B2.4 Плазмотроны с фиксацией длины дуги газодинамической МЭВ (тип - ЭДП-118Е [30])</p>	
<p>B2.5 Плазмотрон с профилированным каналом ПУН-1 [30]</p>	

Плазмотроны подгруппы В2.4 (табл. 3) также имеют электродные узлы, аналогичные узлам плазмотронов групп, представленных выше. Отличительной особенностью данных плазмотронов является наличие в них вихревой камеры, в которой при определенных соотношениях газодинамических параметров подаваемых в плазмотрон газов, формируется газовихревой поток, в приосевой зоне которого образуется устойчивая цилиндрическая поверхность с нулевой радиальной скоростью ($v = 0$). Это означает отсутствие массообмена между приосевым течением газа и основным потоком, поэтому потери тепла в этой зоне определяются в основном излучением [3]. Диаметр такой поверхности может быть взят в качестве характерного диаметра электродуговой камеры, которая имеет достаточно большие габариты и не может быть использована в миниатюрных плазмотронах.

В схеме В2.5 (табл. 3) отличием плазмотрона ПУН-1 от плазмотронов схемы Б2.1.1 (табл. 2) является наличие ступенчатого выходного электрода, имеющего сложную геометрию дугового канала со ступенчатым расширением и последующим сужением в его конце. Такая сложная геометрия разрядного канала способствует формированию восходящей вольт-амперной характеристики и диффузной привязки дуги на аноде (при наличии сверхзвукового течения газа) [24], что способствует повышению теплового КПД, однако низкое тепловложение в порошок (подача его под срез сопла) и потери тепла в стенки нивелируют данное повышение КПД.

Схемы многодуговых плазмотронов «С» (см. рис. 5) представлены в табл. 4.

В группе С1 (табл. 4) показана комбинированная схема многодугового плазмотрона с МЭВ, представляющая сочетание аксиальной и линейной схем плазмотрона в одном корпусе (А.с. №571174). Недостатком данной схемы является большой диаметральный размер плазмотрона в сравнении с плазмотронами линейной схемы, а преимуществом с точки зрения снижения интенсивности эрозии электродов является разделение суммарного тока на части, количество которых равно общему количеству катодов. Влияние на КПД то же самое, что и у плазмотронов с МЭВ без вдува.

В подгруппе С2 (табл. 4) представлена схема плазмотрона с несколькими источниками плазмы, сводимой к общему центру от каждого источника. Примером такой схемы является система «Axial PT™» фирмы Mettech [36]. Данные плазмотроны характеризуются более высоким уровнем скоростей плазменной струи по сравнению с плазмотронами схем А (табл. 1) и Б (табл. 2), а также более высоким качеством покрытий и возможностью увеличения диапазона регулирования суммарной электрической мощности дуг за счет использования одной, двух или трёх независимо горящих дуг. Особенностью данного плазмотрона является то, что он имеет конечное сопло – конвергентор, которое вмещает в себя три довольно протяженных отдельных сходящихся канала, а анодная привязка дуг осуществляется уступами, расположенными до этого сопла-смесителя. Плазменные струи в данной конструкции контактируют с напыляемым материалом за срезом сопла плазмотрона, что может ограничивать его использование для тугоплавких материалов.

В подгруппе С3 (табл. 4) показана схема разработанного в 1967 году стержневого трёхдугового распылителя (А. с. №288490), работающего на аргоне от установки УПУ-3Д и предназначенного для расплавления керамического стержня, и напыления полученного материала тремя сходящимися плазменными струями. Достоинствами данного плазмотрона являются высокая производительность напыления, оптимальная схема ввода сырья в высокотемпературную зону и простота регулирования мощности плазмотрона и производительности напыления. Недостатками данного плазмотрона являются высокие потери теплового КПД, обусловленные сбрасыванием плазменных факелов в индивидуальные сопла – аноды.

В подгруппе С4 (табл. 4) показана система «Триплекс» [37-38]. Данная схема схожа со схемами С2, С3 и С1 (табл. 4). Отличительной особенностью «триплексного» плазмотрона является принцип расположения нескольких катодных узлов в одном корпусе и горение дуг с этих катодов на один общий анод. Также, вместо газоразрядной камеры используется участок

большего диаметра с ребристой поверхностью по типу схемы С1 табл. 4, на котором осуществляется разрушение вихревого течения газа и, как следствие, происходит изменение характера теплообмена, что способствует повышению теплового КПД.

Таблица 4 – Многодуговые плазмотроны

Обозначение плазмотрона согласно рис. 5	Схема
1 C1 Комбинированная схема основной линейной схемы и аксиальной вспомогательной (Патент №571174)	2
C2 Плазмotron с несколькими источниками плазмы, сводимыми к общему центру, (система «Axial III» фирмы Mettech [36])	
C3 Трехдуговой плазменный распылитель с общим анодом (A. C. №288490)	
C4 Система TripleksPRO-210 (Sulzer Metco) [37]	
C5 GTV DELTA torch [38]	

Положительным конструктивным фактором триплексного плазмотрона является распределение токовой нагрузки на три катода и более интенсивный теплообмен дуг с плазмообразующим газом (но при этом для снижения теплопотерь необходимо уменьшать теплоотдачу от газа к стенкам). Негативным фактором является наличие фиксированной привязки анодного пятна к аноду, приводящей к его интенсивной эрозии и быстрому выходу из строя. Для предотвращения этого можно использовать магнитное вращение дуги или закрутку газа на начальном участке дуги. Для повышения электрического КПД триплексного плазмотрона, использующего магнитное вращение дуги, целесообразно ток дуги пропускать через соленоид. Однако на режимах малой мощности будет невысокая магнитная индукция, поэтому для данного случая можно рекомендовать использование регулируемого внешнего высоковольтного источника. Для снижения же окисления анода целесообразно использовать вставки или втулки из жаростойкого никеля или молибдена. Данные меры позволяют «сканировать» поверхность анода с минимальными и необходимыми энергетическими затратами. Нельзя также исключить потери электрического КПД от применения внешних высоковольтных источников для обжатия дуги.

В схеме С5 плазмотрон DELTA «Дельта» [39] имеет одну стабилизированную дугу, которая работает между одним контактом охлаждаемого катода и распадается на три отдельных дуги на соответствующих сегментах анода. Колебания напряжения составляют всего ± 3 В. Негативным фактором является наличие фиксированной привязки анодных пятен к сегментированному аноду, приводящей к его интенсивной эрозии и быстрому выходу из строя.

Конструктивные варианты подачи напыляемого материала представлены в табл. 5.

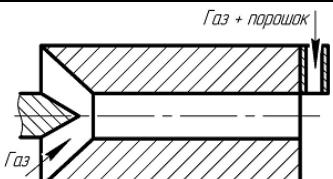
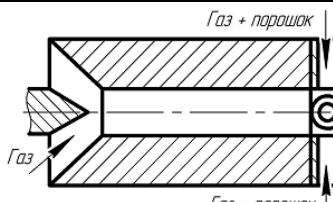
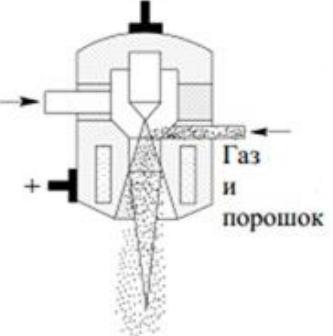
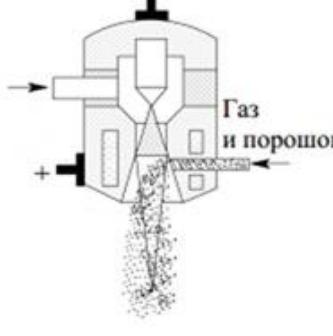
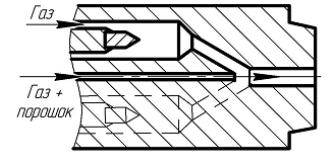
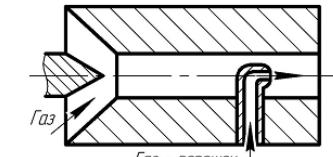
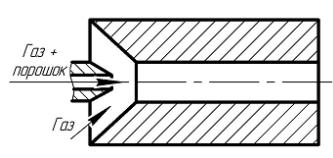
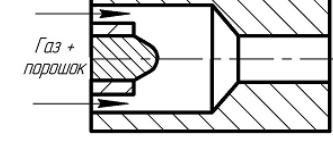
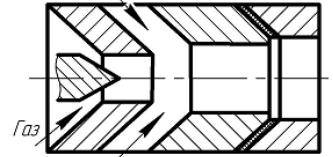
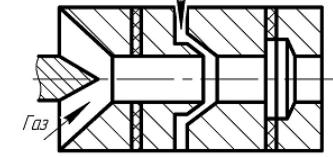
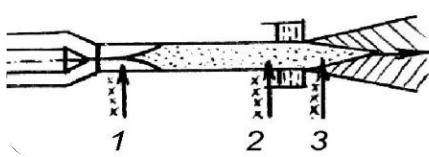
Эффективность плазменного напыления в значительной мере определяется местом и способом ввода порошка в центральную приосевую зону плазменной дуги (струи) для получения равномерно распределенного потока частиц и эффективного использования энергии дуги. В настоящее время известны три способа ввода порошкового материала в плазмотрон для его обработки: точечный ввод (схемы 1-4, табл.5), аксиальный ввод (через катод, схемы 5-8, табл. 5), кольцевой ввод (схемы 9-10, табл. 5).

Точечный ввод порошкового материала осуществляется перпендикулярно или под углом к плазменному потоку либо на срезе сопла плазмотрона (схемы 1-2, табл.5) для легкоплавких материалов (пример – изобретение RU 2113775), либо в канале сопла в месте между его срезом и анодным пятном привязки дуги (схема 4, табл.5) для среднеплавких материалов (пример – изобретение RU 140498), либо в канале сопла до анодной привязки дуги (схема 3, табл.5) для тугоплавких материалов (пример - изобретение RU 159626).

Аксиальный ввод через катод (схемы 7-8, табл. 5) используется для подачи тугоплавких порошковых материалов в дугу (пример – изобретение RU 2328096). Для плазмотронов с несколькими источниками плазмы оптимальна схема осевой подачи порошка в трубке, соосной соплу (схема 5, табл. 5).

Кольцевой ввод порошковых материалов (схема 9, табл. 5) эффективен для подачи средне- и легкоплавких материалов в канале сопла на небольшом расстоянии от его среза после места привязки дуги на аноде (пример – изобретение RU 2474983) и может быть использован для подачи тугоплавких материалов в месте канала сопла до анодной привязки дуги, в том числе, с помощью вихревой подачи порошка совместно с плазмообразующим газом в межэлектродный промежуток. Также кольцевой ввод эффективен для подачи порошковых материалов в межэлектродные вставки (схема 10, табл. 5).

Таблица 5 – Схемы расположения ввода порошка в плазменную струю

Название способа	Схема	Название способа	Схема
1	2	3	4
Под срез сопла плазмотрона перпендикулярно или под углом к потоку			
1 Один ввод		2 Несколько вводов с кольцевой или трубчатым насадком	
В доанодную и заанодную зону привязки дуги			
3 В доанодную зону		4 В заанодную зону	
Аксиальная подача			
5 Случай с тремя источниками плазмы		6 Случай с одним источником плазмы	
7 Через полый катод		8 Через прикатодную кольцевую область	
Кольцевая подача			
9 В зону катодной струи (инъекция)		10 В межэлектродную вставку	
Многоводные схемы подачи порошка (схема 11)			
		1, 2 и 3 – туго-, средне- и легкоплавкие порошки соответственно	

Наиболее простым и универсальным способом ввода туго-, средне- и легкоплавких порошков является точечный ввод в до-, послеанодную зону канала плазмотрона и на срезе его сопла. Для получения многокомпонентных покрытий из 7 ... 9 и более компонентов необходимо нанесение плазменным напылением одновременно легкоплавких материалов с температурой плавления $T_{\text{пл}}$ до 600 °C, среднеплавких – с $T_{\text{пл}}$ 600 ... 1600 °C и тугоплавких – с $T_{\text{пл}}$ более 1600 °C. При этом тугоплавкие керамические материалы имеют и невысокую теплопроводность. Для тугоплавких материалов увеличение продольной координаты x места ввода порошка в плазмотрон приводит к существенному снижению коэффициента использования порошка (КИП) и эффективного КПД его нагрева (рис. 6).

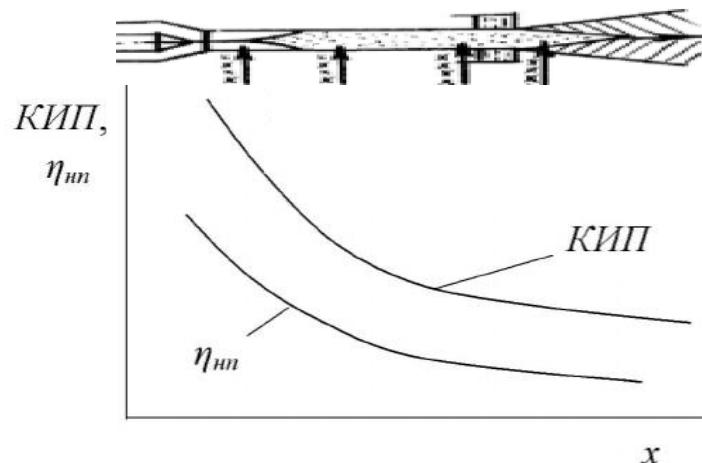


Рисунок 6 – Влияние места ввода тугоплавкого порошка (продольной координаты x) на коэффициент использования порошка (КИП) и эффективный КПД нагрева порошка $\eta_{\text{пп}}$

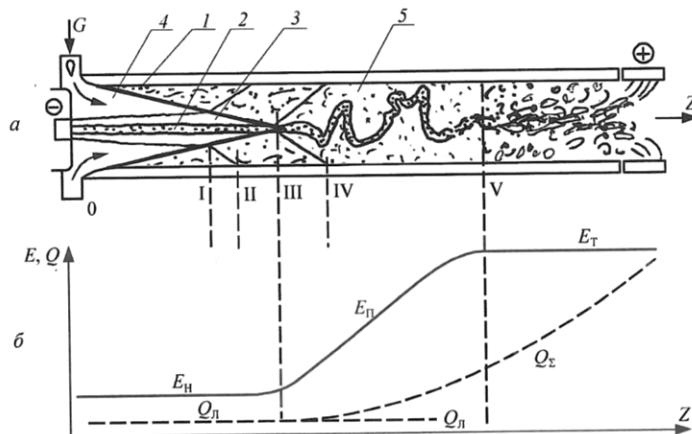
Для решения проблемы одновременного напыления многокомпонентных материалов с разными теплофизическими свойствами целесообразно использовать многоводные схемы порошка (схема 11, табл. 5) [40].

2.1.2 Анализ теплофизической эффективности плазмотронов линейной схемы для плазменного напыления

Энергетическая эффективность электродуговых плазмотронов определяется геометрией разрядной камеры плазмотрона и сложными физическими процессами электромагнитной, тепловой и газодинамической природы в приэлектродных областях дугового разряда, на поверхностях электродов, столбе разряда и канале с соплом [2, 4, 5]. Взаимодействие дуги с потоком газа и стенками разрядной камеры определяет структуру течения газа и электрической дуги вдоль канала, распределение напряженности электрического поля, тепловых потерь и других параметров плазмотрона. Тепловой поток в стенку канала на начальном участке практически постоянен и определяется в основном излучением дуги [2]. Затем он начинает возрастать, так как к потоку излучения добавляется тепловой поток, определяемый конвективным теплообменом и теплопроводностью [2, 41].

Тепловой КПД плазмотрона, определяющий эффективность нагрева газа, определяется отношением тепла, уносимого газом из плазмотрона в единицу времени, к мощности дуги. Величина η зависит от тепловых потерь в стенки разрядной камеры: $\eta = 1 - Q_{\text{п}} / (UI)$. Здесь $Q_{\text{п}}$ – суммарные тепловые потери в элементы плазмотрона; U, I – напряжение и сила тока соответственно. В качестве меры тепловой эффективности плазмотрона часто используется коэффициент тепловых потерь $\tilde{\eta}$ – отношение тепловых потерь в плазмотроне к теплосодержанию плазменной струи: $\tilde{\eta} = (1 - \eta) / \eta$. Основной экспериментальный метод определения тепловых

потерь в плазмотроне – калориметрический, для которого не важно, какую физическую природу имеют тепловые потери: конвективную, кондуктивную или излучательную.



1 – пограничный слой; 2 – дуга; 3 – тепловой слой дуги; 4 – невозмущенное течение; 5 – переходный участок течения; I – сечение встречи турбулентного пограничного слоя 1 с тепловым слоем 3 дуги 2; II – сечение разрушения теплового слоя дуги; III – сечение начала взаимодействия дуги с турбулентным потоком газа; IV, V – сечения начала и завершения формирования развитого турбулентного течения; Q_L , Q_{Σ} – лучистый и суммарный тепловой поток в стенку камеры соответственно; E_d , E_t , E_r – напряженность электрического поля дуги в начальном, переходном и турбулентном участках канала плазмотрона соответственно

Рисунок 7 – Структура течения газа с электрической дугой (а) и распределение параметров вдоль цилиндрического канала плазмотрона (б) [2]

Для плазмотронов линейной схемы с самоустанавливающейся длиной дуги и с длиной, меньшей самоустанавливающейся, излучательная и кондуктивная составляющие потерь энергии незначительны и тепловой КПД в значительной степени определяется конвективными теплопотерями [2]. В связи с этим эффективной мерой снижения тепловых потерь в плазмотроне с самоустанавливающейся дугой и дугой с уступом является оптимизация длины канала выходного электрода, связанная с расчетом протяженности начального участка и зоны шунтирования (участок 0-V, рис 7) [2].

Многочисленные исследования таких плазмотронов показали, что в общем виде их тепловая характеристика может быть записана зависимостью основных критериальных комплексов, в которой длина канала выходного электрода l входит в безразмерны комплекса [2, 4]:

$$\tilde{\eta} = \frac{1-\eta}{\eta} = A \left(\frac{I^2}{Gd} \right)^{\alpha} \left(\frac{G}{d} \right)^{\beta} (pd)^{\gamma} \left(\frac{l}{d} \right)^{\delta}, \quad (1)$$

где A , α , β , γ , δ – эмпирические безразмерные коэффициенты геометрически подобных плазмотронов каждой схемы; I – сила тока дуги, А; G – расход плазмообразующего газа, кг/с; d – диаметр канала плазмотрона, м; p – давление в камере горения дуги, Па; l – длина канала плазмотрона, м.

Для однокамерных, двухкамерных воздушных плазмотронов постоянного и переменного тока с выходными электродами цилиндрической формы без уступа и с уступом зависимость (1) имеет вид (с точностью $\pm 10\%$) [2-4]:

$$\tilde{\eta} = \frac{1-\eta}{\eta} = (5,82 \cdot 10^{-5} \dots 1,08 \cdot 10^{-4}) \psi, \quad (2)$$

где

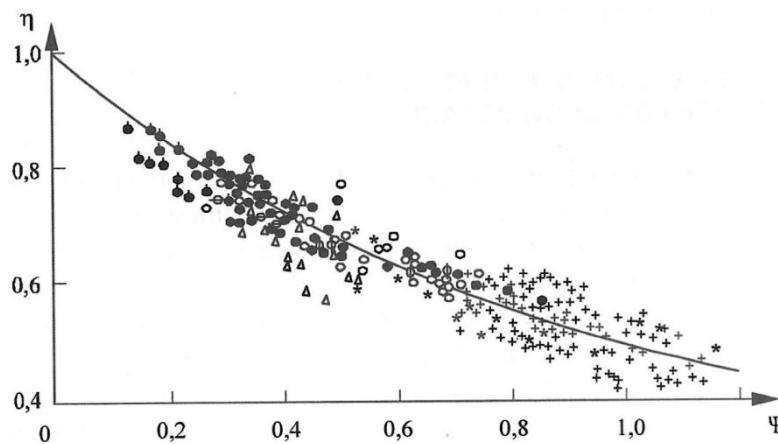
$$\Psi = \left(\frac{I^2}{Gd} \right)^{0,27} \left(\frac{G}{d} \right)^{-0,27} (pd)^{0,3} \left(\frac{l}{d} \right)^{0,5}.$$

Зависимость получена при значениях комплексов в интервалах:

$$\frac{I^2}{Gd} = 5(10^6 \dots 10^9) \text{ A}^2 \cdot \text{с}/(\text{кг} \cdot \text{м}); \quad \frac{G}{d} = 0,5 \dots 56 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м});$$

$$pd = 1 \cdot 10^3 \dots 8 \cdot 10^5 \text{ Н/м}; \quad \frac{l}{d} = 5 \dots 40.$$

График зависимости (2) имеет вид, представленный на рис. 8.



сплошная линия – расчет по формуле (2) при $A = 1,08 \cdot 10^{-4}$;
 экспериментальные точки – данные различных работ, полученные в интервалах параметров:
 $I = 50 \dots 3600 \text{ А}; G = 1 \cdot 10^{-3} \dots 2,2 \text{ кг/с}; d = 1 \cdot 10^{-3} \dots 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Рисунок 8 – Тепловая характеристика двухкамерного воздушного плазмотрона переменного и постоянного тока [2]

Принципиальным отличием данных плазмотронов от плазмотронов с фиксированной длиной дуги, большей самоустанавливающейся (плазмотронов с МЭВ), состоит в механизме управления мощностью дуги. При заданных значениях расхода газа, давления и других определяющих параметров повышение энталпии нагреваемого газа в первых типах плазмотронов возможно только за счет увеличения тока дуги. Но при этом возрастает и скорость разрушения (эррозия) электродов. Схема же плазмотрона с МЭВ позволяет регулировать мощность разряда не только увеличением тока дуги, но и с помощью напряженности электрического поля дуги за счет увеличения длин МЭВ [5]. Однако если не принять специальных мер, то суммарные тепловые потоки в стенки разрядной камеры могут быть значительно большими (а тепловой КПД меньшим), чем в плазмотронах первого и второго типа, так как на участке турбулентного течения быстро достигается предельное значение тепловых потерь (локальный тепловой КПД равен нулю).

Средством снижения теплопотерь здесь является заградительное охлаждение методом вдува части рабочего газа в межсекционные зазоры или через пористую вставку в пристеночный пограничный слой цилиндрической поверхности МЭВ и выходного электрода [2, 13 25, 42-44, 45]. Вниз по потоку охлаждающее действие завесы постепенно снижается в результате

турбулентного перемешивания холодного и горячего газов. Поэтому в длинных каналах необходимо применять многощелевую завесу. Данный способ снижения тепловых потерь в стенки МЭВ наиболее эффективен на переходном и турбулентном участках канала.

Эффективность заградительного охлаждения стенок МЭВ определяется коэффициентом

$$\theta' = \frac{\theta_i - \theta_{is}}{\theta_i - \theta_l}, \quad (3)$$

где θ_i , θ_{is} – тепловые потоки в i -тую шайбу мерной секции при отсутствии и наличии вдува газа соответственно; θ_l – лучистый тепловой поток, определяемый на начальном участке канала.

На длине 2...3 калибра от места вдува потери в стенку снижаются почти вдвое. Экспериментальные результаты, полученные при исследовании газовой завесы секции в плазмотроне с МЭВ при температуре газового потока 3300 К представляются в виде зависимости θ' от безразмерного параметра вдува K в интервале $K = 0,2 \dots 1,5$ при ширине щели $S = 1,3 \dots 4,2$ мм зависимостью (рис. 9) [2]:

$$\theta' = (1 + 0,24K)^{-0,8} (1 + K^2)^{-0,14}, \quad (4)$$

$$\theta' = (1 + 0,24K)^{-0,8}, \quad (5)$$

где $K = (z' - z'_0)Re_s^{-0,25}/(m_s S)$; $m_s = (\rho v)_s/(\rho v)_0$; $Re_s = (\rho v)_s S/\mu_0$; ρ , v – плотность и скорость газа соответственно, μ_0 – динамическая вязкость газа при среднемассовой температуре; z'_0 – координата конца участка с абсолютной завесой.

Видно, что в цилиндрической разрядной камере при наличии закрутки потока эффективность тепловой завесы хуже, особенно при больших K . Обусловлено это цилиндричностью канала и большим углом вдува ($\gamma = 75$ и 90°).

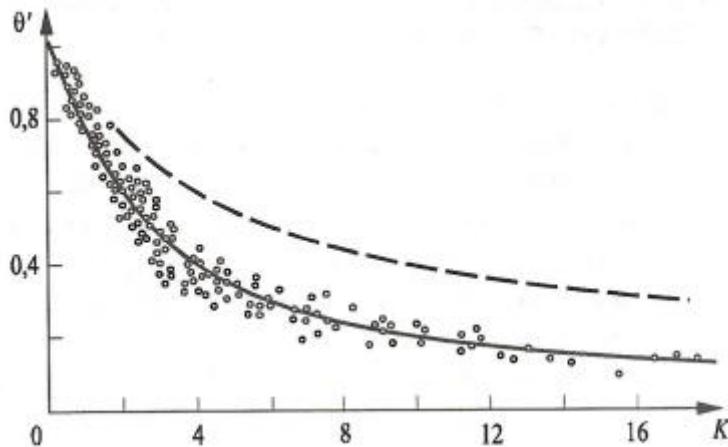
Для плазмотронов с длинным цилиндрическим каналом с секционированной МЭВ получить единую аналитическую зависимость КПД от определяющих параметров не представляется возможным. Это связано с тем, что при отыскании зависимости $\eta = f(I^2/G_d, \dots)$ к уже использованным критериям необходимо добавить критерии, учитывающие заградительное охлаждение, возможность управления длиной участка развитого турбулентного течения при постоянной длине МЭВ и т.д. Поэтому КПД плазмотрона с МЭВ необходимо рассчитывать поэлементно.

При вдуве заградительного газа пористую вставку охлаждение стенок разрядной камеры является разновидностью регенеративного охлаждения. В этом случае значительная часть теплового потока, в том числе и лучистого, возвращается в основной турбулентный поток. Эффективность метода создания заградительного потока существенно зависит от параметра вдува газов межсекционные зазоры или через пористую стенку, от физических свойств охлаждающей среды и основного потока. В случае, если вдув газа через пористую стенку выше критического, наблюдается режим полного оттеснения пограничного слоя, обеспечивающий абсолютную завесу стенки ($\theta' = 1$).

В плазмотроне с газовихревой МЭВ тепловые потери на участке межэлектродной вставки определяются незначительным лучистым теплообменом. Например, при токе 600 А они не превышают 2 % от полного теплового потока.

Из применяемых в практике к наиболее эффективным плазмотронам по критериям эффективности, на наш взгляд, в большей степени относится плазмotron ПНК-50, разработанный в институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН совместно с Сибирским государственным университетом водного транспорта [8-13]. Его достоинствами являются возможности выбора схемы: с межэлектродными вставками со сверхзвуковым соплом, с кольцевой подачей порошка в рабочий канал плазмотрона, с модулями для нанесения тугоплавкой керамики, для напыления дисперсных материалов в суспензиях и

эмulsionях. Данных по энергетической эффективности (КПД, КИМ) данного плазмотрона в печати обнаружить не удалось.



точки и сплошная кривая – экспериментальные данные и расчетная зависимость по формуле (4) при угле вдува $\gamma = 75$ и 90° ; штриховая кривая – расчетная зависимость при вдуве вдоль поверхности стенки (угол вдува $\gamma = 0^\circ$) по формуле (5)

Рисунок 9 – Эффективность заградительного охлаждения [2]

Краткий анализ ресурсов повышения эффективности плазмотронов, включая схему многоводного одновременного введения в них разных по теплофизическим свойствам порошков представлен в работах [46-48]. Для многомодульной схемы плазмотрона может быть представлено перспективное решение с модулями-микроплазмотронами, в которых охлаждение катодов осуществляется плазмообразующим газом (с рекуперацией энергии) [49]. Другим вариантом микромодуля для данного многодугового плазмотрона может быть вариант рекуперации передачей тепла от нагреваемой стенки анода охлаждающему плазмообразующему газу в канале, заполненном термонакопительными шариками [50].

2.2 Анализ газодинамических процессов при неуправляемых пульсациях и модуляции параметров

Шунтирование дуги и пульсации параметров разряда

Одним из фундаментальных электрофизическých процессов в камере горения дуги, определяющих электрические, пульсационные и эрозийные характеристики плазмотрона, является шунтирование – электрический пробой между столбом дуги и стенкой канала. Шунтирование дуги в канале плазмотрона в большинстве случаев снижает его эффективность вследствие неуправляемых пульсаций температуры и скорости плазменной струи. Это происходит из-за стохастического изменения параметров системы дуги с окружающим ее газом, вызывающей пульсационное изменение тока и напряжения. Для самоустановливающейся дуги пульсации мощности дуги находятся в области частот 1-20 кГц и вызывают флюктуации длины дуги в канале анода, создавая этим большой вклад в пульсации скорости (до 50 %) и температуры (до 20 %) плазменной струи на срезе сопла плазмотрона [9, 52]. Однако есть и исключение, например, в плазмотроне с выходным ступенчатым электродом за счёт фиксации средней длины дуги возрастает тепловой КПД (0,8–0,85) по сравнению с плазмотронами с трубчатыми электродами (0,7–0,75) [6]. В плазмотронах с МЭВ пульсации мощности и вызванные этим перемещения дуги вдоль канала по аноду, малы по величине. В частности, это характерно для всех режимов работы плазмотрона типа ПНК-50 с фиксацией длины дуги с помощью МЭВ, при этом большая часть спектральной мощности пульсаций была сосредоточена в области до 20 кГц [9].

Модуляция параметров плазменного напыления

В плазменном напылении порошков доля энергии плазменной дуги, передаваемой напыляемым частицам, составляет всего лишь 1...3 %. Интенсификация газодинамических процессов передачи энергии напыляемым частицам для повышения этой доли представляет собой важную проблему. По данной теме представлен обзор работ за период 1957-1995 гг [52], в котором рассмотрены некоторые результаты влияния на параметры плазменного напыления акустического воздействия [53] и импульсно модулированной электрической мощности плазмотрона [54]. В последующем также были получены результаты повышения эффективности энергопередачи дисперсной фазе при использовании модуляции электрических параметров [55, 56].

Изучению некоторых вопросов изменения параметров плазменной струи при модуляции параметров уделяли внимание отечественные ученые Н. Н. Рыкалин и В. В. Кудинов (институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН) [19, 20, 57, 58], А. Ф. Пузряков (МВТУ им. Н. Э. Баумана) [59, 60], М.Ф. Жуков (ИТ СО РАН) [3, 4, 51]. Исследование вопросов акустического воздействия на плазменные струи проводилось учеными института тепло- и массообмена имени А. А. Лыкова (НАН Беларуси) [53, 61]. В данных публикациях и в работе [56] представлены некоторые результаты исследований плазменного напыления с модуляцией параметров, в основном, в аспекте изучения качества напыляемых покрытий. Показано, что модуляция тока косвенной дуги плазмотрона приводит к генерации слабых ударных волн внутри канала плазмотрона, усиливает межфазный теплообмен в гетерогенной плазменной струе за счет более интенсивной турбулизации струи и ускоряет движение и нагрев напыляемых частиц на величину до 40-50 %. Это происходит за счет повышения энергетического уровня напыляемых частиц при модуляции мощности косвенной дуги. Это позволило улучшить физико-механические и триботехнические свойства покрытий (повысить прочность соединения покрытия с основой на 20...23 МПа, квазивердость до 40...45 HRC, износостойкости покрытий до двух раз и более) [55].

3 Обобщение результатов исследований

Анализ информационных источников показывает, что вследствие сложности применения плазмотронов поперечной или аксиальной схем подачи газа основной схемой конструкции плазмотронов для напыления покрытий остается линейная схема. Это также обусловлено простотой реализации работы в режиме косвенной и прямой дуги, возможностью работы в широком диапазоне мощностей от высоких до малых для микроплазмотронов и высоким тепловым КПД. Для линейных плазмотронов целесообразным по сравнению с переменным током является использование постоянного тока, обеспечивающего высокую стабильность горения дуги.

Линейные схемы плазмотронов включают варианты самоустанавливающейся дуги, дуги с длиной, меньшей самоустанавливающейся (с уступом), и дуги с длиной, большей самоустанавливающейся (с межэлектродными вставками). С точки зрения теплового КПД плазмотрона наиболее целесообразными являются схемы с МЭВ и с уступом. Схема с МЭВ имеет ограничение по оптимальной длине МЭВ, определяющей приемлемые теплопотери в стенку канала с учетом использования заградительного охлаждения методом вдува части рабочего газа в межсекционные зазоры или через пористую вставку в пристеночный пограничный слой. Данная схема также обеспечивает заданную мощность дуги при меньших токах в сравнении с другими схемами и приводит к меньшей эрозии электродов плазмотрона с помощью регулирования напряженности электрического поля дуги за счет увеличения длины МЭВ. Плазмотрон с секционированной МЭВ применительно для микроплазменных устройств предпочтительнее конструкции с уступом выходного анода, поскольку при одной и той же подводимой мощности ток меньше, что уменьшает эрозию электродов и тепловой поток на обрабатываемые детали. Недостатком схемы плазмотрона с МЭВ является сложность его конструкции в сравнении с плазмотроном со схемой канала с уступом, тепловая эффективность которого может быть сопоставима с таковой у плазмотронов с МЭВ.

Для схем с самоустанавливающейся длиной дуги наибольшее распространение получила схема стабилизации дуги газовихревой стабилизацией. Выгодно использование газовоздушных смесей с углеводородными газами с точки зрения энергетической эффективности с учетом дешевизны газов, простоты регулирования коэффициента избытка кислорода, высокой равномерности температурных и скоростных полей в поперечных сечениях плазменных потоков и струй, а также высокой степенью теплопередачи от газовой фазы к дисперсной. Для этого требуются жаростойкие материалы катодов, такие как цирконий и гафний в виде вставок в медные втулки.

Плазмотроны схем с фиксированной длиной дуги, меньшей самоустанавливающейся с помощью МЭВ, обеспечивают простой способ поддержания необходимого напряжения на дуге в достаточно широком диапазоне изменения определяющих параметров, таких как ток дуги, расход газа и давление. При этом в сравнении с плазмотронами схемы с самоустанавливающейся длиной дуги плазмотроны с МЭВ позволяют существенно (во много раз) снизить неуправляемые пульсации скорости и температуры плазменной струи.

Высокую тепловую эффективность достигают паровихревые плазмотроны, которые позволяют повысить КПД за счет использования воды в качестве охладителя стенок канала дуги с рекуперацией энергии на образование пара. Водяной пар позволяет получить высокую температуру плазмы до 50 тыс. градусов, что дает широкие технологические возможности использования такого плазмотрона. Однако у них есть и свои ранее отмеченные недостатки.

Общий КПД плазменного напыления, включающий эффективность передачи энергии напыляемым частицам определяется их нагревом и ускорением. Это может быть реализовано модуляцией параметров мощности плазмотрона и с помощью организации сверхзвукового потока плазменной струи использованием сверхзвукового профиля сопла плазмотрона для повышения скорости и температуры частиц. Эффективность нагрева напыляемых частиц определяется местом ввода порошка в канал плазмотрона или на его срезе с учетом теплофизических гранулометрических характеристик порошка, определяющих время нагрева до заданной температуры или до плавления без перегрева и испарения. Для использования легко-, средне- и тугоплавких порошков в плазмотроне должны быть предусмотрены вводы в разных местах вдоль оси плазмотрона при отдельном их использовании или при одновременном для напыления многокомпонентных составов порошков.

Выделяются следующие резервы и тенденции путей повышения эффективности процесса плазменного напыления за счет использования и совершенствования плазмотронов на основе линейной схемы: оптимизация длины выходного электрода; заградительное ограждение стенок вдувом рабочего газа; осесимметричный ввод порошка; комбинирование свойств разных схем плазмотронов, включая варианты многодуговых плазмотронов; уменьшение эрозии катодов путем увеличения количества горящих дуг либо с общим анодом, либо в одной общей камере; перспективность использования плазмотронов, использующих режимы работы с импульсно-модулированным током, генерирующих импульсную плазму в качестве инструмента воздействия на различные поверхности и позволяющих произвести нужное количество энергии, подвести ее к нужному количеству порошка и, тем самым, обеспечить высокий КПД плазмотронов.

Плазменно-детонационные установки, использующие похожий эффект, характеризуются малой производительностью процесса. Комбинированные лазерно-микроплазменные устройства в основном применяются для дальнейшего повышения качества наносимых слоев при сохранении преимуществ лазерной порошковой наплавки. Их недостатком является повышение температуры в рабочей зоне вследствие значительного повышения погонной энергии процесса по сравнению с чисто лазерной наплавкой или последующим оплавлением. Применяются для ряда промышленных задач, требующих получение прочности сцепления, максимально приближенного к прочности основного металла.

Проведенный анализ показывает, что в качестве прототипа микроплазмотрона для модульного плазмотрона целесообразно взять схему В1.3 (табл. 1) с пусковой межэлектродной вставкой,

причем катод плазмотрона изготавливать из лантанированного вольфрама в случае использования инертных плазмообразующих газов. Применение вольфрама связано с его высоким ресурсом при частых пусках плазмотрона и относительно небольшой стоимостью. При возможности контакта катода с плазмообразующим воздухом и газовоздушными смесями необходимый ресурс может быть обеспечен циркониевыми или гафниевыми электродами. В качестве конечного модульного плазмотрона целесообразно взять схему С2 и С3 (табл. 4). Также необходимо предусмотреть рекуперацию тепла с электродных узлов для дальнейшего повышения теплового КПД.

4 Формулирование научно-технического проблемного вопроса дальнейших исследований, концепции и задач исследования

Имеется широкий спектр вариантов плазмотронов линейной схемы и многодуговых для плазменного напыления покрытий. Выбор рациональной или оптимальной схемы варианта плазмотрона определяется многими конструктивными параметрами плазмотрона и режимными параметрами процесса плазменного напыления, которые, в свою очередь, определяются задачами эксплуатационного назначения покрытий по их свойствам, технологическими задачами по производительности и локальности напыления покрытий, объемом работ (определяющим необходимость использования специального или универсального плазмотрона). Это составляет научно-техническую проблемность вопроса разработки *методики выбора схемы и конструкции плазмотрона* в зависимости от задач эксплуатационного назначения покрытий, технологических задач и объема производства. Эта проблема заключается, во-первых, в исследовании неизученных термогазодинамических процессов тепломассообмена, в том числе, в исследовании одновременной многоводной подачи порошков с разными свойствами в канал плазмотрона и плазменную струю. Во-вторых, для решения данной проблемы необходимо разработать математические модели термогазодинамических процессов в канале плазмотрона и в плазменной струе при раздельной или одновременной подаче в них порошков с разными свойствами для вариантов плазмотронов обобщенной линейной схемы и многодуговых схем. В-третьих, реализация математического моделирования потребует разработки программного обеспечения в виде приложения, учитывающего все варианты схем плазмотронов с учетом эксплуатационных и технологических требований к покрытию и объему производства.

Однако можно предположить, что использование изложенных путей повышения энергетической эффективности при использовании усовершенствованных плазмотронов не позволит кардинально повысить общий КПД плазменного напыления от существующих существенно низких значений 3-5 %. Это потребует, видимо, использования новых принципиальных путей совершенствования плазмотронов с использованием новых вещественно-полевых ресурсов в соответствии с методикой теории решения изобретательских задач.

Список литературы

- 1 Коробов, Ю.С. Активированная дуговая металлизация – эффективный метод нанесения защитных покрытий [Электронный ресурс] / Ю.С. Коробов // Энциклопедия технологий ремонта, восстановления и упрочнения 2001-2008 г.г. – Электрон. текстовые, граф. дан. и прикладная прогр. (290 МБ). – СПб: НПФ «Плазмацентр», 2008.
- 2 Чередниченко, В.С. Плазменные электротехнологические установки [Текст] : учебник для вузов / В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
- 3 Жуков, М.Ф. Электродуговые плазмотроны [Текст] : Рекламный проспект / М.Ф. Жуков. – Новосибирск, 1980.
- 4 Жуков, М.Ф. Электродуговые генераторы термической плазмы / И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский и др. – Новосибирск: Наука, 1999. – 712 с.
- 5 Радько, С.И. Устройство электродугового плазмотрона и моделирование его энергетических характеристик / С.И. Радько, Э.К. Урбах // Доклады ТУСУРа. - 2012. -Ч.1, № 1 (25). – С. 212-215.

- 6 Аньшаков, А. С. Влияние уступа в выходном электроде на эффективность работы двухкамерного плазмотрона / А.С. Аньшаков, Э.К. Урбах и др. // Теплофизика и аэромеханика. – 2006. – Т. 13, № 3. – С. 493-500.
- 7 Аньшаков, А. С. Электродуговые плазмотроны [Текст] / А. С. Аньшаков, Г. Н. Дандарон, В. П Ефремов и др. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1980. – 84 с.
- 8 Тамбовцев, А. С. Нанесение защитных покрытий для топливно-энергетического комплекса методом плазменного напыления / А.С. Тамбовцев, П.А. Тырышкин, В.И. Кузьмин, И.П. Гуляев // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 71. – С. 156-166.
- 9 Тарасенко, Ю. П. Структура и физико-механические свойства жаростойкого интерметаллического покрытия «Ni-Co-Cr-Al-Y», полученного на модернизированном плазменном оборудовании / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева, О.Б. Бердник, Я.А. Фель, В.И. Кузьмин, А.А. Михальченко, Е.В. Картаев // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21. – № 5. – С. 671-680.
- 10 Кузьмин, В. И. Повышение эффективности плазменного напыления порошковых покрытий / В. И. Кузьмин, Е. В. Картаев, С. П. Ващенко, Д. В. Сергачёв, Е. Е. Корниенко // Вестник югорского государственного университета. – 2014. – Выпуск 2 (33). – С. 7–14.
- 11 Кузин, В. И. Плазменное напыление износостойких покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов / В. И. Кузьмин, С. П. Ващенко, И. П. Гуляев, Е. В. Картаев, Д. В. Сергачёв, Е. Е. Корниенко, А. В. Долматов // Вестник югорского государственного университета. – 2015 г. – Выпуск 2 (37). – С. 45–52.
- 12 Абдуев, А. Х. Синтез керамики на основе TiO_x методом плазменного напыления / А.Х. Абдуев, А.К. Ахмедов, А.Ш. Асваров, К.Ш. Рабаданов, Р.М. Эмиров, С.П. Ващенко, И.П. Гуляев, В.И. Кузьмин, Д.В. Сергачёв // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24. – № 4. – С. 639-646.
- 13 Патент №2474983 Российской Федерации, МПК H05B 7/22 (2006/01) Узел кольцевого ввода порошковых материалов электродугового плазмотрона: №2011128160/07: заявл. 07.07.2011: опубл. 10.02.2013 Бюл.№4 / Кузьмин В.И., Михальченко А.А., Картаев Е.В.; заявитель ФГБУ науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН. – 8 с.
- 14 Тарасенко Ю.П., Царева И. Н., Бердник О. Б., Фель Я. А. Способ высокоэнергетического плазменного напыления теплозащитного покрытия на лопатки турбин газотурбинного двигателя и оборудование для его реализации. Патент РФ №2567764. БИМП №12, 27.04.2015 г. - 11 с.
- 15 Соснин, Н. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 406 с.
- 16 Донской, А.В.. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении / А. В. Донской, В. С. Клубников – Л.: Машиностроение. – 1979. – 221 с.
- 17 Лукьянов, Г.А. Сверхзвуковые струи плазмы / Г. А. Лукьянов. – Л.: Машиностроение. – 1985. – 264 с.
- 18 Фролов, В.Я., Клубников В.С., Петров Г.К., Юшин Б.А. Техника и технологии нанесения покрытий / В. Я. Фролов, В. С.– Клубников, Г. К. Петров, Б. А. Юшин. – СПб.: Изд-во Политехнического университета. – 2008. – 387 с.
- 19 Кудинов, В.В. Плазменные покрытия / В.В. Кудинов; кол. авт. Институт metallurgии имени А. А. Байкова (Москва). – Москва: Наука, 1977. – 184 с.
- 20 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белашенко и др. ; [отв. ред. Л. В. Коваленко] ; АН СССР, Ин-т metallurgии им. А. А. Байкова. - Москва : Наука, 1990.– 406 с.
- 21 Клименко, Г.К. Конструкции электродуговых плазмотронов [Электронный ресурс] / Г. К. Клименко, А.А. Ляпин // электронное учебное издание, учебное пособие по дисциплине «Генераторы плазмы». – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010.
- 22 Пузряков, А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов» [Текст] / А. Ф. Пузряков. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 360 с.
- 23 Кравченко, И. Н. Ресурсосберегающие плазменные технологии при ремонте перерабатывающего оборудования: Монография / И. Н. Кравченко; Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. – 1. – Москва: ООО "Научно-издательский центр ИНФРА-М", 2021. – 200 с.
- 24 Коротеев, А.С. Плазмотроны. Конструкции, характеристики, расчёт [Текст] / А.С. Коротеев, В.М. Миронов, Ю.С. Свирчук. – М.: Машиностроение, 1993. — 296 с.
- 25 Анциферов, В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов [Текст] / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др. – М. : Металлургия, 1987. – 792 с.

- 26 Кручинин, А.М. Плазменные промышленные установки. Промышленные плазмотроны [Текст] / А.М. Кручинин, В.П. Цишевский. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 104 с.
- 27 Патон, Б.Е. Микроплазменная сварка [Текст] : Монография / Б.Е. Патон, В.С. Гвоздецкий, Д.А. Дудко [и др.]. – Киев: Наука думка, 1979. – 248 с.
- 28 Лаборатория плазменных технологий – ПермГТУ: [Разновидности плазменных процессов. Конструкции дуговых плазмотронов] / ответственный: Ю. Д. Щицын. – 2025. – Текст. Изображения: электронные // Кафедра «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» ПермГТУ: официальный сайт. – URL: <http://svarka.perm.ru/plasma/kp.htm> (дата обращения: 28.11.2025).
- 29 Электродуговые, топливно-дуговые нагреватели газа и электрогазовые горелки / Литвинов В.К., Ясько О.И. / ПГУ им. С. Торайгырова / Учеб. пособие. – М.: УПИ, 1982. – 84 с.
- 30 Петров, С.В. Плазменное газовоздушное напыление [Текст] : Монография / С.В. Петров, И.Н. Карп. – Киев, 1993 г.
- 31 Михайлов, Б.И. Возможность регенерации тепла в электродуговых паровихревых плазмотронах // IX Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы: Тез. докл. Фрунзе, 1983. С. 336 – 337.
- 32 Михайлов, Б.И. Электродуговые генераторы пароводяной плазмы. Ч. 2 // Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – Т. 10, № 4. – С. 637– 657.
- 33 Повышение эффективности работы электродуговых плазмотронов для обработки материалов / К.А. Корсунов, Р.Н. Брожко / Успехи прикладной физики, 2013, том 1, №2, 161-166 С.
- 34 Дюмин, М.И. Численное моделирование динамики нагрева порошковых материалов в технологическом микроплазмотроне [Текст] / М.И. Дюмин Н.П. Козлов, В.И. Суслов // Вестник МГТУ им Н. Э. Баумана – 2003. – №3 – С. 3-11.
- 35 Карабут, А.Б. Плазмотроны со стабилизацией разряда вдувом через пористую стенку [Текст] / А.Б. Карабут, Ю.В. Курочкин, Г.Н. Мельников, А.В. Пустогаров // ТВТ, 17:3 (1979). – С. 618–625.
- 36 Axial III™ Spray System - Advanced Coating Solutions. https://www.mettech.com/assets/pdf/brochure_axail_III.pdf . - Текст. Изображения: электронные // Mettech: официальный сайт. - URL <https://www.mettech.com> (дата обращения 12.12.2025).
- 37 Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings / Wiley. – 1998. – 626 р.
- 38 Официальный сайт «Sulzer Ltd» [Электронный ресурс] // Strong Partners for Higher Productivity and Cost – TriplexPro™-210, загл. с экрана: <http://www.sulzer.com/>.
- 39 Плазменное напыление, плазмотроны Delta [Электронный ресурс] // фирма «Плакарт», загл. с экрана: <http://www.plackart.com>
- 40 Кадырметов, А. М. Обоснование конструкции и параметров специального плазмотрона для напыления многокомпонентных покрытий / А. М. Кадырметов, Д. А. Попов, А. И. Усков, В. Р. Фатхулин // Современные технологии производства в машиностроении : межвузовский сборник научных трудов / редкол.: В. Г. Грицюк [и др.]. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2023. – 160 с. – Выпуск 16. – ISBN 978-5-4446-1769-4. – Текст : непосредственный. – С. 117-126.
- 41 Тазмеев Г.Х., Тазмеев Х.К. Исследование характеристик дугового плазмотрона: учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму по дисциплине «Плазменные системы в нанотехнологии». – Набережные Челны: НЧИ КФУ, 2021 – 16 с.
- 42 Коновалов, Д. А Численное моделирование нестационарного теплообмена в задачах пористого охлаждения плазмотрона / Дмитрий Альбертович Коновалов // Автореферат канд.техн.наук по спец. 01.04.14. – Воронеж, 2002. – 179 с.
- 43 Д. А. Коновалов Моделирование нестационарного теплообмена в пористых элементах систем тепловой защиты с использованием программного комплекса flowvision / Д. А. Коновалов, Д. П. Шматов, И. Г. Дроздов, С. В. Дахин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 4. – С. 143-147.
- 44 Гильфанов, Р. Н. Тепловая защита окружающего пространства вдувом через перфорированные экраны / Р. Н. Гильфанов, А. Г. Каримова, С. Г. Дезидерьев, И. Ш. Зарипов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.– 2013. – № 3. – С. 20-23.
- 45 Патент №2474983 Российская Федерация, МПК H05B 7/22 (2006/01) Электродуговой плазмотрон и узел кольцевого ввода исходных реагентов в плазмотрон: №2023118621: заявл. 13.07.2023: опубл.25.04.2024 Бюл.№12 / Леончиков А. М., Прохоров В П.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Кедр» (RU). – 11 с.
- 46 Кадырметов, А. М. Условия и результаты повышения теплового КПД электродугового плазмотрона для плазменного напыления покрытий региона [Электронный ресурс] / А. М. Кадырметов, А. С. Пустовалов, Е. В Снятков // Воронежский научно-технический вестник. – 2017. – Т. 4, № 4 (22). – С. 89-98.

47 Кадырметов, А. М. Обзор вопросов эффективности плазменного напыления [Электронный ресурс] / А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, А. С. Пустовалов // Воронежский научно-технический вестник. – 2017. – Т. 3, № 3 (21). – С. 11-22.

48 Кадырметов, А. М. Обоснование конструкции и параметров специального плазматрона для напыления многокомпонентных покрытий / А.М. Кадырметов, Д.А. Попов, А.И. Усков, В.Р. Фатхулин // Современные технологии производства в машиностроении. межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж, 2023. – С. 117-126.

49 Кадырметов, А. М. Анализ перспективных конструктивных решений электродугового плазматрона для плазменного напыления [Электронный ресурс] / А. М. Кадырметов, А. С. Пустовалов, В. О. Никонов, А. Ф. Мальцев // Воронежский научно-технический вестник. – 2015. – Т. 1, № 1 (11). – С. 62-67.

50 Патент №159626 Российской Федерации, МПК H05H 1/00 (2006.01) Плазмотрон для напыления: №2015146941/07: заявл. 30.10.2015: опубл. 2.02.2016 Бюл.№5 / Кадымретво А. М., Пустовалов А. С., Снятков Е. В., Никонов В. О.; заявитель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – 5 с.

51 Жуков, М.Ф. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками / М. Ф. Жуков М.Ф., А. С. Аньшаков, И. М. Засыпкин. – Новосибирск: Изд-во «Наука» –1981. – 219 с.

52 Кадырметов, А. М. Воздушно-плазменное напыление при модуляции электрических и газодинамических параметров: Обзор по данным отечественной и зарубежной печати за 1957-1995 г.г. [Текст] / А.М. Кадырметов; ВГЛТА. – Воронеж, 1996.– 60 с.: ил. – Библиогр.: с. 51-59. Деп. в ВИНИТИ 30.05.96, N1799 -B96.

53 Лизунков, Г. П. Интенсификация плазменного напыления при воздействии акустических и электрических колебаний на гетерогенную струю / Г.П. Лизунков, В.Д. Шиманович, И. С. Буров, А.Ф. Ильющенко // Инженерно-физический журнал. – 1984. – №5. – С. 812-816.

54 Гутман, Б. Е. Влияние модуляции плазменного дуги на адгезию и газопроницаемость порошковых покрытий / Б. Е. Гутман, М. Х. Шоршоров // Физика и химия обработки материалов. – 1986. – №6. – С. 61-64.

55 Кадырметов, А. М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров / А. М. Кадырметов. – Воронеж: Научная книга, 2013. – 260 с.

56 Кадырметов, А. М. Перспективные направления совершенствования технологии плазменного напыления с импульсной модуляцией тока дуги / Кадырметов А.М., Снятков Е.В., Плахотин А.А., Мандрыкин И.А., Буренко Н.С. // Воронежский научно-технический Вестник. -2022. – Т. 1. – № 1 (39). – С. 3-14.

57 Рыкалин, Н. Н. Тепловые основы сварки. Ч. 1. Процессы распространения тепла при дуговой сварке [Текст] / Н. Н. Рыкалин. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 272 с.

58 Рыкалин, Н. Н. Энергетические характеристики дугового плазмотрона в импульсном режиме при модуляции тока [Текст] / Н. Н. Рыкалин, А. В. Николаев, А. Н. Асонов // Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы: Тр. IV Всесоюз. конф. по физике и генераторам низкотемпературной плазмы. – Алма-Ата, 1970. – С. 500-504.

59 Пузряков, А. Ф. Влияние колебаний электрических параметров плазмотрона на теплообмен в двухфазной плазменной струе [Текст] / А. Ф. Пузряков, А. В. Новоселов, В. И. Иванов, В. А. Сологуб // VII Всеосоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы: Тез. докл. июнь 1980 г.: В 3 ч. – Новосибирск, 1980. – Ч. 3. – С. 275-287.

60 Пузряков, А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов» [Текст] / А. Ф. Пузряков. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 360 с.

61 Ажаронок, В. В. Влияние внешнего акустического поля на температуру плазмы дугового разряда / В.В. Ажаронок, Н.Ф. Алешин, В. А. Губкович, Г. П. Лизунков, Н. И. ЧуКубрик, В. Д. Шиманович // Инженерно-физический журнал. – 1986. – №3. – С. 481-485.

References

1 Korobov, Yu.S. Activated arc metallization – an effective method of applying protective coatings [Electronic resource] / Yu.S. Korobov // Encyclopedia of repair, restoration and strengthening technologies 2001-2008. – Electronic text, graphic data and applied software (290 MB). – St. Petersburg: NPF "Plasmacenter", 2008.

2 Cherednichenko, V.S. Plasma electrotechnological installations [Text]: a textbook for universities / V.S. Cherednichenko, A.S. An'shakov, M.G. Kuzmin. – Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2011. – 602 p.

- 3 Zhukov, M.F. Electric arc plasma torches [Text]: Advertising brochure / M.F. Zhukov. - Novosibirsk, 1980.
- 4 Zhukov, M.F. Electric arc generators of thermal plasma / I.M. Zasyipkin, A.N. Timoshevsky, et al. - Novosibirsk: Nauka, 1999. - 712 p.
- 5 Radko, S.I. The design of an electric arc plasma torch and modeling its energy characteristics / S.I. Radko, E.K. Urbach // TUSUR Reports. - 2012. - Part 1, No. 1 (25). - P. 212-215.
- 6 An'shakov, A.S. Influence of a step in the output electrode on the efficiency of a two-chamber plasma torch / A.S. An'shakov, E.K. Urbach et al. // Thermophysics and Aeromechanics. - 2006. - Vol. 13, No. 3. - P. 493-500.
- 7 An'shakov, A. S. Electric arc plasma torches [Text] / A. S. An'shakov, G. N. Dandaron, V. P. Efremov, et al. - Novosibirsk: Institute of Thermal Physics, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1980. - 84 p.
- 8 Tambovtsev, A. S. Application of protective coatings for the fuel and energy complex by plasma spraying / A. S. Tambovtsev, P. A. Tyryshkin, V. I. Kuzmin, I. P. Gulyaev // Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering. - 2022. - No. 71. - P. 156-166.
- 9 Tarasenko, Yu. P. Structure and physicomechanical properties of heat-resistant intermetallic coating "Ni-Co-Cr-Al-Y" obtained on modernized plasma equipment / Yu. P. Tarasenko, I. N. Tsareva, O. B. Berdnik, Ya. A. Fel, V. I. Kuzmin, A. A. Mikhalkchenko, E. V. Kartaev // Thermophysics and Aeromechanics. - 2014. - Vol. 21. - No. 5. - Pp. 671-680.
- 10 Kuzmin, V. I. Improving the efficiency of plasma spraying of powder coatings / V. I. Kuzmin, E. V. Kartaev, S. P. Vashchenko, D. V. Sergachev, E. E. Kornienko // Bulletin of Yugra State University. - 2014. - Issue 2 (33). - P. 7-14.
- 11 Kuz'min, V. I. Plasma spraying of wear-resistant coatings from self-fluxing alloy powders / V. I. Kuz'min, S. P. Vaschenko, I. P. Gulyaev, E. V. Kartaev, D. V. Sergachev, E. E. Kornienko, A. V. Dolmatov // Bulletin of Yugra State University. - 2015. - Issue 2 (37). - P. 45-52.
- 12 Abduyev, A. Kh. Synthesis of TiO_x-based ceramics by plasma spraying / A. Kh. Abduyev, A. K. Akhmedov, A. Sh. Asvarov, K. Sh. Rabadanov, R. M. Emirov, S. P. Vaschenko, I.P. Gulyaev, V.I. Kuzmin, D.V. Sergachev // Thermophysics and Aeromechanics. - 2017. - Vol. 24. - No. 4. - Pp. 639-646.
- 13 Patent No. 2474983 Russian Federation, IPC H05B 7/22 (2006/01) Unit for annular input of powder materials of an electric arc plasma torch: No. 2011128160/07: declared 07.07.2011: published 10.02.2013 Bulletin No. 4 / Kuzmin V.I., Mikhalkchenko A.A., Kartaev E.V.; applicant Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. - 8 p.
- 14 Tarasenko Yu.P., Tsareva I.N., Berdnik O.B., Fel Ya.A. Method of High-Energy Plasma Spraying of a Thermal Protective Coating on Gas-Turbine Engine Turbine Blades and Equipment for Its Implementation. Russian Federation Patent No. 2567764. BIMP No. 12, April 27, 2015. - 11 p.
- 15 Sosnin, N.A. Plasma Technologies. A Guide for Engineers / N.A. Sosnin, S.A. Ermakov, P.A. Topolyansky. - St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2008. - 406 p.
- 16 Donskoy, A.V. Electroplasma Processes and Installations in Mechanical Engineering / A. V. Donskoy, V. S. Klubnikin - L.: Mechanical Engineering. - 1979. - 221 p.
- 17 Lukyanov, G.A. Supersonic Plasma Jets / G. A. Lukyanov. - L.: Mechanical Engineering. - 1985. - 264 p.
- 18 Frolov, V.Ya., Klubnikin V.S., Petrov G.K., Yushin B.A. Coating Application Techniques and Technologies / V. Ya. Frolov, V.S. Klubnikin, G.K. Petrov, B.A. Yushin. - St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University. - 2008. - 387 p.
- 19 Kudinov, V.V. Plasma Coatings / V.V. Kudinov; coll. of authors. A. A. Baikov Institute of Metallurgy (Moscow). - Moscow: Nauka, 1977. - 184 p.
- 20 Kudinov, V.V. Plasma Coating Application / V.V. Kudinov, P.Yu. Pekshev, V.E. Belashchenko, et al.; [ed. L.V. Kovalenko]; USSR Academy of Sciences, A.A. Baikov Institute of Metallurgy. - Moscow: Nauka, 1990. - 406 p.
- 21 Klimenko, G.K. Designs of Electric Arc Plasmatrons [Electronic resource] / G.K. Klimenko, A.A. Lyapin // electronic textbook, textbook on the subject "Plasma Generators". - M.: Bauman Moscow State Technical University, 2010.
- 22 Puzryakov, A. F. Theoretical Foundations of Plasma Spraying Technology: Textbook for the Course "Technology of Metal-Composite Structures" [Text] / A. F. Puzryakov. 2nd ed., revised and enlarged. - M.: Bauman Moscow State Technical University, 2008. - 360 p.

- 23 Kravchenko, I. N. Resource-saving plasma technologies in the repair of processing equipment: Monograph / I. N. Kravchenko; Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev. - 1. - Moscow: Scientific Publishing Center INFRA-M, LLC, 2021. - 200 p.
- 24 Koroteev, A.S. Plasmatrons. Designs, characteristics, calculations [Text] / A.S. Koroteev, V.M. Mironov, Yu.S. Svirchuk. – M.: Mashinostroenie, 1993. – 296 p.
- 25 Antsiferov, V. N. Powder metallurgy and sprayed coatings: Textbook for universities [Text] / V. N. Antsiferov, G. V. Bobrov, L. K. Druzhinin, etc. - M.: Metallurgy, 1987. - 792 p.
- 26 Kruchinin, A.M. Plasma industrial installations. Industrial plasmatrons [Text] / A.M. Kruchinin, V.P. Tsishevsky. – Moscow: MPEI Publishing House, 1991. – 104 p.
- 27 Paton, B.E. Microplasma Welding [Text]: Monograph / B.E. Paton, V.S. Gvozdetsky, D.A. Dudko [et al.]. – Kyiv: Nauka Dumka, 1979. – 248 p.
- 28 Plasma Technology Laboratory – PermSTU: [Types of Plasma Processes. Designs of Arc Plasmatrons] / responsible: Yu. D. Shchitsyn. – 2025. – Text. Images: electronic // Department of Welding Production and Technology of Structural Materials, PermSTU: official website. – URL: <http://svarka.perm.ru/plasma/kp.htm> (accessed: 28.11.2025).
- 29 Electric arc, fuel-arc gas heaters and electric gas burners / Litvinov V.K., Yas'ko O.I. / PSU named after S. Toraighyrov / Textbook. - M.: UPI, 1982. - 84 p.
- 30 Petrov, S.V. Plasma gas-air spraying [Text]: Monograph / S.V. Petrov, I.N. Karp. - Kyiv, 1993
- 31 Mikhailov, B.I. Possibility of heat regeneration in electric arc vortex-steam plasma torches // IX All-Union Conf. on Low-Temperature Plasma Generators: Abstracts of Reports. Frunze, 1983. pp. 336 - 337.
- 32 Mikhailov, B.I. Electric arc generators of steam-water plasma. Part 2 // Heat Physics and Aeromechanics. – 2003. – Vol. 10, No. 4. – Pp. 637– 657.
- 33 Improving the Efficiency of Electric Arc Plasma Torches for Materials Processing / K.A. Korsunov, R.N. Brozhko / Uspekhi Applied Physics, 2013, Vol. 1, No. 2, 161-166 Pp.
- 34 Dyumin, M.I. Numerical Modeling of the Heating Dynamics of Powder Materials in a Technological Microplasma Torch [Text] / M.I. Dyumin, N.P. Kozlov, V.I. Suslov // Bulletin of Bauman Moscow State Technical University – 2003. – No. 3 – Pp. 3-11.
- 35 Karabut, A.B. Plasmatrons with Discharge Stabilization by Injection through a Porous Wall [Text] / A. B. Karabut, Yu. V. Kurochkin, G. N. Melnikov, A. V. Pustogarov // TVT, 17:3 (1979). – P. 618–625.
- 36 Axial III™ Spray System - Advanced Coating Solutions. https://www.mettech.com/assets/pdf/brochure_axail_III.pdf . – Text. Images: electronic // Mettech: official website. – URL <https://www.mettech.com> (date of access 12.12.2025).
- 37 Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings / Wiley. – 1998. – 626 p.
- 38 Official website of "Sulzer Ltd" [Electronic resource] // Strong Partners for Higher Productivity and Cost – TriplexPro™-210, title from the screen: <http://www.sulzer.com/>.
- 39 Plasma spraying, Delta plasma torches [Electronic resource] // company "Pla-kart", title from the screen: <http://www.plackart.com>
- 40 Kadyrmetov, A. M. Justification of the design and parameters of a special plasmatron for spraying multicomponent coatings / A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, A. I. Uskov, V. R. Fatkhulin // Modern production technologies in mechanical engineering: interuniversity collection of scientific papers / editorial board: V. G. Gritsyuk [et al.]. – Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", 2023. – 160 p. – Issue 16. – ISBN 978-5-4446-1769-4. – Text : direct. – Pp. 117-126.
- 41 Tazmeev G.Kh., Tazmeev H.K. Study of characteristics of an arc plasma torch: a teaching aid for laboratory practical training on the discipline "Plasma systems in nanotechnology". – Naberezhnye Chelny: KFU Scientific Research Institute, 2021 – 16 p.
- 42 Konovalov, D.A. Numerical modeling of unsteady heat transfer in problems of porous cooling of a plasma torch / Dmitry Albertovich Konovalov // Abstract of Cand. Sci. (Eng.) in the specialty. 01.04.14. – Voronezh, 2002. – 179 p.
- 43 D. A. Konovalov, Modeling of Non-Stationary Heat Transfer in Porous Elements of Thermal Protection Systems Using the Flowvision Software Package / D. A. Konovalov, D. P. Shmatov, I. G. Drozdov, S. V. Dakhin // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2011. – Vol. 7. – No. 4. – Pp. 143-147.
- 44 Gilfanov, R. N. Thermal Protection of the Ambient Space by Blowing Through Perforated Screens / R. N. Gilfanov, A. G. Karimova, S. G. Dezideryev, I. Sh. Zaripov // Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev.– 2013. – No. 3. – P. 20-23.

45 Patent No. 2474983 Russian Federation, IPC H05B 7/22 (2006/01) Electric arc plasma torch and annular input unit for initial reagents into the plasma torch: No. 2023118621: declared 13.07.2023: published 25.04.2024 Bulletin No. 12 / Leonchikov A. M., Prokhorov V. P.; applicant Limited Liability Company "Kedr" (RU). – 11 p.

46 Kadyrmetov, A. M. Conditions and results of increasing the thermal efficiency of an electric arc plasma torch for plasma spraying of regional coatings [Electronic resource] / A. M. Kadyrmetov, A. S. Pustovalov, E. V. Snyatkov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2017. - Vol. 4, No. 4 (22). - P. 89-98.

47 Kadyrmetov, A. M. Review of issues of the effectiveness of plasma spraying [Electronic resource] / A. M. Kadyrmetov, E. V. Snyatkov, A. S. Pustovalov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2017. – T. 3, No. 3 (21). – pp. 11-22.

48 Kadyrmetov, A. M. Justification of the design and parameters of a special plasma-matron for spraying multicomponent coatings / A. M. Kadyrmetov, D.A. Popov, A.I. Uskov, V.R. Fatkhulin // Modern production technologies in mechanical engineering. interuniversity collection of scientific works. – Voronezh, 2023. – pp. 117-126.

49 Kadyrmetov, A. M. Analysis of promising design solutions for an electric arc plasma torch for plasma spraying [Electronic resource] / A. M. Kadyrmetov, A. S. Pustovalov, V. O. Nikonov, A. F. Maltsev // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2015. - Vol. 1, No. 1 (11). - Pp. 62-67.

50 Patent No. 159626 Russian Federation, IPC H05H 1/00 (2006.01) Plasmatron for spraying: No. 2015146941/07: declared. 30.10.2015: published 2.02.2016 Bulletin No. 5 / Kadymretvo A. M., Pustovalov A. S., Snyatkov E. V., Nikonov V. O.; applicant FGBOU VO "VSTU". - 5 p.

51 Zhukov, M. F. Electric arc generators with interelectrode inserts / M. F. Zhukov M. F., A. S. An'shakov, I. M. Zasyupkin. - Novosibirsk: Publishing house "Nauka" - 1981. - 219 p.

52 Kadyrmetov, A. M. Air-plasma spraying with modulation of electrical and gas-dynamic parameters: Review based on data from the domestic and foreign press for 1957-1995 [Text] / A. M. Kadyrmetov; VGLTA. – Voronezh, 1996.– 60 p.: ill. – Bibliography: pp. 51-59. Dep. in VINITI 30.05.96, N1799-B96.

53 Lizunkov, G. P. Intensification of plasma spraying under the influence of acoustic and electrical vibrations on a heterogeneous jet / G. P. Lizunkov, V. D. Shimanovich, I. S. Burov, A. F. Ilyushchenko // Engineering Physics Journal. – 1984. – No. 5. – P. 812-816.

54 Gutman, B. E. Effect of Plasma Arc Modulation on Adhesion and Gas Permeability of Powder Coatings / B. E. Gutman, M. Kh. Shorshorov // Physics and Chemistry of Materials Processing. - 1986. - No. 6. - Pp. 61-64.

55 Kadyrmetov, A. M. Control of Technological Support of Plasma Coating Processes in the Mode of Electrical Parameter Modulation / A. M. Kadyrmetov. - Voronezh: Nauchnaya kniga, 2013. - 260 p.

56 Kadyrmetov, A. M. Promising Directions for Improving Plasma Spraying Technology with Pulse Arc Current Modulation / Kadyrmetov A. M., Snyatkov E. V., Plakhotin A. A., Mandrykin I. A., Burenko N. S. // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2022. - Vol. 1. - No. 1 (39). - Pp. 3-14.

57 Rykalin, N. N. Thermal Fundamentals of Welding. Part 1. Heat Propagation Processes during Arc Welding [Text] / N. N. Rykalin. - Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1947. - 272 p.

58 Rykalin, N. N. Energy Characteristics of an Arc Plasma Torch in Pulsed Mode with Current Modulation [Text] / N. N. Rykalin, A. V. Nikolaev, A. N. Asonov // Physics, Technology, and Application of Low-Temperature Plasma: Proceedings of the IV All-Union Conf. on Physics and Generators of Low-Temperature Plasma. - Alma-Ata, 1970. - Pp. 500-504.

59 Puzryakov, A. F. Influence of Oscillations of Electrical Parameters of a Plasmatron on Heat Transfer in a Two-Phase Plasma Jet [Text] / A. F. Puzryakov, A. V. Novoselov, V. I. Ivanov, V. A. Sologub // VII All-Union Conf. on Low-Temperature Plasma Generators: Abstract of Report. June 1980: In 3 Parts. – Novosibirsk, 1980. – Part 3. – Pp. 275-287.

60 Puzryakov, A. F. Theoretical Foundations of Plasma Spraying Technology: Textbook for the Course "Technology of Metal-Composite Structures" [Text] / A. F. Puzryakov. 2nd ed., revised and enlarged. – Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. N. E. Bauman, 2008. – 360 p.

61 Azharonok, V. V. Influence of an external acoustic field on the temperature of arc discharge plasma / V. V. Azharonok, N. F. Aleshin, V. A. Gubkevich, G. P. Lizunkov, N. I. Chu-Kubrik, V. D. Shimanovich // Engineering Physics Journal. – 1986. – No. 3. – P. 481-485.



2.5.5 – технология и оборудование
механической и физико-технической
обработки

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК С ПОВЫШЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ МЕТОДОМ ВИНТОВОГО ОБЖАТИЯ

Дементьев Вячеслав Борисович,
д.т.н., профессор, руководитель Института
механики, УдмФИЦ УрО РАН, г. Ижевск.

✉¹ Волков Кирилл Георгиевич,
к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории
термомеханических технологий, УдмФИЦ
УрО РАН, г. Ижевск, e-mail: vkirill@udman.ru

Мишарин Сергей Александрович,
старший преподаватель кафедры «Технология
производства систем вооружения»,
ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашнико-
ва», г. Ижевск.

Пряхин Алексей Борисович,
аспирант лаборатории термомеханических
технологий, УдмФИЦ УрО РАН, г. Ижевск.

Халявин Владислав Витальевич,
аспирант лаборатории термомеханических
технологий, УдмФИЦ УрО РАН, г. Ижевск.

Аннотация. Рассмотрена возможность изго-
тования трубных заготовок с повышенным
комплексом свойств методом высокотемпе-
ратурной термомеханической обработки
винтовым обжатием на гладкой оправке.
Выполнены исследования точности изгото-
ления трубных заготовок и микрострукту-
ры. Определено, что предложенная техно-
логия позволяет получать изделия с повы-
шенными точностными и механическими
характеристиками.

MANUFACTURING OF PIPE BLANKETS WITH AN INCREASED SET OF PROPERTIES BY THE METHOD OF SCREW COMPRESSION

Dementyev Vyacheslav Borisovich,
doctor of technical sciences, professor, head of the in-
stitute of mechanics, UdmFRC UrB RAS, Izhevsk.

✉¹ Volkov Kirill Georgievich,
candidate of technical sciences, senior researcher
at the laboratory of thermomechanical technolo-
gies, UdmFRC UrB RAS, Izhevsk,
e-mail: vkirill@udman.ru

Misharin Sergej Aleksandrovich,
senior lecturer at the department of armament sys-
tems production technology, Kalashnikov Izhevsk
state technical university, Izhevsk.

Pryahin Aleksej Borisovich,
postgraduate student at the laboratory of thermo-
mechanical technologies, UdmFRC UrB RAS,
Izhevsk.

Halyavin Vladislav Vital'evich,
postgraduate student at the laboratory of thermo-
mechanical technologies, UdmFRC UrB RAS,
Izhevsk.

Annotation. The possibility of manufacturing pipe
blanks with an increased complex of properties by
the method of high-temperature thermomechanical
processing by screw compression on a smooth
mandrel is considered. Research of the accuracy of
manufacturing pipe blanks and microstructure is
performed. It is determined that the proposed tech-
nology allows to obtain products with increased
precision and mechanical characteristic.

Ключевые слова: ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, УПРОЧНЕНИЕ, ТРУБНЫЕ ЗАГОТОВКИ, СТАЛЬ 38Х2МЮА. **Keywords:** THERMOMECHANICAL TREATMENT, HARDENING, PIPE BLANKS, 38H2MYuA STEEL.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Трубная продукция является основной потребностью таких стратегических секторов, как нефтегазовый комплекс, энергетика и машиностроение. От качества, надежности и экономической эффективности трубных заготовок напрямую зависят бесперебойность работы этих отраслей, безопасность эксплуатации и конечная стоимость выпускаемой продукции.

Современные технические и эксплуатационные требования к трубам постоянно уже стаются. Необходимость работы под высоким давлением, в агрессивных средах, при экстремальных температурах или в условиях Арктики предъявляет высочайшие требования к материалу, геометрической точности и физико-механическим свойствам исходной заготовки. Таким образом, именно этап производства трубной заготовки является критически важным для формирования конечных потребительских характеристик трубы.

Производство трубных заготовок представляет собой сложный технологический процесс, выбор которого зависит от требуемых размеров, точности, свойств материала и конечного назначения трубы. Все многообразие методов можно классифицировать по нескольким основным технологическим схемам (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнение основных технологических схем [1]

Технология	Тип трубы	Диапазон диаметров	Ключевые преимущества	Основные недостатки
Центробежное литье	Бесшовная	Большие, толстостенные	Высокая плотность, крупные габариты	Ограниченнная длина, шероховатость
Прессование	Бесшовная	Различные, толстостенные	Труднодеформируемые сплавы, точность	Высокая себестоимость, длина
Непрерывная прокатка	Бесшовная	Средние	Высочайшая производительность	Сложность настройки
Пилигримовая прокатка	Бесшовная	Большие, толстостенные	Крупногабаритные трубы	Низкая производительность
Электросварка	Сварная	Средние, большие	Экономичность, скорость	Наличие сварного шва

Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) винтовым обжатием (ВО) позволяет решить ряд недостатков, присущих другим методам и является одной из наиболее эффективных технологий интенсивной пластической деформации. Первоначально разработанный для получения объемных мелкозернистых материалов в виде прутков, метод был адаптирован для производства трубных заготовок с уникальным комплексом механических свойств [2].

ВО является разновидностью поперечно-винтовой прокатки, но отличается от неё кинематикой процесса. На практике используются две схемы обработки цилиндрических заготовок методом винтового обжатия [2, 3]:

- 1) обжатие заготовки с винтовым протягиванием через деформирующие ролики;

2) винтовое обжатие при помощи вращающейся деформирующейся головки с роликами с подпоркой заготовки;

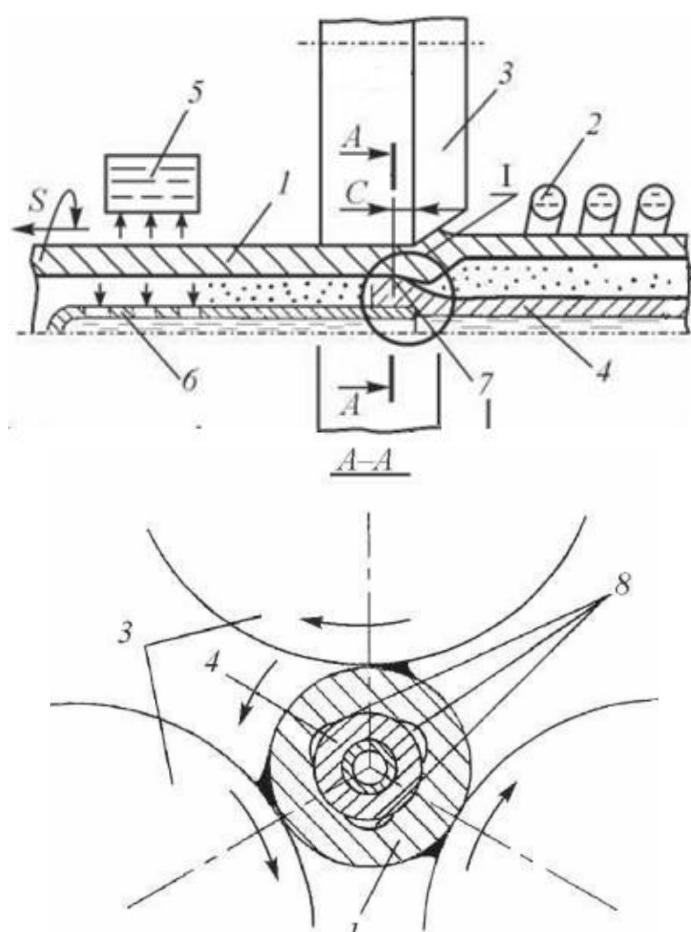
Обе эти схемы имеют общие признаки:

1) заготовка деформируется в трех неприводных гладких деформирующих роликах;

2) процесс обработки непрерывен за счет поступательного движения заготовки через индуктор, деформирующий узел и спрейер;

3) величина усилия натяжения или подача заготовки регулируется углом разворота роликов;

4) процесс деформации на водоохлаждаемой оправке с гребнем (рис. 1), установленном на расстоянии 0,2...0,3 длины калибрующей части от заборного конуса деформирующих роликов.



S – подача, мм/об; 1 – заготовка; 2 – индуктор; 3 – ролик; 4 – оправка; 5 – наружный спрейер;
6 – внутренний спрейер; 7 – гребень оправки; 8 – зазоры

Рисунок 1 – Схема ВТМО ВО трубной заготовки

Сущность процесса заключается в том, что заготовку нагревают токами высокой частоты до температуры аустенизации, деформируют ее в трех неприводных гладких роликах до заданного размера путем принудительного перемещения протягиванием. Процесс расширяет технологические возможности и повышает качество внутренней поверхности труб при упрочнении и калибровке без применения дополнительных средств зачистки [4].

В связи с этим, целью работы является разработка технологического процесса производства трубных заготовок методом ВТМО ВО с обеспечением повышенного комплекса свойств.

2 Материалы и методы

В качестве материала для получения трубных бесшовных изделий использовался прокат сортовой горячекатаный круглый ГОСТ 2590-2006 из жаропрочной релаксационностойкой стали 38Х2МЮА. Химический состав используемой стали определялся на эмиссионном оптическом спектрометре «Belec Compact Port».

Для обработки проката круглого сечения с целью получения бесшовной трубы с повышенным комплексом свойств был разработан технологический процесс на основе данных [5-9], состоящий из следующих операций: отрезная, токарная, глубокое сверление, ВТМО ВО, отпуск, отрезная, контроль.

На этапе отрезной операции производилась обрезка проката на мерные заготовки. Затем прутки подвергались глубокому сверлению канала диаметром 12 мм, после чего производились токарные работы для подготовки заготовки к ВТМО ВО. После этого выполнялась высокотемпературная термомеханическая обработка винтовым обжатием по режимам, представленным в табл. 2, в процессе которой заготовка подвергалась горячей пластической деформации с последующей закалкой в спрейерном устройстве. После ВТМО ВО трубы подвергались отпуску при температуре 480-520 °С с выдержкой 1 ч. Затем, на этапе отрезной операции, удалялся участок трубы, к которой производилось закрепление тянувшего устройства установки ВО. На этапе контрольной операции выполнялась проверка соответствия размеров, а также параметров формы и поверхностей требованиям к трубной заготовке.

Таблица 2 – Режимы ВТМО ВО и размеры образца

D_h , мм	d_h , мм	D_k , мм	d_k , мм	Режимы ВТМО				
				λ , %	S , мм/об	$T_{\text{деф}}$, °C	$T_{\text{нагр}}$, °C	$V_{\text{охл}}$, °C/c
25,0	12,0	22,0	10,0	22,5	5,0	960-980	980-1000	70-100

D_h, d_h – начальные наружный и внутренний диаметры соответственно;
 D_k, d_k – конечные наружный и внутренний диаметры соответственно;
 λ – степень обжатия;
 S – продольная подача заготовки;
 $T_{\text{деф}}$ – температура заготовки при деформации;
 $T_{\text{нагр}}$ – температура нагрева поверхности заготовки в индукторе;
 $V_{\text{охл}}$ – скорость охлаждения в спрейерном устройстве

Для оценки свойств получаемых трубных заготовок были выполнены лабораторные исследования по определению точностных показателей, твердости и микроструктуры стали.

Исследования отклонений формы и профиля поверхности, разностенности трубной заготовки после ВТМО ВО выполнялось с использованием системы «Talycenta system» фирмы «Taylor Hobson». Определение твердости образцов выполнялось на комбинированном твердомере МЕТ-УДА с ультразвуковым датчиком. Для оценки микроструктуры стали до и после обработки винтовым обжатием подготавливались образцы в соответствии с ГОСТ 5640-2020. Микрошлифы травились 4%-ным спиртовым раствором азотной кислоты. Снимки микроструктуры были получены на оптическом микроскопе Neophot-21, анализ выполнялся в соответствии с ГОСТ 5639-82 и ГОСТ 8233-56.

3 Результаты исследований

Полученные данные при анализе состава обрабатываемой стали и данные для стали 38Х2МЮА по ГОСТ 4543-2016 представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Фактический и нормативный состав стали 38Х2МЮА, %

Состав	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Al	Mo	S	P
Факт.	0,45	0,43	0,37	0,03	1,45	0,223	0,97	0,20	0,013	0,016
ГОСТ	0,35-0,42	0,20-0,45	0,30-0,60	< 0,3	1,35-1,65	< 0,3	0,70-1,10	0,15-0,25	< 0,025	< 0,025

Исследования точности размеров изделий после ВТМО ВО показали, что среднее значение наружного диаметра составило 21,92 мм, а диаметра канала – 10,07 мм. Непрямолинейность оси канала не превысила 0,1 мм на длине 300 мм. Разностенность в среднем составила не более 0,2 мм.

Твердость образцов, вырезанных из полученных трубных изделий, составила в среднем по пяти повторным измерениям в разных точках 56-58 HRC после закалки и 35-38 HRC после отпуска.

В ходе металлографических исследований были получены снимки микроструктуры, представленные на рис. 2.

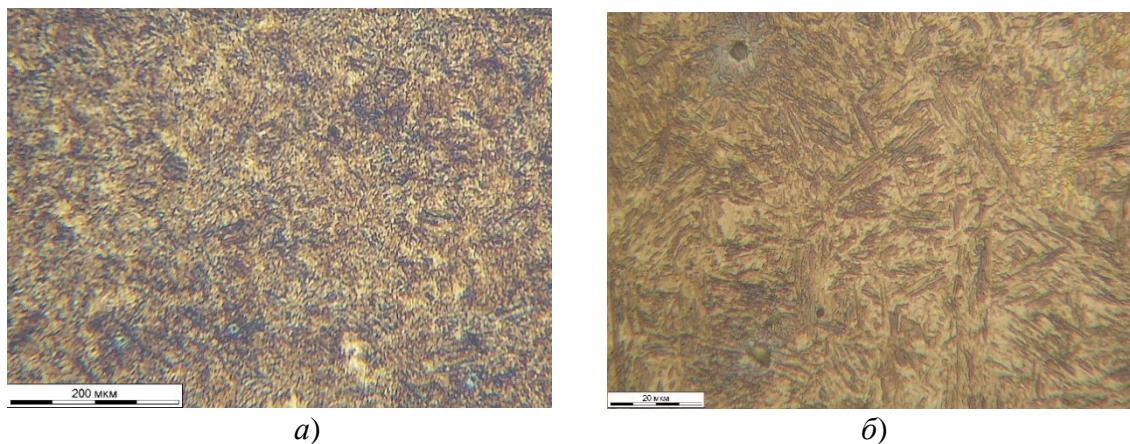


Рисунок 2 – Микроструктура стали 38Х2МЮА после ВТМО ВО
при увеличении (а) x100, (б) x1000

Согласно данным по изотермическому распаду аустенита для стали 38Х2МЮА, при скорости охлаждения в пределе 100 °C/c, формируется мартенситная структура, которая наблюдается на рис. 2. Оценка размера зерна по эталонам, приведенным в ГОСТ 5639-82, при увеличении x100 (рис. 2, а) показала соответствие 8-му баллу. Исследование размера игл мартенсита по ГОСТ 8233-56 при увеличении x1000 (рис. 2, б) показало соответствие 7-му баллу.

4 Обсуждение и заключение

Сравнение состава фактического и определенного нормативным документом показало, что используемый при исследованиях материал является сталью 38Х2МЮА. Отклонение по углероду может объясняться как погрешностью прибора, так и отклонениями при плавке.

Согласно ГОСТ 32678-2014 для бесшовных холоднодеформированных труб определено три класса точности изготовления: обычная, повышенная и высокая. Сравнение полученных при исследованиях результатов с требованиями нормативного документа показало, что по наружному диаметру труба после ВТМО ВО соответствует повышенному классу точности

и подпадает под 10 квалитет, толщина стенки и разностенность – высокому классу точности. Диаметр канала обеспечивается в пределах 11 квалитета. Непрямолинейность оси канала также соответствует требованиям стандарта.

Выбранная скорость охлаждения при закалке обеспечила твердость образцов на уровне 58 HRC после закалки, что на 3-4 единицы выше, чем при закалке с нагревом в печи [10, 11]. Однако, при ВТМО ВО возможно получение твердости в достаточно широком диапазоне за счет регулирования расхода жидкости в спрейерном устройстве и последующего отпуска [12].

Исследования микроструктуры показали, что закалка стали 38Х2МЮА в напряженном состоянии при ВТМО ВО позволяет значительно снизить размер зерна по сравнению с объемной закалкой в печи. Закалка при винтовом обжатии в режиме высокотемпературной термомеханической обработки обеспечивает размер зерна в пределах 8-го балла (средний диаметр зерна 0,022 мм), а при печной закалке – в пределах 5-го балла (средний диаметр зерна 0,062 мм). Также особенности структуры оказывают значительное влияние на механические свойства материала. Согласно исследованиям [2] после ВТМО ВО наблюдается повышение прочностных, пластических и эксплуатационных характеристик сталей. В среднем, предел прочности, условный предел текучести, относительное удлинение для сталей после высокотемпературной термомеханической обработки винтовым обжатием на 8-12 % выше аналогичных показателей для стали после термообработки с печным нагревом.

Список литературы

- 1 Килов, А. С. Производство заготовок. Трубы / А.С. Килов, Р.Ш. Мансуров. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. – 350 с.
- 2 Contribution to improving of machine parts mechanical properties by thermomechanical hardening / V. B. Dementyev, Z. Sagova, A. I. Korshunov [et al.] // MM Science Journal. – 2024. – Vol. 2024, No. 5. – P. 7800-7804. – DOI: 10.17973/mmsj.2024_11_2024058.
- 3 Дудырев, М.Д. Компьютерное моделирование способа винтовой прокатки с осевым натяжением / М.Д. Дудырев, А.С. Будников // Наука, технологии, образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей V Международной научно-практической конференции, 25 апреля 2025 г. – Пенза, 2025. – С. 20-27.
- 4 Липанов, А. М. К вопросу применения полых пальцев в траках военно - гусеничных машин / А. М. Липанов, В. Б. Дементьев, А. Д. Засыпкин // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2022. – № 4(124). – С. 86-91.
- 5 Development and computer simulation of a new technology for forming and strengthening screw fittings / S. Lezhnev, E. Panin, A. Tolkushkin [et al.] // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2023. – Vol. 58. – No. 5. – P. 955-960.
- 6 Uranga, P. Thermomechanical Processing of Steels / P. Uranga, H.M. Rodriguez-Ibane // Metals. – 2020. – No. 10(5). – P. 641. – <https://doi.org/10.3390/met10050641>
- 7 Томило, В.А. Утилизация бывших в употреблении труб холодной прокаткой / В.А. Томило, С.В. Пилипенко, А.В. Дудан // Известия Томского политехнического университета. Инжениринг геопрессоров. – 2022. – Т. 333. - № 8. – С. 118-125.
- 8 Прокатка труб из стали марки 08Х18Н10Т на ТПА 70-270 с двухвалковым станом для прошивки и раскатки / А.Р. Шамилов, А.В. Король, Е.Н. Обыденнов [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2024. – Т. 24. – № 2. – С. 49-60. – DOI: 10.145291met240206.
- 9 Яцун, Е.И. Исследование процесса глубокого сверления нержавеющей стали / Е.И. Яцун, О.С. Зубкова, С.Н. Могилев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – Т. 25. - № 4. – С. 19-28. – <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-19-28>
- 10 Влияние режима термической обработки высококачественной легированной стали на структуру, механические, акустические и магнитные характеристики. Часть 1. Объемная закалка и отпуск/Н.В. Абабков, А.А. Пашков, М.В. Пимонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 4. – С.58-69. – DOI:10.26730/1999-4125-2024-4-58-69
- 11 Исследование микротвердости бинарных термодиффузионных систем сталь-покрытие / А.И. Блесман, Д.А. Полонянкин, Д.В. Постников, Е.А. Рогачев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – №3. – С. 52-54.

12 Макаров, С. С. Математическое моделирование процесса охлаждения металлических изделий при термомеханической обработке / С. С. Макаров // Динамика технических систем "ДТС-2025": сборник трудов XIX международной научно-технической конференции, Ростов-на-Дону, 09–10 апреля 2025 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2025. – С. 48-53.

References

- 1 Kilov, A.S. Production of blanks. Pipes / A.S. Kilov, R.Sh. Mansurov. – Orenburg: GOU OGU, 2007. – 350 p.
- 2 Contribution to improving of machine parts mechanical properties by thermomechanical hardening / V. B. Dementyev, Z. Sagova, A. I. Korshunov [et al.] // MM Science Journal. – 2024. – Vol. 2024, No. 5. – P. 7800-7804. – DOI: 10.17973/mmsj.2024_11_2024058.
- 3 Dudarev, M.D. Computer Simulation of a Screw Rolling Method with Axial Tension / M.D. Dudarev, A.S. Budnikov // Science, Technology, Education: Current Issues, Achievements and Innovations: Collection of Articles from the V International Scientific and Practical Conference, 25 April 2025 – Penza, 2025. – P. 20-27.
- 4 Lipanov, A.M. To the Question of the Application of Hollow Fingers in Tracks Military Tracked Vehicles / A.M. Lipanov, V.B. Dementyev, A.D. Zasyipkin // Bulletin of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. – 2022. – No. 4(124). – P. 86-91.
- 5 Development and computer simulation of a new technology for forming and strengthening screw fittings / S. Lezhnev, E. Panin, A. Tolkushkin [et al.] // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2023. – Vol. 58. – No. 5. – P. 955-960.
- 6 Uranga, P. Thermomechanical Processing of Steels / P. Uranga, H.M. Rodriguez-Ibabe // Metals. – 2020. – No. 10(5). – P. 641. - <https://doi.org/10.3390/met10050641>
- 7 Tomilo, V.A. Cold Rolling of Used Pipes / V.A. Tomilo, S.V. Pilipenko, A.V. Dudan // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2022. Vol. 333. – No. 8. – P. 118-125.
- 8 Rolling of Pipe from Steel Grade 08X18H10T on a TPA 70-270 with a Two-Roll Mill for Squashing and Rolling / A.R. Shamilov, A.V. Korol, E.N. Obydenov [et al.] // Metal Forming. Technology and Equipment of Metal Forming. – 2024. – Vol. 24. – No. 2. – P. 49-60. – DOI: 10.145291met240206.
- 9 Yatsun, E.I. Investigation of the Process of Deep Drilling of Stainless Steel / E.I. Yatsun, O.S. Zubkova, S.N. Mogilev // Proceedings of the Southwest State University. – 2021. – Vol. 25. – No. 4. – P. 19-28. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-19-28>
- 10 Influence of Hardening Mode of High-quality Alloy Steel on Structure, Mechanical, Acoustic and Magnetic Characteristics. Part 1. Volume Hardening and Tempering / N.V. Ababkov, A.A. Pashkov, M.V. Pimonov // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2024. – No. 4. – P. 58-69. – DOI:10.26730/1999-4125-2024-4-58-69
- 11 Microhardness Study of Binary Thermal Diffusion Coating Steel Systems / A.I. Blesman, D.A. Polonyankin, D.V. Postnikov, E.A. Rogachev // Dynamics of systems, mechanisms and machines. – 2014. – No. 3. – P. 52-54.
- 12 Makarov, S.S. Mathematical Modeling of the Cooling Process of Metal Products During Thermo-mechanical Treatment / S.S. Makarov // Dynamics of Technical Systems "DTS-2025": Proceedings of the XIX International Scientific and Technical Conference, Rostov-on-Don, 9-10 April 2025. – Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2025. – P.48-53.

© Дементьев В. Б., Волков К. Г., Мишарин С. А., Пряхин А. Б., Халювин В. В., 2025



2.5.5 – технология и оборудование
механической и физико-технической
обработки

ПРОШИВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ И ПАЗОВ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Сухоруков Владимир Николаевич,
к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

✉¹ Смоленцев Евгений Владиславович,
д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Милинчук Кирилл Александрович,
магистр кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, ведущий инженер-конструктор ГК «WESTEROS-SUGAR», г. Воронеж, e-mail: lil-ovs@yandex.ru

Бабенков Никита Николаевич,
магистр кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, инженер-конструктор 2 категории ООО «ЭКОТЕХНИКА ХОЛДИНГ», г. Воронеж, e-mail: babenkoff.nikita@yandex.ru

Аннотация. В данной работе изложено описание комбинированного метода обработки материалов использующий принципы электрохимического электроэррозионного способа обработки. Приведены математические зависимости для расчетов режимов проведения обработки, а также графики зависимостей для определения режимов, обеспечивающих заданную точность обработки в зависимости от материалов, используемых в качестве рабочей среды.

STITCHING OF HOLES AND GROOVES BY MULTIELECTRODE ELECTROEROSION AND CHEMICAL TREATMENT

Sukhorukov Vladimir Nikolaevich,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

✉¹ Smolentsev Evgeniy Vladislavovich,
doctor of technical sciences, professor, professor of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Milinchuk Kirill Aleksandrovich,
master of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, leading design engineer of the WESTEROS-SUGAR Group of Companies, Voronezh, e-mail: lil-ovs@yandex.ru

Babenkov Nikita Nikolaevich,
master of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, 2nd category design engineer, ECO-TEKHNIKA HOLDING LLC, Voronezh, e-mail: babenkoff.nikita@yandex.ru

Annotation. This paper describes a combined method of processing materials using the principles of electrochemical electroerosion treatment. Mathematical dependencies are given for calculating the processing modes, as well as dependency graphs for determining the modes that ensure a given processing accuracy, depending on the materials used as the working medium.

Ключевые слова: КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА, ЭЛЕКТРОХИМИЯ, ЭЛЕКТРОЭРОЗИЯ, МАТЕРИАЛ. **Keywords:** COMBINED PROCESSING, ELECTROCHEMISTRY, ELECTROEROSION, MATERIAL.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Комбинация в едином процессе различных физических и химических воздействий позволяет при правильном их сочетании нивелировать нежелательные для технолога эффекты и повышать нужные технологические показатели.

Основанные на отдельных вышеуказанных воздействиях с наложением электромагнитных полей электрофизикохимические методы обработки обладают следующими общими преимуществами [1-7]:

- 1) Возможность формообразования геометрии путем простого поступательного движения инструмента.
- 2) Достижение микронных допусков при высокой чистоте поверхности.
- 3) Износ инструмента не оказывает существенного влияния на параметры обработки, так как в одних методах он вообще отсутствует, а в других – его можно компенсировать различными способами.
- 4) Возможность обработки материалов с высокой твердостью и другими физико-химическими свойствами, которые существенно снижают или вообще делают невозможной лазерную обработку.

Также вышеперечисленные методы обладают и схожими чертами, ограничивающими в ряде случаев их область эффективного применения:

- 1) Сложность оборудования и управления параметрами процесса.
- 2) Высокая энергоемкость процессов.
- 3) Особенные требования по экологичности и технике безопасности.
- 4) Высокая стоимость оборудования и расходных материалов.

Положительные и отрицательные стороны конкретно таких методов, как электроэроплатиновая и электрохимическая обработка, достаточно хорошо известны и изучены [8-10]. Для электрохимической обработки к особенностям можно отнести снятие остаточных напряжений от предыдущих операций в готовой детали, достижение за один переход шероховатости, достигаемой отделочными операциями (зеркальная обработанная поверхность) и отсутствие износа инструмента при штатной работе оборудования. При этом надо учитывать, что малые межэлектродные зазоры требуют специальных конструктивных и технологических режимов для того, чтобы не допускать контакта анода и электрода-инструмента во избежание коротких замыканий, обеспечения удаления продуктов обработки с поверхности заготовки и поддержания необходимых параметров рабочей жидкости-электролита. Другой хорошо изученный метод электрофизической обработки – электроэроплатиновый, обладает высокой точностью и управление его параметрами достаточно просто. Вместе с тем, поверхность после него подвергается термическим превращениям, возможно образование трещин на заготовке, что в ряде случаев недопустимо. При повышении производительности процесса в большинстве схем усиливается износ инструмента, что имеет свои негативные стороны.

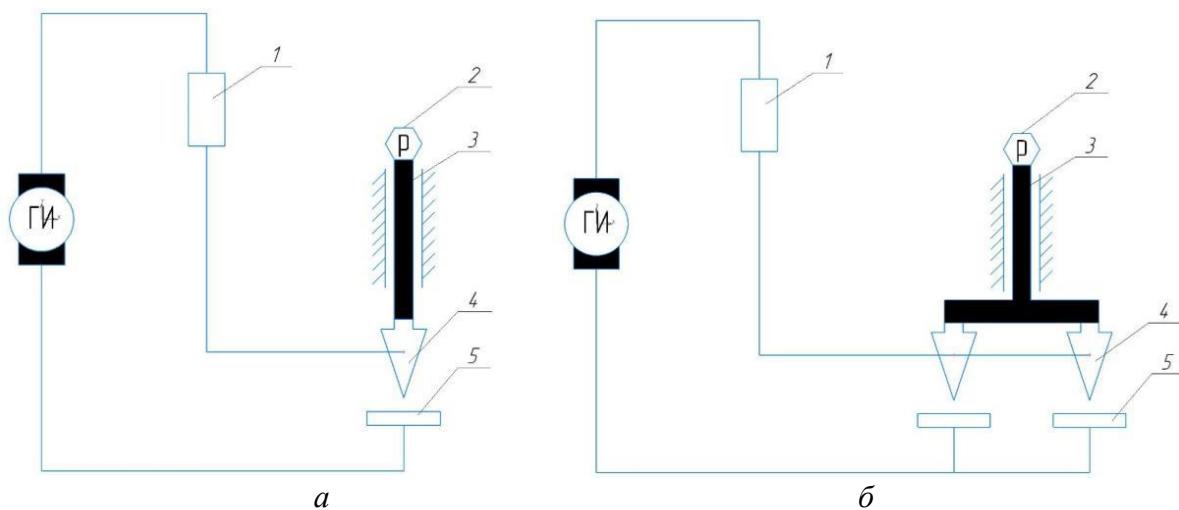
Таким образом, комбинация теплового и химического воздействия в одной технологической операции может дать возможность повысить параметры процессов и снизить негативные черты, присущие классическим методам обработки.

2 Материалы и методы

Особенность комбинированного метода обработки позволяет одновременно использовать несколько электродов-инструментов при соблюдении определённых условий и соотношений, применяемых для многоинструментальной обработки. Контур представляет собой электрическую цепь питания с одним или несколькими электродами-инструментами [11, 12].

В ряде случаев целесообразно использовать многоинструментальную одноконтурную технологию обработки, при которой инструменты не разделены электрическими сопротивлениями. При этом удается облегчить обработку сложнопрофильных поверхностей и уменьшить брак при обработке тонкостенных деталей. Кроме того, можно обеспечить удовлетворительную производительность при небольших силах тока, что дает возможность уменьшить глубину измененного слоя, снизить вероятность образования трещин на поверхности заготовки [13-20]. На рис. 1 и 2 показаны схемы одно- и многоинструментальной комбинированной обработки.

Для примера рассмотрены результаты исследования части поверхности сопла ракетного двигателя из материала БрХЦрТВ (ТУ 48-21-588-87), обработанной комбинированным методом. Линейные измерения проводились с использованием металлографического микроскопа Neophot 2.



ГИ – генератор импульсов, 1 – реостат, 2 – подающее устройство, 3 – державка электрода-инструмента, 4 – рабочая часть электрода-инструмента, 5 – обрабатываемая(ые) заготовка(и)

Рисунок 1 – Схема одноинструментальной (а) и многоинструментальной (б) одноконтурной обработки

3 Результаты исследований

Для комбинированной обработки сопрягаемых поверхностей необходимо определить оптимальные режимы для электроэррозионного и электрохимического процессов. Режимы электроэррозионного прошивания выбираются с учётом достижения экономически целесообразной шероховатости, которая затем удаляется при анодном растворении. Согласно литературным данным, неравномерность припуска для электрохимической обработки не должна превышать половины заданного допуска на ширину паза [2].

Для чистовой обработки с использование RC-схемы емкость конденсаторов составит [1]:

$$C = \left(\frac{R_z}{KU^{1.5}} \right), \quad (1)$$

где K – коэффициент; U – напряжение холостого хода, выбирается в диапазоне 80-100 В; R_z – величина экономически оправданной шероховатости при электроэррозионном воздействии, мкм.

В случае использования других видов генераторов режимы назначают по величине R_z через эквивалентную мощность импульса, Вт:

$$W_u = \frac{CU^2}{2}, \quad (2)$$

Глубина измененного слоя $T = f(W_u)$ [15, 16]. Для RC-генератора:

$$T = K_1 C^{\frac{1}{3}} U^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от режима и марки обрабатываемого материала.

При комбинированной обработке заключительный этап следует выполнять без электроэррозионной составляющей на режимах с напряжением не более 6-8 В [2]. Время этого этапа рассчитывается по зависимости, с:

$$t = \frac{2S_\delta(R_z - R_{z\text{доп.}})}{2\eta \frac{\alpha}{\gamma} \chi(u - \Delta u)}, \quad (4)$$

где S_δ – зазор между катодом и анодом, мм. Согласно [3] величину зазора S_δ назначают в диапазоне от 0,02 до 0,12 мм; $R_{z\text{доп.}}$ – высота микронеровностей паза, заданная в чертеже.

Для рассматриваемого случая $\eta = 0,2\text{-}0,3$;

где η – выход по току, безразмерный коэффициент; χ – проводимость, См/мм; S – межэлектродный зазор, мм; α – электрохимический эквивалент, мг/(А·с); γ – плотность обрабатываемого материала, мг/мм³; $u, \Delta u$ – напряжение и потери напряжения в зазоре соответственно, В.

Съем материала с боковых поверхностей обработанного паза за время прошивки и устранения шероховатостей не может превышать допуска на сторону паза δ .

При этом методом технологических размерных цепей конструкторские допуски пересчитывают так, чтобы в процессе обработки оставался наибольший припуск.

Тогда общее время формообразования боковых поверхностей паза определится суммой, с:

$$t_\Sigma = t + t_1, \quad (5)$$

где t_1 – время прошивки комбинированной обработкой паза длиной ℓ со скоростью V_Σ , с:

$$t = \ell / V_\Sigma. \quad (6)$$

За это время съем Z металла с боковой поверхности составит, мм:

$$Z = \frac{\alpha \eta \chi (u - \Delta u)}{S_\delta} \cdot t_\Sigma \delta_1, \quad (7)$$

где δ_1 – технологический допуск боковой поверхности, мкм.

Из литературы [1] известно, что комбинированная электроэррозионно-химическая обработка хотя и позволяет уменьшить относительный износ электрода-инструмента, но все равно его значения необходимо учитывать для недопущения выхода за пределы допусков, заложенных в чертеже готовой детали. Для этого в технологическом процессе предусматривают переходы для калибровки электрода-инструмента или, если она невозможна, – его полную замену.

Оценить количество деталей N , обрабатываемых до калибровки изношенной части инструмента-электрода, можно по зависимости, ед.:

$$N = \frac{t_3}{t_\Sigma}, \quad (8)$$

где t_3 – общее время наработки до предельного износа, с; t_Σ – время обработки одного паза, с.

$$t_3 = \frac{i\delta_2}{V\Sigma}, \quad (9)$$

здесь i – относительный износ инструмента (отношение объема металла, снятого с инструмента, к объему, удаленному с заготовки). Для комбинированного процесса $i = 0,12-0,2$; δ_2 – допуск на глубину паза, мкм; t_Σ – время обработки одного паза, с.

$$t = \frac{\ell}{V\Sigma} + \frac{\Delta\ell}{V\Sigma}, \quad (10)$$

где $\Delta\ell$ – выход конца электрода в паз при калибровке, мм, $\Delta\ell$ изменяется от $(0,1-0,2)L$ до $(0,8 - 0,9)L$ (L – ширина проточки на детали, мм).

Тогда расчетная зависимость приобретает вид:

$$N = \frac{2\gamma\delta_2 V_\Sigma}{2V_\Sigma\ell + L}. \quad (11)$$

В процессе прошивки и последующей обработки боковых поверхностей паза требуется обеспечить соответствие съёма материала допускам на размер паза. Конструкторские допуски преобразуются методом технологических размерных цепей таким образом, чтобы обеспечить максимальный припуск на этапе обработки. Общее время анодного растворения боковых поверхностей паза определяется с учётом указанных условий. Оценка шероховатости поверхности после комбинированной обработки при различных режимах технологического процесса приведена в табл. 1. Также металлографически изучались структурные изменения в приповерхностном слое при аналогичных технологических параметрах.

На основе экспериментальных данных и статистической обработки результатов были установлены зависимости качества поверхности паза от технологических параметров, которое определялось взаимодействием электроэррозионной и электрохимической составляющих.

Электроэррозионная обработка формирует неровности и физико-химические изменения в поверхностных слоях, которые влияют на эксплуатационные характеристики детали. Поверхность представляет собой совокупность перекрывающихся лунок, размер которых зависит от энергии импульсов и материала электродов. Увеличение энергии импульсов и снижение их частоты приводят к росту размеров лунок, а повышение частоты импульсов уменьшает расстояние между центрами лунок и их глубину. Поверхностный слой состоит из расплавленного металла в лунках и прилегающего слоя с изменённой структурой из-за быстрого нагрева и охлаждения.

Микрорельеф от электрохимической составляющей обработки определяется структурой материала заготовки, составом, температурой, скоростью прокачки электролита и электрическими параметрами. Эти параметры изменяются во времени, что приводит к неравномерному анодному растворению в различных точках. Характер микронеровностей зависит от материала и чаще наблюдается межкристаллическое растрескивание, влияющее на шероховатость поверхности. У крупнозернистых сплавов шероховатость выше, чем у мелкозернистых.

При высоких плотностях тока растворение может происходить не только по границам, но и по зерну, образуя местные углубления.

Таблица 1 – Измерения неровностей поверхности

№ опыта	Максимальное значение глубины микронеровностей, мкм	Среднее значение глубины микронеровностей, мкм
1	1,8	1
2	2,4	1,83
3	1,95	1,54
4	2,7	2,10
5	1,7	1,31
6	2,3	1,52
7	1,85	1,37
8	2,5	1,95
9	2,15	1,74
10	3,65	2,7
11	1,2	1,04
12	3,2	2,43
13	3,25	2,5
14	2,9	2,3
15	3,1	2,35

По результатам исследований комбинированной обработки части сопла ракетного двигателя из материала БрХЦрТВ (ТУ 48-21-588-87) получены зависимости шероховатости поверхности от состава электролита и силы тока на RC-генераторе для различных материалов электрода-инструмента (рис. 3). Результаты исследования показывают, что увеличение силы тока на RC-генераторе приводит к увеличению шероховатости поверхности. Оптимальные параметры обработки графитовыми композициями обеспечивают минимальную шероховатость (Rz 0,75-1,5 мкм). При использовании медных и вольфрамовых инструментов шероховатость несколько выше (1,6-2,75 мкм). На участке от 0,4 до 0,7 А процесс обработки с применением медного и вольфрамового инструментов характеризуется стабильностью, при этом шероховатость практически одинакова. Однако при увеличении силы тока до 1,1 А разница в высоте микронеровностей достигает 1 мкм в пользу меди. Латунный инструмент демонстрирует наибольшую шероховатость, причём зависимость имеет нелинейный характер. Увеличение силы тока с 0,25 до 0,35 А вызывает резкий скачок шероховатости с 2,1 до 2,75 мкм, затем на участке 0,28-0,95 А наблюдается постепенный рост шероховатости, а при силе тока 1-1,1 А шероховатость остаётся практически неизменной с возможным незначительным снижением.

Результаты исследования показывают, что увеличение силы тока на RC-генераторе приводит к увеличению шероховатости поверхности. Оптимальные параметры обработки графитовыми композициями обеспечивают минимальную шероховатость ($Rz = 0,75-1,5$ мкм). При использовании медных и вольфрамовых инструментов шероховатость несколько выше (1,6-2,75 мкм). Латунный инструмент демонстрирует наибольшую шероховатость, причём зависимость имеет нелинейный характер. Увеличение силы тока с 0,25 до 0,35 А вызывает резкий скачок шероховатости с 2,1 до 2,75 мкм, затем на участке 0,28-0,95 А наблюдается постепенный рост шероховатости, а при силе тока 1-1,1 А шероховатость остаётся практически неизменной, с возможным незначительным снижением.

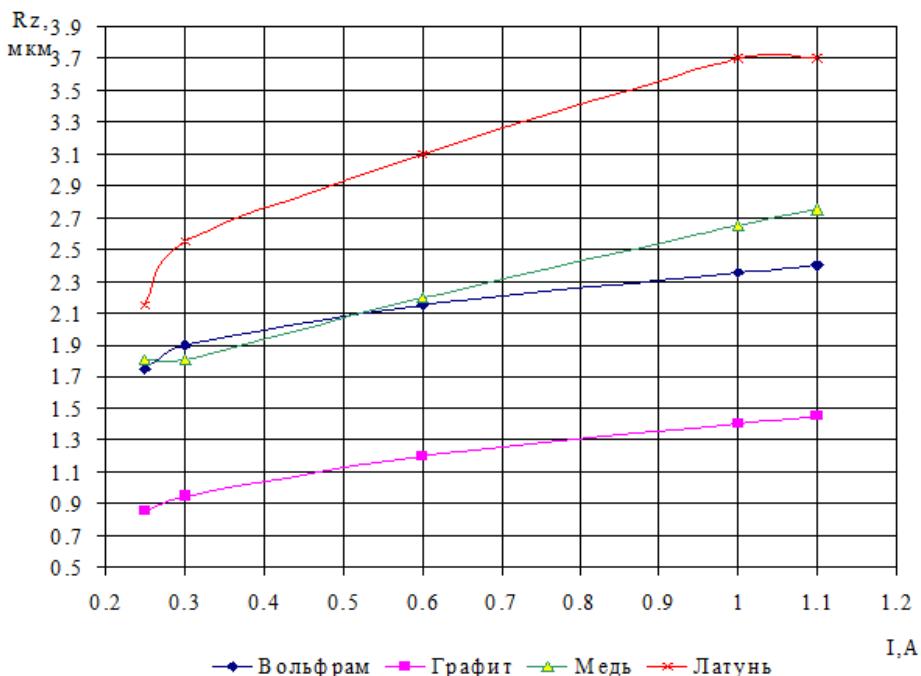


Рисунок 3 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности R_z материала от силы тока I при электропроводности рабочей среды $15\% \text{NaCl} + 5\% \text{NaNO}_3$ ($\chi = 0,0254$) для различных материалов электрод-инструмента

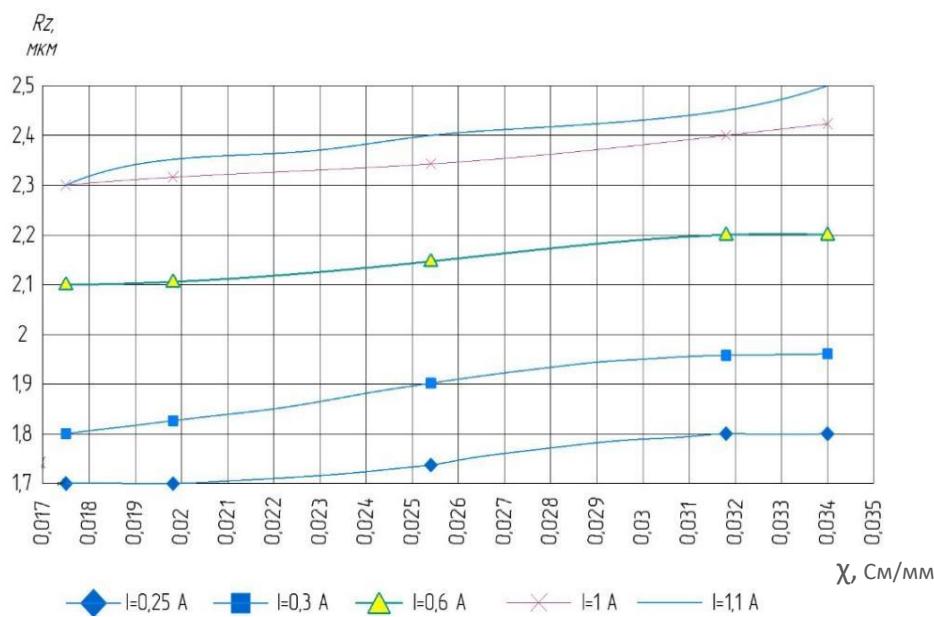


Рисунок 4 – Зависимость шероховатости R_z обработанной поверхности от электропроводности рабочей среды χ при обработке вольфрамовым электродом-инструментом при различных силах тока I

Исследование зависимости шероховатости от силы тока при различных составах электролита с электропроводностью рабочей среды в интервале $\chi = 0,017 \dots 0,035$ См/мм для вольфрамового инструмента показало, что оптимальные условия обработки обеспечивают минимальную шероховатость поверхности $R_z = 1,7 \dots 1,8$ мкм при силе тока 0,25 А (рис. 4). С увели-

чением концентрации электролита его удельная проводимость возрастает до достижения максимального значения, после чего происходит снижение. Это обусловлено усилением взаимного притяжения ионов, что ограничивает их подвижность и способность к переносу заряда.

Анализ графика (рис. 4) демонстрирует, что при увеличении электропроводности рабочей среды наблюдается постепенное увеличение значений шероховатости поверхности. На участке от 0,0175 до 0,02 мкм увеличение шероховатости происходит практически одинаково для всех режимов обработки. На интервале от 0,02 до 0,0315 мкм динамика роста шероховатости остаётся стабильной в пределах 0,1 мкм. На участке от 0,0315 до 0,034 мкм при использовании токов 0,25А, 0,3А и 0,6А изменений в росте шероховатости не наблюдается. Однако при увеличении тока до 1А и выше происходит значительное увеличение шероховатости поверхности до 2,5 мкм, что нежелательно для данного процесса. Различия в величине шероховатости поверхности при обработке вольфрамовым инструментом зависят от силы тока. Для тока $I = 0,25$ А параметр Rz варьируется в диапазоне от 1,7 до 1,8 мкм, при токе $I = 0,3$ А значения Rz составляют величину от 1,8 до 1,95 мкм, при токе $I = 0,6$ А – от 2,1 до 2,2 мкм, при токе $I = 1$ А – от 2,3 до 2,4 мкм, при токе $I = 1,1$ А – от 2,3 до 2,5 мкм.

4 Обсуждение и заключение

Сочетание предложенной обобщенной математической модели комбинированного электрофизикохимического процесса, позволяющей рассчитывать время обработки и величину съема металла, и экспериментальных данных по влиянию на качественные параметры обработки поверхности режимов обработки позволяет находить оптимальные или рациональные режимы прошивки отверстий и пазов и управлять этим процессом с помощью удобного параметра времени обработки. Это подтверждается полученными экспериментальными результатами на примере исследованной бронзы БрХЦрТВ, которые показали характер влияния параметров процесса на качественные параметры обработанной поверхности. Рассмотренный подход может служить методической основой расчета режимов комбинированного электрофизикохимического процесса для других материалов обрабатываемых поверхностей, для чего потребуются предварительные экспериментальные оценки.

Список литературы

- 1 Справочник технолога (справочное издание) / под. ред. Суслова А.Г. // М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
- 2 Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М. Машиностроение. 2005. – 511 с.
- 3 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. / Под ред. В.П. Смоленцева. М: Высшая школа, 1983. – 247 с.
- 4 Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.В. Кузовкин, Г.П. Смоленцев, А.И. Часовских. Воронеж: ВГТУ, 1996. – 168 с.
- 5 Смоленцев, В.П. Влияние электрохимической размерной обработки на физико-механические характеристики металлов // Электрохимическая обработка металлов. Сб. науч. тр. Кишинев: "Штиинца", 1972. – 226 с.
- 6 Сулима, А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. М.: Машиностроение, 1974. – 255 с.
- 7 Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки / Смоленцев В.П., Смоленцев Е.В. // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 5-9.
- 8 Абляз Т.Р. Изучение изменения свойств электродов в зависимости от режимов проволочно-вырезной электроэррозионной обработки // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – 2011. – Т. 13. – № 1. – С. 87-93.
- 9 Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Кремлев С.С. Применение электродов-инструментов с покрытием для электроэррозионной обработки стали 38Х2Н2МА // СТИН. - 2017. - № 5. - С. 20 -21
- 10 Эмпирическое моделирование межэлектродного при электроэррозионной обработке стали

38Х2Н2МА / Т.Н. Абляз, Е.С. Шлыков, Д.А. Борисов, А.А. Шумков, И.Ю. Летягин// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материалы и технологии. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 67-79.

11 Куз В.В. Исследование процесса получения отверстий полым электродом на модернизированном электроэррозионном станке ЧПУ / В.В. Куз, М.С. Разумов, Д.А. Зубков, А.С. Бышкин, А.А. Неструев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. – № 3. – С. 395-402.

12 Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokozhukhova, V.G. Gritsyuk// Materials Today: Proceedings, 19 (2019), 2065-2067 DOI: [10.1016/j.matpr.2019.07.075](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.075)

13 Innovative Methods For Obtaining Artificial Roughness On The Surfaces Of Heat-Loaded Parts Of The Liquid Rocket Engines Combustion Chamber / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokozhukhova, Yakhnevich S.S. // AIP Conference Proceedings 2318, 030004 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035987>

14 Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z.L. Peng, Y.N. Li, D. Fang, Y.Y. Zhang. - USA: JCPRC5, 2013. - P. 859-864.

15 Jiajing Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Modeling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. - 2016. - № 42. - P. 685-690.

16 Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM, 1992 - p. 404-409.

17 Umang Maradia. Meso-Micro EDM: diss. Dr. sc. ETH Zurich No. 22024. - Zurich, 2014. - 246 p.

18 Matthias Hackert-Oschatzchen. Single Discharge Simulations of Needle Pulses for Electrothermal Ablation. - Rotterdam: COMSOL Conference, 2013. - P. 1-5.

19 Weingartner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining // 1st CIRP Global Web Conference. - 2012. - № 2. - P. 74-78.

20 Chander Parkash Khatter Analysis of surface integrity in electrical discharge machining (EDM) process for tungsten carbide material: dis. Ph. D. - Patiala, India, 2010.

References

1 Technologist's Handbook (reference edition) / ed. Suslova A.G. // M.: Innovative mechanical engineering, 2019. 800 p.

2 Smolentsev E.V. Design of electrical and combined processing methods M.: Mechanical engineering, 2005 - 511 p.

3 Electrophysical and electrochemical methods of materials processing: In 2 volumes/ Edited by V.P. Smolentsev. M.: Higher School, 1983.

4 Combined processing methods / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, A.V. Kuzovkin, G.P. Smolentsev, A.I. Chasovskikh. Voronezh: VSTU, 1996. 168 p.

5 Smolentsev V.P. The influence of electrochemical dimensional processing on the physical and mechanical characteristics of metals // Electrochemical processing of metals. Collection of scientific articles Chisinau: "Stiinza", 1972.

6 Sulima A.M. Surface layer quality and fatigue strength of parts made of heat-resistant and titanium alloys / A.M. Sulima, M.I. Evstigneev. M.: Mashinostroenie, 1974.

7 State and prospects of development of combined processing methods / Smolentsev V.P., Smolentsev E.V. // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov. 2017. No. 2 (41). pp. 5-9.

8 Ablyaz T.R. Study of changes in the properties of electrodes depending on the modes of wire-cut electroerosion treatment // Bulletin of PSTU. Mechanical engineering, materials science. - 2011. - Vol. 13. - No. 1. - pp. 87-93.

9 Ablyaz T.P., Shlykov E.C., Kremlev S.S. Application of coated tool electrodes for electroerosion treatment of 38X2N2MA steel // STIN. - 2017. - No. 5. - pp. 20-21

10 Empirical modeling of interelectrode flow during electroerosion treatment of 38X2N2MA steel / T.N., Balyas, E.S. Shlykov, D.A. Borisov, A.A. Shumkov, I.Yu. // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. - 2017. - Vol. 19, No. 2. - pp. 67-79.

11 Kutz V.V. Investigation of the process of obtaining holes with a hollow electrode on a modernized electroerosion CNC machine / V.V. Kutz, M.S. Razumov, D.A. Zubkov, A.S. Byshkin, A.A. Nestruev // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2020. No. 3. pp. 395-402.

12 Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokozhukhova, V.G. Gritsyuk// Materials Today: Proceedings, 19 (2019), 2065-2067 DOI: [10.1016/j.matpr.2019.07.075](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.075)

13 Innovative Methods For Obtainig Artificial Roughness On The Surfaces Of Heat-Loaded Parts Of The Liquid Rocket Engines Combustion Chamber / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokozhukhova, Yukhnevich S.S. // AIP Conference Proceedings 2318, 030004 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035987>

14 Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z.L. Peng, Y.N. Li, D. Fang, Y.Y. Zhang. - USA: JCPRC5, 2013. - P. 859-864.

15 Jiajing Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Modeling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. - 2016. - № 42. - P. 685-690.

16 Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM, 1992 - p. 404-409.

17 Umang Maradia. Meso-Micro EDM: diss. Dr. sc. ETH Zurich No. 22024. - Zurich, 2014. - 246 p.

18 Matthias Hackert-Oschatzchen. Single Discharge Simulations of Needle Pulses for Electrothermal Ablation. - Rotterdam: COMSOL Conference, 2013. - P. 1-5.

19 Weingartner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining // 1st CIRP Global Web Conference. - 2012. - № 2. - P. 74-78.

20 Chander Parkash Khatter Analysis of surface integrity in electrical discharge machining (EDM) process for tungsten carbide material: dis. Ph. D. - Patiala, India, 2010.

© Сухоруков В. Н., Смоленцев Е. В., Милинчук К. А., Бабенков Н. Н., 2025



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО СПОСОБА ДОРОЖНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Ануфриев Кирилл Андреевич,
аспирант кафедры наземных транспортно-технологических машин, Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, e-mail: k.anufry@yandex.ru

Евтиков Сергей Аркадьевич,
д.т.н., проф. кафедры наземных транспортно-технологических машин, Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, e-mail: s.a.evt@mail.ru

¹ **Ануфриев Евгений Андреевич,**
студент кафедры наземных транспортно-технологических машин, Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, e-mail: e.anufriev521@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке усовершенствованного способа диагностики автомобильных дорог с использованием 3D-сканирующего устройства. Представлены результаты исследования, подтверждающие взаимосвязь между состоянием дорожной инфраструктуры и показателями аварийности. Предложена комплексная система управления состоянием дорог, включающая восемь последовательных этапов.

Ключевые слова: БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ, ДИАГНОСТИКА ДОРОГ, ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ СТАБИЛИЗАТОР, КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ.

THE POSSIBILITIES OF USING AN IMPROVED ROAD DIAGNOSTIC SYSTEM TO IMPROVE ROAD SAFETY

Anufriev Kirill Andreevich,
graduate student of the department of land transport and technological machines, Saint Petersburg state university of architecture and civil engineering, Saint Petersburg, e-mail: k.anufry@yandex.ru

Yevtyukov Sergey Arcadyevich,
doctor of technical sciences, prof. of the de-partment of land transport and technological machines, Saint Petersburg state university of architecture and civil engineering, Saint Petersburg, e-mail: s.a.evt@mail.ru

¹ **Anufriev Evgeniy Andreevich,**
student of the department of land transport and technological machines, Saint Petersburg state university of architecture and civil engineering, Saint Petersburg, e-mail: e.anufriev521@yandex.ru

Annotation. The article is devoted to the development of an improved method for diagnosing automobile roads using a 3D scanning device. The results of the study are presented, confirming the relationship between the state of the road infrastructure and accident rates. A comprehensive road condition management system is proposed, which includes eight consecutive stages.

Keywords: ROAD TRAFFIC SAFETY, ROAD DIAGNOSTICS, GYROSCOPIC STABILIZER, CORRELATION ANALYSIS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Повышение безопасности дорожного движения остается приоритетной задачей национального масштаба, регламентированной Федеральным законом «О безопасности дорожного движения». В условиях активного развития дорожной инфраструктуры особую актуальность приобретает проблема соответствия технических средств организации дорожного движения (ТСОДД) установленным нормативам, поскольку их некорректное применение непрямую влияет на показатели аварийности.

Современное состояние дорожно-транспортной сети характеризуется наличием системных нарушений в обустройстве автомобильных дорог. Согласно статистическим данным в течении первых 6 месяцев 2025 года 30,9 % от общего числа ДТП были связаны с недостатками эксплуатационного состояния и обустройства дорог. Наиболее критичными нарушениями, оказывающими влияние на безопасность дорожного движения, являются:

- отсутствие или недостаточная видимость горизонтальной разметки (70,4 % от ДТП с нарушениями дорожных условий);
- отсутствие дорожных знаков в необходимых местах (14,1 %);
- неправильное применение и плохая видимость установленных знаков (11,9 %) [1].

Анализ структуры аварийности демонстрирует устойчивую зависимость между состоянием дорожной инфраструктуры и тяжестью последствий ДТП. Наибольшую опасность представляют съезды с дороги (11 погибших на 100 пострадавших) и наезды на препятствия (9 погибших на 100 пострадавших). При этом в темное время суток тяжесть последствий ДТП достигает 10,4 погибших на 100 пострадавших, что более чем в 1,5 раза превышает аналогичный показатель для светлого времени суток (6,5 погибших на 100 пострадавших).

Распределение основных видов ДТП показывает, что столкновения транспортных средств (44,5 %), наезды на пешеходов (24,9 %) и съезды с дороги (10,7 %) в совокупности обуславливают 84,5 % всех погибших в дорожно-транспортных происшествиях. Наиболее частыми нарушениями ПДД, приводящими к тяжелым последствиям, являются выезд на полосу встречного движения (1466 погибших) и несоответствие скорости конкретным условиям движения (1444 погибших) [2].

Указанные статистические данные подтверждают необходимость разработки современных подходов к диагностике и мониторингу состояния дорожной инфраструктуры. Внедрение высокоточных методов оценки соответствия ТСОДД нормативным требованиям представляется перспективным направлением для снижения аварийности и повышения безопасности дорожного движения [3, 4].

2 Материалы и методы

В весенне-летний период 2025 года в ходе диагностики автомобильных дорог Северо-Западного федерального округа был проведен выборочный сбор данных для определения их соответствия нормативным требованиям (ГОСТ Р 52289-2019 «Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств» и ГОСТ 32945 «Дороги автомобильные общего пользования. Знаки дорожные. Технические требования»). В результате обследования зафиксированы характерные нарушения, системный анализ которых выявил следующие основные проблемы:

1. Отсутствие или недостаточная видимость горизонтальной разметки;
2. Отсутствие дорожных знаков в необходимых местах;
3. Некорректное применение и плохая различимость установленных знаков.

На рис. 1, а показан пешеходный переход, где отсутствует горизонтальная разметка 1.14.1, а знаки 5.19.1 и 5.19.2 имеют уменьшенный типоразмер, не оборудованы световозвращающими флуоресцентными щитами, причем знак справа 5.19.1 деформирован. Рис. 1, б демонстрирует участок дороги с кривой в плане радиусом менее 600 м, на котором отсутствует дорожный знак 1.34.3 «Направление поворота». На рис. 1, в зафиксировано противоречие между горизонтальной разметкой 1.1 (запрещающей обгон) и знаком 3.21 «Конец запрещения обгона» (разрешающим обгон с места установки).



a – отсутствие или недостаточная видимость горизонтальной разметки; б – отсутствие дорожных знаков в необходимых местах; в – некорректное применение и плохая различимость установленных знаков

Рисунок 1 – Несоответствия дорог нормативным требованиям

Статистические данные по выявленным несоответствиям (количество несоответствий по указанным видам на определенной дороге) систематизированы в табл. 1, где левый столбец содержит порядковые номера обследованных дорог, а правые столбцы отражают виды несоответствий: 1 – отсутствие, плохая различимость горизонтальной разметки; 2 – отсутствие дорожных знаков в необходимых местах; 3 – неправильное применение, плохая видимость дорожных знаков.

Для выявления взаимосвязи между несоответствиями дорог нормативным требованиям и показателями ДТП проведен корреляционный анализ с расчетом коэффициента корреляции Пирсона [5]. Исходные данные сформированы в виде сводной табл. 2, где X – количество выявленных несоответствий дорог нормативным требованиям; Y – данные количества ДТП. Данные по количеству ДТП взяты за первые 6 месяцев 2025 года. В первой строке $n = 1$ в столбце X указано количество выявленных несоответствий отсутствия, плохой различимости горизонтальной разметки, в столбце Y – количество ДТП, в местах совершения которых фиксировались отсутствие или плохая различимость горизонтальной разметки проезжей части. Во второй строке $n = 2$ указаны оба показателя, в которых фиксировалось отсутствие дорожных знаков в необходимых местах. В третьей строке $n = 3$ – неправильное применение, плохая видимость дорожных знаков. В четвертой строке $n = 4$ – указаны данные о ДТП из-за несоответствия скорости конкретным условиям. Учитывая, что лишь 30,9 % ДТП непосредственно связаны с нарушениями обязательных требований к эксплуатационному состоянию и обустройству автомобильных дорог общего пользования, значения Y для строк $n = 4-8$ скорректированы с применением коэффициента 0,309. В четвертой строке учтены виды несоответствий 2 и 3, так как данный вид нарушения ПДД мог быть вызван и отсутствием горизонтальной разметки, и отсутствием дорожных знаков. В пятой строке $n = 5$ указано количество ДТП с таким видом нарушения ПДД, как выезд на полосу встречного движения. В этой строке в столбце несоответствий дорог нормативным требованиям учитываются виды 1, 2 и 3. В шестой строке $n = 6$ приведено количество ДТП со съездом с дороги. Учтены виды несоответствий дороги нормативным требованиям 2 и 3. В седьмой строке $n = 7$ приведено количество ДТП, случившихся в темное время суток. Учтены виды несоответствий дороги нормативным требованиям 1, 2 и 3. В восьмой строке $n = 8$ приведено количество такого вида ДТП, как наезд на пешехода. Учтены виды несоответствий дороги нормативным требованиям 1, 2 и 3.

Таблица 1 – Статистические данные несоответствий дорог нормативным требованиям

п/н дороги	Виды несоответствий			п/н дороги	Виды несоответствий		
	1	2	3		1	2	3
1	1	3	2	18	1	-	1
2	-	-	1	19	-	-	1
3	1	2	-	20	1	-	-
4	1	-	1	21	1	-	-
5	1	1	1	22	2	-	-
6	-	-	2	23	-	2	-
7	-	-	2	24	-	2	-
8	1	-	1	25	-	1	1
9	2	-	-	26	1	2	-
10	-	-	3	27	-	1	-
11	1	1	1	28	1	-	-
12	-	-	12	29	3	-	-
13	2	2	13	30	4	-	-
14	1	2	14	31	-	-	2
15	1	1	15	32	-	-	1
16	-	-	16	Σ	26	21	24
17	-	1	17				

Таблица 2 – Сводные данные для корреляционного анализа

Виды несоответствий	Виды ДТП	n	X	Y
1	-	1	26	12167
2	-	2	21	2437
3	-	3	24	2057
2, 3	несоответствие скорости конкретным условиям	4	45	3228
1, 2, 3	выезд на полосу встречного движения	5	71	1310
2, 3	съезд с дороги	6	45	1834
1, 2, 3	в темное время суток	7	71	5028
1, 2, 3	наезд на пешехода	8	71	4297

Коэффициент корреляции Пирсона r является метрикой, количественно оценивающей степень линейной взаимосвязи между двумя переменными [6]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

где r – коэффициент корреляции Пирсона; n – объем выборки; X_i – i -ый элемент выборки X ; Y_i – i -ый элемент выборки Y ; \bar{X} – среднее значение выборки X ; \bar{Y} – среднее значение выборки Y .

Линейный характер зависимости проявляется в пропорциональном изменении одной переменной относительно другой. Диапазон значений данного коэффициента находится в интервале от -1 до 1, где:

– $r = 1$ отражает строгую прямую пропорциональность – рост одной переменной сопровождается систематическим увеличением другой;

– $r = -1$ указывает на идеальную отрицательную линейную зависимость – увеличение значений одной переменной происходит одновременно с уменьшением другой;

– $r = 0$ констатирует отсутствие линейной корреляции между анализируемыми параметрами.

Полученный коэффициент корреляции представляет собой выборочную оценку, которая может отличаться от генерального параметра. Для определения точности оценки строится доверительный интервал с использованием z -преобразования Фишера:

$$z = 0,5 \ln \left(\frac{1+r}{1-r} \right), \quad (2)$$

где r – коэффициент корреляции Пирсона.

Стандартная ошибка s_e вычисляется по формуле:

$$s_e = \frac{1}{\sqrt{n-3}}. \quad (3)$$

Границы доверительного интервала для z определяются через квантиль стандартного нормального распределения c для заданной доверительной вероятности $\gamma = 95\%$ [7]:

$$c = N^{-1} = \frac{1+\gamma}{2}, \quad (4)$$

где N^{-1} – функция обратного стандартного распределения; γ – доверительная вероятность.

Нижняя граница доверительного интервала z_L :

$$z_L = z - s_e \cdot c. \quad (5)$$

Верхняя граница доверительного интервала z_U :

$$z_U = z + s_e \cdot c. \quad (6)$$

Обратное преобразование Фишера позволяет получить итоговые границы для коэффициента корреляции.

Нижняя граница r_L :

$$r_L = \frac{e^{2z_L} - 1}{e^{2z_L} + 1}. \quad (7)$$

Верхняя граница r_U :

$$r_U = \frac{e^{2z_U} - 1}{e^{2z_U} + 1}. \quad (8)$$

3 Результаты исследований

Результаты расчета представлены в табл. 3. Полученное отрицательное значение коэффициента корреляции Пирсона указывает на обратную линейную зависимость между анализируемыми показателями. Следует отметить, что данная оценка обладает определенными ограничениями, обусловленными относительно небольшим объемом выборки (статистические данные за первые 6 месяцев 2025 года) и сезонным характером наблюдений.

Несмотря на выявленную отрицательную направленность связи принципиально важным результатом является статистически подтвержденное наличие линейной зависимости ($r \neq 0$) между уровнем несоответствия дорог нормативным требованиям и показателями ДТП. Это подтверждает теоретическую предпосылку о влиянии состояния дорожной инфраструктуры на безопасность движения.

Для получения более надежных выводов необходимы дальнейшие исследования с привлечением репрезентативных данных за многолетний период, что позволит нивелировать сезонные колебания и повысить достоверность результатов.

Таблица 3 – Результаты корреляционного анализа

Коэффициент корреляции Пирсона	-0,2088
n (объем выборки)	8
z	-0,21192
s_e	0,447214
$c_{95\%}$	-0,27932
нижняя 95 % граница z_L	-0,08701
верхняя 95 % граница z_U	-0,33684
нижняя 95 % граница r_L	-0,08679

Для повышения достоверности анализа влияния состояния дорожной инфраструктуры на аварийность необходимы точные методы диагностики. Особую актуальность приобретает использование современных мобильных комплексов, позволяющих получать объективные пространственные данные о параметрах дорожного обустройства.

Современные передвижные дорожно-транспортные лаборатории представляют собой мобильные измерительные комплексы на автомобильном шасси, оснащенные высокоточными системами для комплексной оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог [8].

Данные лаборатории фиксируют широкий спектр параметров: длину пройденного пути, географические координаты, геометрические параметры автомобильной дороги (продольный и поперечный уклоны, профили дороги), а также выполняют panoramicную видеосъемку, определяют микропрофиль, диагностируют дефекты покрытий, измеряют колейность, регистрируют интенсивность движения и оценивают коэффициент сцепления [9].

Перспективным направлением является оснащение таких лабораторий лазерными сканерами (лидарами), существенно повышающими точность мониторинга дорожной инфраструктуры [10]. Однако на качество измерений влияют внешние факторы: температурные изменения, вибрации и помехи. Ключевой проблемой остаются колебания кузова лаборатории при движении, минимизированные в представленной конструкции посредством двухосного гироскопического стабилизатора.

В исследовании использовалась лаборатория на базе Ford Transit с измерительным комплексом КП-514 RDT (рис. 2). На крыше автомобиля размещен лидар HESAI Pandar128 механического типа с круговым обзором, установленный через опорную стойку на гиростабилизаторе. Двухосная система с моментными двигателями компенсирует угловые отклонения от неровностей дорожного полотна, обеспечивая стабильность сканирования.

Лидар генерирует до 2 млн точек в секунду, формируя детализированное облако точек с привязкой к координатам через интегрированную навигационную систему передвижной дорожно-транспортной лаборатории. Совмещение лидарных данных с фото- и видеоматериалами в программной среде VisionLidar 365 позволяет точно идентифицировать объекты дорожной инфраструктуры и анализировать их пространственное взаиморасположение [11, 12].

Внедрение данной лаборатории позволит существенно повысить точность и детализацию диагностических данных за счет применения стабилизированного сканирующего устрой-

ства. Комплексный подход к сбору параметров дорожной инфраструктуры обеспечит интегральную оценку транспортно-эксплуатационных качеств. Цифровизация процессов мониторинга исключит субъективный фактор и создаст основу для перехода к предиктивной системе содержания дорог на основе прогнозных моделей [13].



1 – базовая лаборатория с измерительным комплексом КП-514 РДТ; 2 – двухосный гироскопический стабилизатор; 3 – лидар

Рисунок 2 – Передвижная дорожно-транспортная лаборатория с 3D-сканирующим устройством

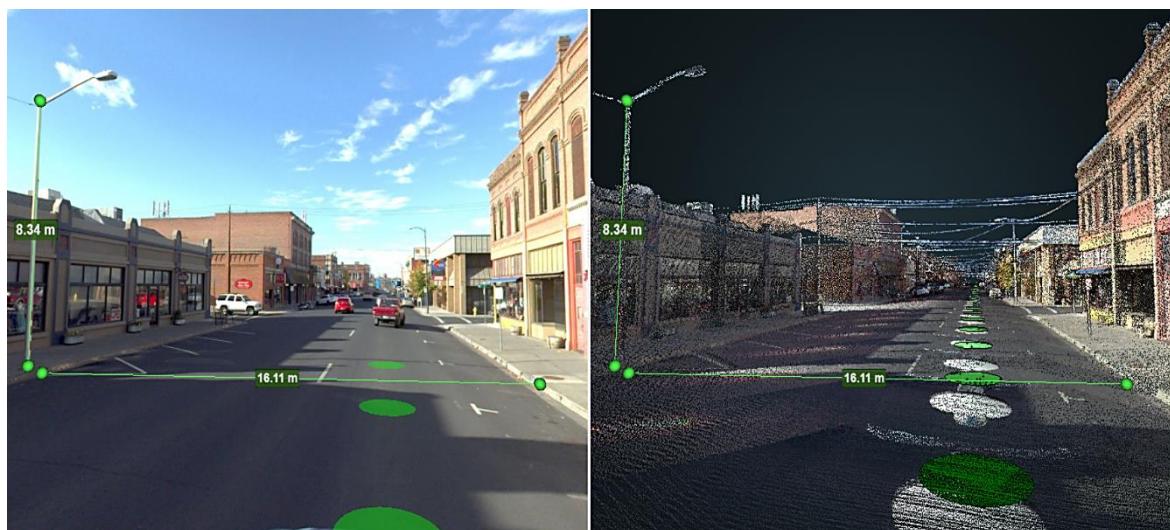


Рисунок 3 – Синхронизация облака точек и видеоматериала

4 Обсуждение и заключение

В рамках исследования предложена усовершенствованная схема системы управления состоянием автомобильных дорог, включающая восемь последовательных этапов (рис. 4).

На этапе оценки состояния дороги и дорожной инфраструктуры особую важность приобретает идентификация аварийно-опасных участков дороги в соответствии с установленным законодательством критериями. Использование предложенной диагностической методики позволит своевременно выявлять участки повышенной опасности, места концентрации ДТП.

Проведенное исследование подтвердило наличие статистически значимой связи между состоянием дорожной инфраструктуры и показателями ДТП. Установлено, что системные нарушения в обустройстве автомобильных дорог, включая отсутствие или недостаточную видимость горизонтальной разметки, отсутствие дорожных знаков в необходимых местах, а также их некорректное применение, являются существенными факторами риска возникновения ДТП.

Предложенный способ диагностики с применением передвижной дорожно-транспортной лаборатории, оснащенной лидаром на гирокомпьютерном стабилизаторе, позволяет получать объективные пространственные данные о параметрах дорожной инфраструктуры. Использование стабилизированного сканирующего устройства обеспечивает повышение точности измерений по сравнению с традиционными методами диагностики. Это особенно важно для выявления аварийно-опасных участков дороги.



Рисунок 4 – Этапы системы управления состоянием автомобильных дорог

Список литературы

- 1 Показатели состояния безопасности дорожного движения. [Электронный ресурс]. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 10.10.2025).
- 2 Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 6 месяцев 2025 года : Информационно-аналитический обзор / К. С. Баканов, П. В. Ляхов, А. С. Айсанов [и др.]. – Москва: ФКУ "НЦ БДД МВД России", 2025. – 37 с. – EDN OSCTIS.
- 3 Басков, В. Н. Влияние параметров УДС на формирование мест концентрации ДТП / В. Н. Басков, Е. И. Исаева // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 3-5(82). – С. 49-57. – DOI 10.33979/2073-7432-2023-3-5(82)-49-57. – EDN NRENIS.
- 4 Мониторинг, диагностика и оценка состояния автомобильных дорог / С. В. Ефименко, В. Н. Ефименко, В. С. Чурилин, М. В. Бадина. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – 128 с. – ISBN 978-5-605-02455-2. – EDN BUTGAY.
- 5 Печатнова, Е. В. Определение значимости влияния дорожных условий на аварийность в автомобильных дорогах федерального значения / Е. В. Печатнова, К. Э. Сафонов // Техника и технология транспорта. – 2020. – № 4(19). – С. 6-10. – EDN PZFVMH.
- 6 Саадалов, Т. Методика расчета коэффициента корреляции Фехнера и Пирсона, и их области применения / Т. Саадалов, Р. Мырзаибраимов, Ж. Д. Абдуллаева // Бюллетень науки и практики. – 2021. – Т. 7, № 10. – С. 270-276. – DOI 10.33619/2414-2948/71/31. – EDN GNMYZT.
- 7 Объем выборки для корреляционного анализа / А. М. Гржибовский, М. А. Горбатова, А. Н. Наркевич, К. А. Виноградов // Морская медицина. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 101-106. – DOI 10.22328/2413-5747-2020-6-1-101-106. – EDN BIRLOQ.
- 8 Какая нужна дорожная лаборатория? // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2023. – № 4(279). – С. 47-49. – EDN HZQKUP.
- 9 Васильев, В. П. Юрий Васильев: «В МАДИ разработана линейка передвижных дорожных лабораторий» / В. П. Васильев // Автомобильные дороги. – 2024. – № 4(1109). – С. 114-116. – EDN UKUMQG.
- 10 Славуцкий, М. А. Некоторые методики оценки объективности результатов работы дорожных лабораторий / М. А. Славуцкий // Автомобильные дороги. – 2025. – № 3(1120). – С. 114-117. – EDN KODBOI.
- 11 Жидяев, С. С. Комплексное исследование точности и надежности различных методов наземного лазерного сканирования и обработки полученных данных / С. С. Жидяев, П. В. Молоков // Вестник МИИГАиК : Сборник научных статей 79-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках Международной Студенческой Недели Науки СНН-2024, Москва, 08–12 апреля 2024 года. – Москва: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2024. – С. 115-127. – EDN UMDWUW.
- 12 Горобцов, С. Р. Анализ отечественного программного обеспечения для обработки данных лазерного сканирования / С. Р. Горобцов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 1, №1. – С. 65-72. – DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-65-72. – EDN OZHSUG.
- 13 Rashidi, Maria & Mohammadi, Masoud & Sadeghlou Kivi, Saba & Abdolvand, Mohammad Mehdī & Truong-Hong, Linh & Samali, Bijan. (2020). A Decade of Modern Bridge Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning: Review and Future Directions. Remote Sensing. 12.3796. DOI 10.3390/rs12223796.

References

- 1 Road Safety Indicators. [Electronic resource]. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (date accessed: 10.10.2025).
- 2 Road traffic accidents in the Russian Federation for 6 months of 2025: Information and analytical review / K. S. Bakanov, P. V. Lyakhov, A. S. Aisanov [et al.]. - Moscow: Federal State Institution "National Center for Road Safety of the Ministry of Internal Affairs of Russia", 2025. - 37 p. - EDN OSCTIS.
- 3 Baskov, V. N. Influence of road network parameters on the formation of accident concentration areas / V. N. Baskov, E. I. Isaeva // World of Transport and Technological Machines. - 2023. - No. 3-5 (82). - P. 49-57. – DOI 10.33979/2073-7432-2023-3-5(82)-49-57. – EDN NRENIS.
- 4 Monitoring, diagnostics and assessment of the condition of roads / S. V. Efimenko, V. N. Efimenko, V. S. Churilin, M. V. Badina. – Tomsk: Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2023. – 128 p. – ISBN 978-5-605-02455-2. – EDN BUTGAY.
- 5 Pechatnova, E. V. Determining the significance of the influence of road conditions on accidents on federal highways / E. V. Pechatnova, K. E. Safronov // Transport Engineering and Technology. – 2020. – No. 4(19). – P. 6-10. – EDN PZFVMH.

6 Saadalov, T. Methodology for calculating the Fechner and Pearson correlation coefficient, and their areas of application / T. Saadalov, R. Myrzaibraimov, Zh. D. Abdullaeva // Bulletin of Science and Practice. – 2021. – Vol. 7, No. 10. – Pp. 270-276. – DOI 10.33619/2414-2948/71/31. – EDN GNMYZT.

7 Sample size for correlation analysis / A. M. Grzhibovsky, M. A. Gorbatova, A. N. Narkevich, K. A. Vinogradov // Marine Medicine. – 2020. – Vol. 6, No. 1. – Pp. 101-106. – DOI 10.22328/2413-5747-2020-6-1-101-106. – EDN BIRLOQ.

8 What Kind of Road Laboratory Do We Need? // Construction Materials, Equipment, and Technologies of the 21st Century. – 2023. – No. 4(279). – Pp. 47-49. – EDN HZQKUP.

9 Vasiliev, V. P. Yuri Vasiliev: "MADI Has Developed a Line of Mobile Road Laboratories" / V. P. Vasiliev // Highways. – 2024. – No. 4(1109). – Pp. 114-116. – EDN UKUMQG.

10 Slavutsky, M. A. Some Methods for Assessing the Objectivity of Road Laboratory Results / M. A. Slavutsky // Highways. – 2025. – No. 3(1120). – P. 114-117. – EDN KODBOI.

11 Zhidyaev, S. S. Comprehensive study of the accuracy and reliability of various methods of terrestrial laser scanning and processing of the obtained data / S. S. Zhidyaev, P. V. Molokov // Bulletin of MII-GAiK: Collection of scientific articles of the 79th scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists within the framework of the International Student Science Week SNN-2024, Moscow, April 8–12, 2024. – Moscow: Moscow State University of Geodesy and Cartography, 2024. – P. 115-127. – EDN UMDWUW.

12 Gorobtsov, S. R. Analysis of domestic software for processing laser scanning data / S. R. Gorobtsov // Inter Expo Geo-Siberia. - 2023. - Vol. 1, No. 1. - Pp. 65-72. - DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-65-72. - EDN OZHSUG.

13 Rashidi, Maria & Mohammadi, Masoud & Sadeghlu Kivi, Saba & Abdolvand, Mohammad Mehdi & Truong-Hong, Linh & Samali, Bijan. (2020). A Decade of Modern Bridge Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning: Review and Future Directions. *Remote Sensing*. 12.3796. DOI 10.3390/rs12223796.

© Ануфриев К. А., Евтюков С. А., Ануфриев Е. А., 2025



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

РАЗРАБОТКА МАРШРУТНОГО ИНДЕКСА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ ОЦЕНКИ

✉¹ Котов Роман Алексеевич,
аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, e-mail: romankotov-5@yandex.ru

Дорохин Сергей Владимирович,
д.т.н., декан автомобильного факультета, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, e-mail: dsvvrn@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрена проблема оценки эффективности отдельных маршрутов городского общественного транспорта (ГОТ) в условиях роста автомобилизации и ограниченных муниципальных ресурсов. На основе анализа существующих подходов выявлен методологический пробел: отсутствие маршрутно-ориентированной, пространственно-дифференцированной и конкурентночувствительной методики, адаптированной к условиям городов-миллионников. Предложена новая методика – Маршрутный индекс эффективности (МИЭ), интегрирующая три измерения: транспортно-операционное, социально-территориальное и конкурентное. С использованием данных АСУ «ГЛОНАСС», ГИС-анализа и тарифной политики выполнен расчёт МИЭ для трёх маршрутов Центрального района Воронежа. Результаты подтвердили применимость методики для ранжирования маршрутов и обоснования целевых управлений решений.

DEVELOPMENT OF A ROUTE-BASED EFFICIENCY INDEX FOR URBAN PUBLIC TRANSPORT BASED ON A THREE-DIMENSIONAL ASSESSMENT

✉¹ Roman Alekseevich Kotov,
graduate student, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: romankotov-5@yandex.ru

Dorokhin Sergey Vladimirovich,
doctor of technical sciences, dean of the automobile faculty, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: dsvvrn@yandex.ru

Annotation. The article addresses the challenge of evaluating the efficiency of individual urban public transport (UPT) routes under conditions of rising car ownership and limited municipal resources. A methodological gap has been identified through the analysis of existing approaches: the lack of a route-oriented, spatially differentiated, and competition-sensitive methodology adapted to million-plus cities. A new method – Route Efficiency Index (REI) – is proposed, integrating three dimensions: transport-operational, socio-spatial, and competitive. Using data from the GLONASS automated control system, GIS analysis, and fare policies, the REI was calculated for three routes in the Central District of Voronezh. The results confirmed the applicability of the methodology for route ranking and evidence-based management decisions.

Ключевые слова: ГОРОДСКОЙ ОБЩЕСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТ, МАРШРУТНЫЙ ИНДЕКС ЭФФЕКТИВНОСТИ, ТРАНСПОРТНО-ОПЕРАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ, СОЦИАЛЬНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ДОСТУПНОСТЬ, КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ С ЛИЧНЫМ АВТОТРАНСПОРТОМ.

Keywords: URBAN PUBLIC TRANSPORT, ROUTE EFFICIENCY INDEX, TRANSPORT-OPERATIONAL PARAMETERS, SOCIO-SPATIAL ACCESSIBILITY, COMPETITIVENESS WITH PRIVATE VEHICLES.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Современная транспортная политика Российской Федерации направлена на формирование устойчивой, социально ориентированной и конкурентоспособной системы городского общественного транспорта (ГОТ). Согласно Транспортной стратегии РФ до 2030 года с прогнозом до 2035 года [1], в городах прогнозируется рост пассажирооборота на 11 % по сравнению с 2019 годом, что обуславливает необходимость повышения эффективности работы ГОТ при одновременном обеспечении его доступности и надёжности. Однако реализация этих целей осложняется устойчивым ростом автомобилизации: по данным Росстата, в ряде регионов доля личного автотранспорта превышает 420 единиц на 1000 жителей [2], что создаёт жёсткую конкуренцию для ГОТ и приводит к снижению его привлекательности.

Традиционные подходы к оценке эффективности ГОТ – экономико-финансовый (себестоимость пассажиро-километра, выполнение муниципального задания) и агрегированный транспортно-операционный (общий пассажиропоток, средняя загрузка парка) – не позволяют выявить слабые места на уровне отдельного маршрута, где формируется реальный пользовательский опыт и принимаются решения о выборе способа передвижения [3, 4]. Между тем, как показывает международная практика, эффективность транспортной системы в целом зависит от качества функционирования её базовых элементов – маршрутов [5, 6]. В условиях ограниченных бюджетных ресурсов особенно важно уметь точно выявлять неэффективные маршруты и обоснованно распределять инвестиции – в обновление подвижного состава, приоритизации, модернизацию остановок.

В российской научной среде всё чаще подчёркивается необходимость перехода к чело-векоцентрированным моделям оценки, учитывающим не только технические параметры, но и потребности пассажиров, пространственную доступность и конкурентную среду [7, 8]. В частности, в работах Каплунова И. В. и Панина А. В. отмечается, что транспортная доступность и универсальная проектировка инфраструктуры становятся ключевыми критериями эффективности, особенно для социально уязвимых групп населения [9, 10]. В то же время практически отсутствуют методики, которые одновременно:

- оценивали бы конкретный маршрут, а не систему в целом;
- учитывали бы конкуренцию с личным автотранспортом;
- опирались бы на данные, доступные на муниципальном уровне (без big data).

В этой связи особую значимость приобретают исследования, направленные на разработку практико-ориентированных инструментов маршрутной оценки. Такой подход особенно актуален для городов-миллионников, где сосредоточена значительная часть пассажиропотока, а транспортная система испытывает максимальную нагрузку. Одним из таких городов является Воронеж, где по состоянию на 2025 год насчитывается 98 маршрутов ГОТ, а доля перевозок общественным транспортом составляет около 35–40 % от общего объёма внутригородских поездок [2]. При этом сегодня в городе Воронеж реализуется «Концепция развития пассажирского транспорта на 2025–2027 годы», предусматривающая создание инфраструктуры «метробуса» и усиление приоритизации ГОТ [11].

Наиболее репрезентативной зоной для апробации новых подходов выступает Центральный район Воронежа, через который проходит около 65% всех маршрутов города и пе-

рессекаются ключевые транспортные коридоры. Именно здесь в максимальной степени проявляются системные вызовы: конкуренция с личным транспортом, пробки в часы пик, недостаточная доступность для маломобильных групп населения.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена отсутствием в отечественной практике маршрутно-ориентированной, пространственно-дифференцированной и конкурентно-чувствительной методики оценки эффективности ГОТ, адаптированной к условиям российских городов. Разработка такого инструмента позволит перейти от формального учёта объёмов перевозок к целевому управлению на основе данных, что соответствует как федеральным стратегическим установкам, так и практике передовых муниципалитетов.

2 Материалы и методы

Для комплексной оценки эффективности отдельного маршрута городского общественного транспорта (ГОТ) была разработана оригинальная методика, реализуемая через маршрутный индекс эффективности (МИЭ). Подход основан на трёх фундаментальных измерениях: транспортно-операционном, социально-территориальном и конкурентном, которые отвечают на ключевые вопросы: «Как работает маршрут?», «Кому и где он нужен?», «Почему пассажир выбирает именно этот маршрут, а не личный транспорт?».

В качестве объекта исследования выбран Центральный район г. Воронежа – ядро транспортной системы города, через которое проходит 64 автобусных и 2 троллейбусных маршрута (около 65 % от общего числа). Район характеризуется высокой плотностью населения (154 тыс. чел.), концентрацией административных, образовательных и деловых центров, а также максимальной интенсивностью транспортных потоков в часы пик.

В основу методики положены 14 параметров, сгруппированных по измерениям (табл. 1). Все данные получены из доступных муниципальных источников: АСУ «ГЛОНАСС», ГИС-платформ (OpenStreetMap, Яндекс.Карты), сведений об улично-дорожной сети и тарифной политике.

Таблица 1 – Параметры оценки эффективности маршрута ГОТ

Измерение	Параметр	Единица измерения / тип	Источник данных
Транспортно-операционное	Средняя эксплуатационная скорость	км/ч	АСУ «ГЛОНАСС»
	Интервал движения в часы пик	мин	Расписание, АСУ
	Регулярность движения	%	АСУ «ГЛОНАСС»
	Коэффициент заполнения в пик	безразм.	Учёт пассажиропотока
	Наличие инфраструктурных мер приоритизации	бинарный (0/1)	Концепция «метробуса»
Социально-территориальное	Доля населения в зоне 5-мин пешей доступности	%	ГИС-анализ, перепись
	Количество ключевых точек притяжения	шт.	Кадастр объектов соц. инфраструктуры
	Наличие низкопольного подвижного состава	бинарный (0/1)	Реестр подвижного состава
	Уровень доступности для маломобильных групп населения (МГН)	ранг (0–2)	Инспекция остановок
Конкурентное	Время в пути ОТ «от двери до двери»	мин	ГИС-моделирование
	Время в пути личного автотранспорта по тому же коридору	мин	Яндекс. Навигатор (пиковые часы)
	Соотношение времени ОТ и автомобиля	безразм.	Расчёт
	Стоимость поездки ОТ	руб.	Тарифы Дептранса
	Стоимость поездки на личном автотранспорте	руб.	Норматив 8 руб./км [12]

Порядок расчёта МИЭ включает следующие этапы:

1. Нормализация каждого параметра по шкале [0; 1], где 1 соответствует максимальной эффективности. Для показателей, где *меньше – лучше*, используется формула:

$$x_{norm} = \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} . \quad (1)$$

Для показателей, где *больше – лучше*:

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} . \quad (2)$$

Качественные параметры (например, наличие низкопольного транспорта) приводятся к шкале [0; 1] по ранговой шкале.

2. Агрегация нормализованных значений в три частных индекса – по измерениям:

$$I_{\text{опер}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 x_{i,norm}; I_{\text{соц}} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 x_{j,norm}; I_{\text{конк}} = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 x_{k,norm} .$$

3. Взвешивание частных индексов согласно «Концепции развития пассажирского транспорта на 2025–2027 годы» [11], где в качестве приоритетов обозначены:

- повышение регулярности и скорости движения за счёт приоритизации ГОТ (транспортно-операционное измерение);
- обеспечение транспортной доступности для всех категорий населения, включая маломобильные группы (социально-территориальное измерение);
- повышение конкурентоспособности ОТ в условиях автомобилизации при доле личного автотранспорта более 420 авто/1000 жителей (конкурентное измерение).

С учётом равной стратегической значимости первых двух задач и несколько меньшего акцента на рыночной конкуренции (ввиду социальной ориентации муниципального транспорта в РФ), были приняты следующие веса:

- транспортно-операционное измерение – 0,35;
- социально-территориальное измерение – 0,35;
- конкурентное измерение – 0,30.

Общий индекс рассчитывается по формуле:

$$\text{МИЭ} = 0,35 \cdot I_{\text{опер}} + 0,35 \cdot I_{\text{соц}} + 0,30 \cdot I_{\text{конк}} . \quad (3)$$

Интерпретация результата:

- МИЭ $\geq 0,8$ – высокая эффективность;
- $0,6 \leq \text{МИЭ} < 0,8$ – удовлетворительная эффективность;
- $\text{МИЭ} < 0,6$ – низкая эффективность, требует управленческого вмешательства.

Предложенная методика не требует «big data» и может быть воспроизведена в любом городе-миллионнике при наличии стандартных муниципальных данных.

3 Результаты исследований

В рамках апробации разработанной методики выполнен расчёт Маршрутного индекса эффективности (МИЭ) для трёх характерных маршрутов Центрального района г. Воронежа: автобусных №6 и №59, а также троллейбусного №99. Выбор маршрутов обусловлен их репрезентативностью по функциональной типологии (социально значимый, высоконагруженный радиальный, поперечный троллейбусный) и охватом ключевых вызовов транспортной системы: конкуренция с личным автотранспортом, отсутствие приоритизации, ограниченная доступность для маломобильных групп населения (МГН).

Характеристика исследуемых маршрутов приведена в табл. 2.

На основе собранных данных выполнена нормализация 14 параметров и расчёт частных индексов по трём измерениям. Результаты расчётов представлены в таблице 3.

Интерпретация результатов:

1. Маршрут №6 (МИЭ = 0,58) демонстрирует низкую эффективность. Несмотря на связь жилого массива «Озерки» с Областным тубдиспансером, он не обеспечивает доступность для МГН и проигрывает личному автомобилю по времени на 41%.

2. Маршрут №59 (МИЭ = 0,69) имеет удовлетворительную эффективность, обусловленную охватом 8 ключевых точек притяжения и частичным использованием низкопольных автобусов, однако требует мер по приоритизации из-за высокой перегрузки.

3. Маршрут №99 (МИЭ = 0,53) – наименее эффективный. Устаревший троллейбусный парк (средний возраст 13,8 лет), отсутствие низкопольного транспорта и низкая эксплуатационная скорость (14,1 км/ч) делают маршрут непривлекательным даже при фиксированной стоимости.

Таблица 2 – Характеристика исследуемых маршрутов ГОТ*

Показатель	№6	№59	№99
Тип маршрута	Автобусный, социально значимый	Автобусный, высоконагруженный радиальный	Троллейбусный, поперечный
Протяжённость, км	12,4	9,1	8,6
Средняя эксплуатационная скорость, км/ч	15,2	17,8	14,1
Наличие низкопольного подвижного состава	Нет	Частично	Нет
Наличие инфраструктурной приоритезации	Нет	Нет	Нет
Количество ключевых точек притяжения	6	8	5
Пассажиропоток в пик, тыс. чел./сут	12,3	28,1	9,7
Соотношение времени ГОТ/авто	1,41	1,35	1,45

*Источники данных: Дептранс Воронежа, АСУ «ГЛОНАСС», ГИС-анализ (OpenStreetMap, Яндекс.Карты), апрель-май 2025 г.

Таким образом, расчёт МИЭ позволил объективно ранжировать маршруты по комплексной эффективности и выявить дисбалансы, не отражаемые традиционными показателями (например, пассажиропотоком). Предложенная методика подтверждает свою пригодность для целевого управления маршрутной сетью на муниципальном уровне.

Таблица 3 – Значения параметров и индексов эффективности маршрутов

Параметр / Измерение	№6	№59	№99
Транспортно-операционное			
Средняя эксплуатационная скорость, км/ч	15,2	17,8	14,1
Интервал движения в пик, мин	8	6	12
Регулярность, %	92	95	89
Коэффициент заполнения в пик	0,92	1,05	0,68
Наличие приоритизации (0/1)	0	0	0
<i>Частный индекс $I_{\text{опер}}$</i>	0,61	0,68	0,54
Социально-территориальное			
Доля населения в зоне 5-мин пешей доступности, %	72	78	65
Количество точек притяжения	6	8	5
Наличие низкопольного транспорта (0/1)	0	1	0
Уровень доступности для МГН (0-2)	0	1	0
<i>Частный индекс $I_{\text{соц}}$</i>	0,56	0,76	0,48
Конкурентное			
Время в пути ОТ «от двери до двери», мин	38	35	42
Время в пути личного автотранспорта, мин	27	26	29
Соотношение времени ОТ/авто	1,41	1,35	1,45
Стоимость поездки ОТ, руб.	30	30	30
Стоимость поездки на личном автотранспорте, руб.	72	72	64
<i>Частный индекс $I_{\text{конк}}$</i>	0,58	0,61	0,55
<i>Общий МИЭ</i>	0,58	0,69	0,53

4 Обсуждение и заключение

Проведённое исследование подтвердило гипотезу о необходимости разработки маршрутно-ориентированного подхода к оценке эффективности городского общественного транспорта. Предложенный Маршрутный индекс эффективности (МИЭ), основанный на трёх измерениях – транспортно-операционном, социально-территориальном и конкурентном, позволил выявить системные дисбалансы, не отражаемые традиционными показателями, такими как пассажиропоток или выполнение муниципального задания.

Анализ трёх маршрутов Центрального района Воронежа показал, что высокая загрузка не гарантирует эффективность (маршрут №59), а социальная значимость не компенсирует недоступность и медленность (маршрут №6). Наиболее слабым оказался троллейбусный маршрут №99, где устаревший парк (средний возраст – 13,8 лет), отсутствие низкопольных транспортных средств и низкая эксплуатационная скорость (14,1 км/ч) привели к МИЭ = 0,53, что указывает на необходимость радикальной модернизации или перевода на автобусную технологию.

Важно отметить, что ключевым ограничением всех трёх маршрутов является конкуренция с личным автотранспортом: соотношение времени ОТ/авто превышает 1,35, что, по международным оценкам, делает маршрут непривлекательным для среднего пассажира.

Предложенная методика имеет высокую практическую ценность для муниципальных властей, она позволяет ранжировать маршруты по комплексной эффективности и выделять приоритетные направления для инвестиций.

Методика разработана с учётом реалий городов-миллионников: она опирается на данные, доступные на муниципальном уровне (АСУ «ГЛОНАСС», открытые ГИС-платформы, данные УДС), и не требует big data или сложных ИТ-систем. Это делает её масштабируемой для других регионов Центральной России, реализующих проекты типа «метробус».

Таким образом, научная новизна работы заключается в разработке практико-ориентированного инструмента, обеспечивающего переход от формального учёта перевозок к человекоцентрированному управлению транспортной системой.

Список литературы

- 1 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года / утв. распоряжением Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р.
- 2 Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Воронежской области [Электронный ресурс]. – URL: <https://36.rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 15.10.2025).
- 3 Котов, Р. А. Разработка двухфакторной математической модели оценки количества дорожно-транспортных происшествий с участием пассажирского транспорта / Р. А. Котов, С. В. Дорохин // Воронежский научно-технический Вестник. – 2024. – Т. 3, № 3(49). – С. 126-132. – DOI 10.34220/2311-8873-2024-126-132.
- 4 Гудков В. А. Организация и управление пассажирскими перевозками на городском транспорте / В. А. Гудков, Л. Б. Миротин, А. В. Суворов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2019. – 416 с.
- 5 European Commission. SUMP Guidelines – Sustainable Urban Mobility Plans. – 2nd ed. – Brussels, 2019.
- 6 Wright L., Hook W. Bus Rapid Transit Planning Guide. – New York: ITDP, 2007.
- 7 Анализ влияния внешнеэкономических факторов на развитие транзитных перевозок на территории ЕАЭС / С. В. Дорохин, В. А. Зеликов, А. Ш. Субхонбердиев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – Т. 82, № 1(83). – С. 419-425. – DOI 10.20914/2310-1202-2020-1-419-425.
- 8 Новиков А. Н. Безопасное и эффективное управление транспортными потоками в городской транспортной системе / А. Н. Новиков, А. Г. Шевцова. – М.: Академия, 2022. – 205 с.
- 9 Каплунов И. В. Показатели качества и эффективности городского пассажирского транспорта // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – № 2. – С. 42–48.
- 10 Панин А. В. Транспортная доступность как критерий эффективности городской транспортной системы // Урбанистика и регионалогия. – 2019. – № 1(15). – С. 34–45.
- 11 Концепция развития пассажирского транспорта на 2025–2027 годы / утверждена постановлением администрации городского округа город Воронеж от 20.06.2025 № 964. – Воронеж, 2025.
- 12 Litman T. Evaluating Public Transit Benefits and Costs. – Victoria Transport Policy Institute, 2023. – URL: <https://www.vtpi.org/tranben.pdf> (дата обращения: 20.10.2025).

References

- 1 Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a Forecast for the Period until 2035 / approved by Order of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r.
- 2 Territorial Body of the Federal State Statistics Service for Voronezh Oblast [Electronic resource]. – URL: <https://36.rosstat.gov.ru/> (date of access: October 15, 2025).
- 3 Kotov, R. A. Development of a two-factor mathematical model for estimating the number of road accidents involving passenger transport / R. A. Kotov, S. V. Dorokhin // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2024. – Vol. 3, No. 3 (49). – P. 126-132. – DOI 10.34220/2311-8873-2024-126-132.
- 4 Gudkov V. A. Organization and management of passenger transportation in urban transport / V. A. Gudkov, L. B. Mirotin, A. V. Suvorov. – Moscow: Goryachaya Liniya-Telecom, 2019. – 416 p.
- 5 European Commission. SUMP Guidelines – Sustainable Urban Mobility Plans. – 2nd ed. – Brussels, 2019.
- 6 Wright L., Hook W. Bus Rapid Transit Planning Guide. – New York: ITDP, 2007.
- 7 Analysis of the influence of external economic factors on the development of transit transportation in the territory of the EAEU / S. V. Dorokhin, V. A. Zelikov, A. Sh. Subkhonberdiev [et al.] // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2020. – Vol. 82, No. 1(83). – Pp. 419-425. – DOI 10.20914/2310-1202-2020-1-419-425.
- 8 Novikov A. N. Safe and efficient management of traffic flows in the urban transport system / A. N. Novikov, A. G. Shevtsova. – Moscow: Academy, 2022. – 205 p.
- 9 Kaplunov I. V. Indicators of Quality and Efficiency of Urban Passenger Transport // Transport of the Russian Federation. - 2021. - No. 2. - Pp. 42-48.
- 10 Panin A. V. Transport Accessibility as a Criterion of the Efficiency of the Urban Transport System // Urban Studies and Regional Studies. - 2019. - No. 1 (15). - Pp. 34-45.
- 11 Concept of Passenger Transport Development for 2025-2027 / approved by the Resolution of the Administration of the Urban District of the City of Voronezh dated 20.06.2025 No. 964. - Voronezh, 2025.
- 12 Litman T. Evaluating Public Transit Benefits and Costs. – Victoria Transport Policy Institute, 2023. – URL: <https://www.vtpi.org/tranben.pdf> (accessed: 20.10.2025).



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПАРКИРОВАНИЯ АВТОТРАНСПОРТА В КРУПНЫХ ГОРОДАХ

Белокуров Сергей Владимирович,
д.т.н., профессор кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Кононов Михаил Сергеевич,
студент Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва.

Белокуров Владимир Петрович,
д.т.н., профессор кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Кораблев Руслан Александрович,
к.с.-х.н., доцент кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: korablevra@vglta.vrn.ru

Голев Александр Дмитриевич,
к.т.н., доцент кафедры «Производство, ремонт и эксплуатация машин», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Сподарев Руслан Александрович,
старший преподаватель кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

SIMULATION OF QUEUING PROCESSES IN PARKING CONDITIONS FOR MOTOR VEHICLES IN LARGE CITIES

Belokurov Sergey Vladimirovich,
doctor of technical sciences, professor of the department of applied mathematics and mechanics, Voronezh state technical university, Voronezh.

Kononov Mikhail Sergeevich,
student, Russian Presidential academy of national economy and public administration, Moscow.

Belokurov Vladimir Petrovich,
doctor of technical sciences, professor department of transport organization and traffic safety, Professor, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Korablev Ruslan Aleksandrovich,
candidate of agricultural sciences, associate professor department of transport organization and traffic safety, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: korablevra@vglta.vrn.ru

Golev Aleksandr Dmitrievich,
candidate of technical sciences, associate professor department of machine production, repair, and operation, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Spodarev Ruslan Aleksandrovich,
senior lecturer department of transport organization and traffic safety, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. Рассматривается использование математического моделирования процессов массового обслуживания с ожиданием в условиях паркования автотранспорта в городах. Процессы паркования автотранспорта рассмотрены на основании систем массового обслуживания теории вероятности.

Ключевые слова: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПАРКИРОВАНИЕ, СТОЯНКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ.

¹ Автор для ведения переписки

Annotation. The use of mathematical modeling of queuing systems with waiting is considered for the conditions of motor vehicle parking in cities. Vehicle parking processes are analyzed based on queuing theory from probability theory.

Keywords: MODELLING, PARKING, VEHICLE PARKING FACILITIES, QUEUING SYSTEMS.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Интенсивный рост уровня автомобилизации в крупных городских агломерациях приводит к обострению целого ряда транспортных проблем. Одной из наиболее значимых является дефицит мест для паркования автотранспорта. Нехватка организованных парковочных пространств, их нерациональное распределение и неэффективное управление ими порождают хаотичную парковку, что, в свою очередь, усугубляет заторы, повышает аварийность, ухудшает экологическую обстановку и снижает общее качество городской среды. Традиционные градостроительные и организационные подходы к решению данной проблемы зачастую оказываются недостаточно эффективными, ресурсоемкими и не позволяют прогнозировать последствия принимаемых решений. В этой связи разработка и применение адекватных математических инструментов для анализа и оптимизации парковочных систем представляется чрезвычайно актуальной задачей.

Для ее решения предлагается новая разработанная комплексная имитационная модель процессов паркования автотранспорта, основанная на аппарате теории массового обслуживания (ТМО) с учетом специфики функционирования парковочного пространства крупного города. В отличие от существующих подходов, предлагаемая модель:

- 1) Рассматривает улично-дорожную сеть и парковочные зоны как единую стохастическую сеть массового обслуживания с отказами и ожиданием.
- 2) Учитывает нестационарный (зависящий от времени суток) характер входящего потока заявок (автомобилей, ищущих место для парковки).
- 3) Включает в себя параметры, описывающие поведенческие аспекты водителей (например, готовность к отказу от парковки или выбору альтернативного места в зависимости от времени поиска).
- 4) Позволяет оценивать ключевые показатели эффективности работы парковочной системы, такие как среднее время поиска парковочного места, вероятность отказа, коэффициент загрузки парковочных зон и уровень индуцированного трафика, порожденного автомобилями, находящимися в поиске.

Целью работы является повышение эффективности управления парковочным пространством крупного города за счет внедрения инструмента математического моделирования, позволяющего проводить оценку и прогнозирование последствий реализации различных организационных и инвестиционных решений.

В настоящее время центры крупных городов России и их отдельные районы имеют возросшие значения мест притяжения (торгово-развлекательных, культурно-бытовых и др.) наряду с существенно выросшим количеством легкового автотранспорта. Уровень автомобилизации в России за последние 30-40 лет увеличился в 4-5 раз. И хотя его значения пока в 2-

2,5 раза ниже показателей Европы и США, в центрах крупных городов России возникают остройшие дефициты мест паркования автотранспорта.

В тоже время большинство российских городов имеют плотную исторически сложившуюся застройку и сеть узких улиц. Отсутствие развития этого фактора на фоне растущей автомобилизации весьма ограничивает возможности для паркования автомобилей.

2 Материалы и методы

Методологической основой данного исследования выступил аппарат теории массового обслуживания (ТМО). В рамках работы система паркования автотранспорта в крупном городе была formalизована в виде многоканальной системы массового обслуживания (СМО) с ожиданием.

Для анализа основных характеристик процесса обеспечения паркования на стоянках были использованы элементы теории вероятностей. Это позволило описать ключевые параметры системы стохастическими методами и оценить ее показатели эффективности:

- 1) средняя длина очереди автомобилей, ожидающих свободного места на стоянке;
- 2) среднее время ожидания в очереди;
- 3) коэффициент загрузки парковочных мест (каналов обслуживания);
- 4) вероятность возникновения очереди.

Такой подход обеспечил рассмотрение нестационарных потоков заявок (автомобилей) и времени обслуживания (занятости парковочного места) с учетом их вероятностной природы, что позволило построить адекватную модель функционирования системы паркования в условиях неопределенности.

Методами исследования являлись элементы теории массового обслуживания, которые обеспечили рассмотрение системы массового обслуживания с ожиданием при исследовании основных характеристик по обеспечиванию паркования автотранспорта на стоянках. При исследовании системы паркования с ожиданием использовались элементы теории вероятностей.

3 Результаты исследований

Паркование автомобилей в больших городах характеризуется случайными процессами в СМО. При этом рассматриваются марковские случайные процессы потоков событий при использовании управления Колмогорова и определяется система массового обслуживания с отказами (одноканальные и многоканальные). В качестве «каналов» обслуживания рассматриваются места паркования автомобилей [1, 2].

Система массового обслуживания обеспечивает обслуживание (выполнения) какого-то потока заявок на паркование автомобилей в случайные моменты времени. Обслуживание поступившей заявки удовлетворяется в случае свободного места на паркование. Случайный характер потока заявок приводит к тому, что в какие-то промежутки времени на входе СМО будут появляться излишне заявки. Они будут образовывать очередь автомобилей, поступивших для паркования, что может приводить к покиданию СМО необслуженными автомобилями из очереди. В другие же периоды СМО будет работать с недогрузкой или простаивать [3, 4].

Система массового обслуживания при исследовании паркования автомобилей в зависимости от характера потока заявок на их паркование определяет пропускную способность, которая будет обеспечивать успешное удовлетворение поступившего потока на паркование [5-7].

Рассмотрим одноканальную ($n = 1$) СМО с ожиданием, в которую поступает поток заявок на паркование с интенсивностью (λ) , интенсивностью обслуживания (μ) и количеством обслуженных при этом заявок $(\rho = \frac{\lambda}{\mu})$. Заявка на паркование автомобиля, поступающего в момент, когда канал (парковочное место) занят, становится в очередь и ожидает обслуживания, когда освободится хотя бы одно парковочное место. При этом обслуживание может быть упорядоченным (в порядке очереди), хаотичным (кто сумеет вперед выйти к каналу обслуживания и приоритетным (обслуживание минует очередь).

Предположим, что количество автомобилей в очереди ограничено числом (m), то есть автомобиль прибыл для паркования в момент, когда в очереди уже стоят (m) автомобилей (заявок). Автотранспорт в этом случае покидает систему парковки необслуженной [8].

Состояние СМО может быть пронумеровано по числу заявок на паркование автотранспорта, которые могут находиться как в состоянии обслуживания, так и в состоянии ожидающих обслуживания в некоторой системе (S) [9-11]:

S_0 – канал свободен, то есть места для паркования автотранспорта имеются;

S_1 – канал занят, то есть все места для паркования автотранспорта заняты, но очереди нет;

S_2 – канал занят, но одно место для паркования автотранспорта стоит в очереди (то есть имеется);

S_k – канал занят, ($k-1$) заявок стоит в очереди;

S_{m+1} – канал занят, (m) заявок стоят в очереди.

При анализе случайных процессов с дискретными состояниями, которые имеют место в результате паркования автотранспорта, удобно пользоваться так называемым графом состояний системы (S) и переходов (ГСП).

Граф состояний и переходов (ГСП) в местах организации паркования автотранспорта представлен на рис. 1 [12].

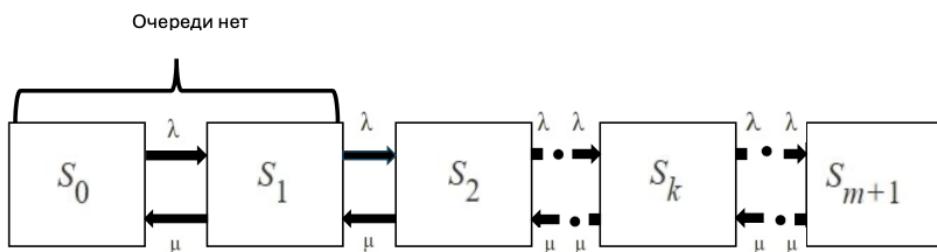


Рисунок 1 – Одноканальная система массового обслуживания с ожиданием

Из рис. 1 следует, что все интенсивности потоков событий перехода системы (S) по стрелкам слева направо, равны (λ), а справа налево – (μ). То есть по стрелкам слева направо систему переводит поток заявок (как только приходит новая заявка, система переходит в следующее состояние). В случае же направления справа налево имеем поток «освобождения» мест паркования автотранспорта, имеющий интенсивность (μ). В этом случае, как только будет обслужена очередная заявка, паркируемое место автотранспорта освободится, что приведет к уменьшению заявок в очереди [13-15].

Процесс, происходящий в системе (рис.1), можно представить как последовательную цепочку случайных событий, которая получила название марковской цепи ($S_1^{(0)}, S_2^{(1)}, S_3^{(2)}, S_4^{(3)} \dots$). При этом для каждого шага вероятность перехода (P) из любого состояния (S_i) в любое состояние S_j не зависит от того, когда и как система перешла в состояние (S_i).

Вероятности этих событий (P) для k -го шага, называются вероятностями состояний и имеют вид:

$$P_1(k) = P(S_1^k), P_2(k) = P(S_2^k), \dots P_i(k) = P(S_i^k). \quad (1)$$

Эти вероятности (1) удовлетворяют дифференциальным уравнениям Колмогорова. Решая эти уравнения, можно вычислить вероятности состояний во времени (t)

$$P(t) = P_1(t), P_2(t), \dots P_n(t), \quad (2)$$

удовлетворяющих условию

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1. \quad (3)$$

В результате решения дифференциальных уравнений Колмогорова для паркования автотранспорта в системе массового обслуживания с ожиданием получены следующие выражения для предельных вероятностей состояний [12]:

$$\begin{cases} P_k = \rho^k P_0; \\ P_0 = \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+2}} \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, m+1), \quad (4)$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ – приведенная интенсивность потока заявок по паркованию автотранспорта; λ – интенсивность потока заявок, авто/ч. (поток автомашин, прибывающих для паркования); μ – интенсивность потока автомобилей, находящихся в парковании, авто/ч.

После преобразования в окончательном виде предельные вероятности, определенные из дифференциальных уравнений Колмогорова, принимают вид:

$$\begin{cases} P_0 = \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+2}} P_k \\ P_1 = \rho P_0 \\ P_2 = \rho^2 P_0 \\ \dots \\ P_k = \rho^k P_0; \\ \dots \\ P_{m+1} = \rho^{m+1} P_0 \end{cases} \quad (5)$$

В результате преобразований определены основные характеристики для СМО. Расчет основных характеристик в системе массового обслуживания с ожиданием при парковании автотранспорта проводится в следующей последовательности:

1) Вероятность отказа. Отказ имеет место в том случае, когда все места для паркования автотранспорта заняты и все m мест в очереди тоже:

$$P_{\text{отк}} = P_{m+1} = \frac{\rho^{m+1}(1-\rho)}{1-\rho^{m+2}}. \quad (6)$$

2) Относительная пропускная способность:

$$q = 1 - P_{\text{отк}} = 1 - \frac{\rho^{m+1}(1-\rho)}{1-\rho^{m+2}}. \quad (7)$$

3) Абсолютная пропускная способность:

$$A = \lambda q. \quad (8)$$

4) Средняя длина очереди:

$$\bar{r} = \frac{\rho^2[1 - (m+1-m\rho)\rho^m]}{(1-\rho)(1-\rho^{m+2})}. \quad (9)$$

5) Среднее число заявок, находящихся в системе:

$$\bar{\omega} = \frac{\rho - \rho^{m+2}}{1 - \rho^{m+2}}. \quad (10)$$

6) Среднее время ожидания в очереди, определяемое как отношение среднего числа заявок в очереди к интенсивности потока заявок:

$$\bar{t}_{\text{ож}} = \frac{\bar{r}}{\lambda}. \quad (11)$$

7) Среднее время пребывания заявки в системе $t_{\text{смо}}$. Время пребывания заявки в СМО в результате паркования автотранспорта будет состоять из среднего времени ожидания в очереди и среднего времени обслуживания (непосредственного паркования автотранспорта $\bar{t}_{\text{обсл}}$):

$$\bar{t}_{\text{обсл}} = \frac{q}{\mu}. \quad (12)$$

Тогда полное время будет равно

$$\bar{t}_{\text{смо}} = \bar{t}_{\text{ож}} + \bar{t}_{\text{обсл}}. \quad (13)$$

На основе полученных выражений теоретически обоснована и разработана методика моделирования процессов массового обслуживания для систем паркования автомобильного транспорта, обслуживающих объекты массового тяготения в городских агломерациях. Для расчета ключевых характеристик системы массового обслуживания (СМО) с ожиданием применялся аппарат теории вероятностей, в частности, система дифференциальных уравнений Колмогорова.

Использование уравнений Колмогорова позволяет анализировать вероятности перехода парковочной системы из одного состояния (S_i) в другое и на этой основе вычислять основные показатели эффективности СМО с ожиданием. Предложенная методика была апробирована на примере парковки, расположенной у торгового центра «Московский проспект» в г. Воронеже.

Апробация модели на практическом примере

Исследование выполнено для парковки торгового центра «Московский проспект» в г. Воронеже – типичного объекта массового тяготения в крупном городе. Парковочная зона допускала нахождение в очереди не более одного автомобиля ($m = 1$). При занятой очереди прибывающий автомобиль покидал систему, не становясь в очередь.

Приведенная интенсивность потока заявок составила:

$$\mu = \frac{\lambda}{30} = \frac{0,1}{30} = 0,0033; \quad \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{0,1}{0,0033} = 30,3,$$

где μ – интенсивность обслуживания; ρ – непрерывно занятые места паркования в единицу времени. Если место занято, то автотранспорт становится в очередь и ожидает освободившиеся места.

По формулам (5) получим:

$$P_0 = \frac{1 - 30,3}{1 - 30,3^2} = \frac{-29,3}{1 - 918,1} = 0,032,$$

$$P_1 = \rho \cdot P_0 = 30,3 \cdot 0,032 = 0,968.$$

Вероятность отказа определяется по формуле (6):

$$P_{\text{отк}} = \frac{30,3^{1+2}(1 - 30,3)}{1 - 30,3^{1+2}} = \frac{26900}{27817,1} = 0,967.$$

Относительная пропускная способность СМО с ожиданием по зависимости (7) равна:

$$q = 1 - 0,967 = 0,033.$$

Абсолютная пропускная способность СМО с ожиданием автомашин в минуту по зависимости (8) будет равна:

$$A = 0,1 \cdot 0,033 = 0,0033.$$

Среднее число автомобилей в очереди для паркования по формуле (9) будет равно:

$$\bar{r} = \frac{30,3^2[1 - (1 + 1 - 30,3)30,3]}{(1 - 30,3)(1 - 30,3^{1+2})} = \frac{788180,30}{815041,03} = 0,967.$$

Среднее число автомобилей, находящихся под обслуживанием по формуле (10):

$$\bar{\omega} = \frac{30,3 - 30,3^{1+2}}{1 - 30,3^{1+2}} = \frac{27787,8}{27817,1} = 0,99.$$

Среднее время ожидания автотранспорта в очереди по формуле (11) соответственно равно:

$$\bar{t}_{\text{ож}} = \frac{0,967}{0,1} = 9,67 \text{ мин.}$$

Среднее время пребывания автотранспорта в СМО с ожиданием $\bar{t}_{\text{смо}}$ определяется из среднего времени ожидания в очереди $\bar{t}_{\text{ож}}$ и среднего времени обслуживания $\bar{t}_{\text{обсл.}}$.

Пробный проведенный расчет основных характеристик СМО с ожиданием является весьма актуальным в местах тяготения больших городов. Так, данный расчет использовался для одного из мест (сооружений) по паркованию автотранспорта в г. Воронеже под торговым центром «Московский проспект». Площадка перед данным сооружением допускала пребывание в очереди на паркование не более одного автотранспорта ($m = 1$). Если в очереди уже находится один автомобиль, очередной автомобиль, прибывший для паркования, в очередь не становится. Поток автомашин, прибывающих для паркования в данном месте, имел интенсивность $\lambda = 0,1$ (поступление автотранспорта в минуту, что соответствовало 6 автомашин в час). Процесс длительности паркования автотранспорта в среднем составлял 30 мин. Проведенный расчет демонстрирует низкую эффективность работы рассматриваемой парко-

вочной системы. Высокая вероятность отказа ($P_{отк} \approx 0,967$) и чрезмерно большое время ожидания в очереди ($P_{ож} \approx 9,67$ мин.) свидетельствуют о значительной перегрузке и необходимости оптимизации организации парковочного пространства. Полученные результаты подтверждают актуальность применения методов теории массового обслуживания для анализа и проектирования систем парковирования в местах массового тяготения крупных городов.

4 Обсуждение и заключение

Проведенное исследование было мотивировано необходимостью решения одной из наиболее острых проблем современных городов – дефицита эффективных парковочных пространств. Как показал анализ, работа автостоянок, особенно в местах массового тяготения, должна быть организована таким образом, чтобы максимально удовлетворять существующий спрос. Однако это удовлетворение может быть либо полным (когда стоянка принимает весь входящий поток автотранспорта), либо неполным, что приводит к отказам и формированию очередей. Критически важным фактором, определяющим эту динамику, является не только пропускная способность самой стоянки, но и ее месторасположение в городской структуре.

Настоящая работа демонстрирует, что аппарат теории массового обслуживания предоставляет надёжный математический инструментарий для адекватной оценки реального состояния работы парковочных систем. Предложенная методика позволяет количественно определить ключевые показатели эффективности, такие как абсолютная и относительная пропускная способность, среднее время ожидания в очереди, вероятность немедленного обслуживания и, что наиболее значимо, вероятность отказа. Последний показатель является интегральной характеристикой, наглядно демонстрирующей, насколько стоянка справляется с пиковой нагрузкой.

Работа автостоянок должна быть построена таким образом, чтобы удовлетворять спрос на паркование автомобилей. Однако это удовлетворение может быть либо полным, то есть стоянка может принимать весь поток автотранспорта (например, в местах притяжения в дневное время), либо неполным. Важным фактором при этом является месторасположение стоянки на карте города. Реальное состояние работы стоянок для паркования автотранспорта можно определять используя аппарат теории массового обслуживания, который позволяет оценивать показатели эффективности работы стоянки паркования автотранспорта: абсолютную и относительную пропускную способность, среднее время продолжительности паркования, средний интервал и интенсивности прибытия автотранспорта для паркования и обслуживания автотранспорта на стоянке, вероятность немедленного принятия автотранспорта на обслуживание, вероятность отказа в обслуживании (вероятности занятости системы).

В рамках исследования установлено, что для успешного применения данной методики необходимы три исходных параметра: средний интервал прибытия автотранспорта, средняя продолжительность паркования и количество парковочных мест. Эти показатели, получаемые в ходе натурных наблюдений, являются фундаментом для построения достоверной модели и последующих расчетов.

Рост уровня автомобилизации в условиях ограниченной пропускной способности улично-дорожной сети породил системный кризис паркования в крупных городах, особенно актуальный в зонах массового тяготения. В ответ на эту задачу в статье предложен механизм формализации работы автостоянок как системы массового обслуживания с отказами и ограниченной очередью.

Полученные результаты имеют научную и практическую значимость:

1) В отношении теоретического обоснования представлена и апробирована методика, позволяющая рассматривать парковочную инфраструктуру как стохастическую сеть массового обслуживания, что позволяет применять к ее анализу хорошо разработанный математический аппарат.

2) В отношении систематизации результатов выделены и структурированы ключевые показатели, характеризующие эффективность системы паркования, и предложен четкий порядок их расчета на основе уравнений Колмогорова.

3) В отношении практической аprobации разработанная методика была успешно применена для оценки функционирования реальной стоянки в г. Воронеже. Расчеты наглядно показали низкую эффективность системы (вероятность отказа $\sim 0,69$), что свидетельствует о ее значительной перегрузке и подтверждает необходимость оптимизации – например, за счет увеличения количества мест или внедрения системы управления очередью.

Рост автомобилизации, малая плотность дорожной сети создало проблемы парковования автотранспорта в городах, особенно в местах массового тяготения. В связи с этим в статье предложен механизм работы стоянок автотранспорта как системы массового обслуживания с отказами. Выделены показатели, характеризующие систему паркования автотранспорта и предложен порядок их расчета. Предложена методика оценки функционирования стоянок для паркования автотранспорта, обслуживающих объекты массового тяготения, которое сопровождается конкретным расчетом одной из стоянок в Воронежской области.

Таким образом, использование теории массового обслуживания открывает возможности для перехода от интуитивного управления парковочным пространством к научно обоснованному проектированию и оперативному регулированию, что является важным этапом на пути к созданию устойчивой транспортной среды в крупных городских агломерациях.

Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке оптимизационных моделей, учитывающих неоднородность парковочного спроса в течение суток, поведенческие модели водителей и возможность создания централизованных систем управления парковочным пространством всего города.

Список литературы

- 1 Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль количества / Р. Шторм // пер. с нем. – М.: Мир, 1970. – 368 с.
- 2 Мальцев, Ю.А. Экономико-математические методы проектирования транспортных сооружений / Ю.А. Мальцев. – М.: Центр «Академия», 2010. – 320 с.
- 3 Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1991. – 384 с.
- 4 Голубев, Е.А. Автомобильные стоянки и гаражи в застройке городов / Е.А. Голубев. – Стройиздат, 1988. – 252 с.
- 5 Гольц, Г.А. Автодорожный комплекс в условиях взрывной автомобилизации: тенденции, закономерности, прогноз / Г.А. Гольц // Проблемы прогнозирования. – 2002. – №4. – С. 75-83.
- 6 Киноринг, В.И. Искусство управления / В.И. Киноринг. – М.: БЕК, 1997. – 288 с.
- 7 Лобанов, Е.М. Транспортная планировка городов / Е.М. Лобанов. – М.: Стройиздат, 1990. – 240 с.
- 8 Саати, Л.Т. Элементы теории массового обслуживания и её приближения / Л.Т. Саати. – М.: Советское радио, 1971. – 520 с.
- 9 Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и её приложения. В 2 т. / В. Феллер; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 528 с.
- 10 Четыркин, Е.М. Статические методы прогнозирования / Е.М. Четыркин. – М.: Статистика, 1997. – 200 с.
- 11 Арнольд, В.И. Аналитика и прогнозирование: математический аспект / В.И. Арнольд // Научн.-техн. Информация. – 2003. – Сер.1. – №3. – С. 1-11.
- 12 Партика, Т.Л. Математические методы / Т.Л. Партика, И. И. Попов. – М.: ФОРУМ.: ИНФРА-М, 2009. – 464 с.
- 13 Пинегина, М.В. Экономико-математические методы и модели / М.В. Пинегина. – М.: Экзамен, 2002. – 228 с.
- 14 Протасов, И.Д. Теория игр и исследование операций / И.Д. Протасов. – М.: Гелиос АРВ, 2003. – 204 с.
- 15 Карасев, А.И. Математические методы и модели в планировании / А.И. Карасев и др. – М.: Экономика, 1987. – 302 с.

References

- 1 Störmer, R. (1970). Probability theory. Mathematical statistics. Statistical quality control. Moscow: Mir. – P. 368.
- 2 Maltsev, Yu.A. (2010). Economic-mathematical methods for designing transport structures. Moscow: Academy. – P. 320.
- 3 Venttsel, E.S., & Ovcharov, L.A. (1991). Theory of random processes and its engineering applications. Moscow: Nauka. – P. 384.
- 4 Golubev, E.A. (1988). Car parks and garages in urban development. Stroyizdat. – P. 252.
- 5 Golts, G.A. (2002). The road complex in the context of explosive motorization: trends, patterns, forecast. Studies on Russian Economic Development, №4, pp. 75-83.
- 6 Kinoring, V.I. (1997). The art of management. Moscow: BEK. – P. 288.
- 7 Lobanov, E.M. (1990). Transport planning of cities. Moscow: Stroyizdat. – P. 240.
- 8 Saaty, T.L. (1971). Elements of queueing theory and its applications. Moscow: Sovetskoye Radio. – P. 520.
- 9 Feller, W. (1984). An introduction to probability theory and its applications (Vols. 1-2). Moscow: Mir. – P. 528.
- 10 Chetyrkin, E.M. (1997). Statistical forecasting methods. Moscow: Statistika. – P. 200.
- 11 Arnold, V.I. (2003). Analytics and forecasting: mathematical aspect. Scientific and Technical Information, Series, Vol. 1, №3, pp. 1-11.
- 12 Partyka, T.L., & Popov, I.I. (2009). Mathematical methods. Moscow: FORUM: INFRA-M. – P. 464.
- 13 Pinegina, M.V. (2002). Economic-mathematical methods and models. Moscow: Ekzamen. – P. 228.
- 14 Protasov, I.D. (2003). Game theory and operations research. Moscow: Gelios ARV. – P. 204.
- 15 Karasev, A.I., et al. (1987). Mathematical methods and models in planning. Moscow: Ekonomika. – P. 302.

© Белокуров С. В., Кононов М. С., Белокуров В. П.,
Кораблев Р. А., Голев А. Д., Сподарев Р. А., 2025



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДТП С УЧАСТИЕМ ВОДИТЕЛЕЙ В СОСТОЯНИИ АЛКОГОЛЬНОГО ОПЬЯНЕНИЯ

✉¹ Печатнова Елена Владимировна, к.т.н., доцент кафедры «Организация и безопасность движения», Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, e-mail: phukcia@yandex.ru

Кириюшин Иван Иванович, старший преподаватель кафедры информатики и специальной техники, Барнаульский юридический институт МВД России, преподаватель Колледжа Алтайского государственного университета, магистрант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул.

Нагорный Николай Николаевич, к.ф.н., доцент, доцент кафедры гуманитарных и социально-экономических дисциплин, Сибирский юридический институт МВД России, Красноярск.

Аннотация. Аварийность на дорогах, связанная с участием водителей в состоянии алкогольного опьянения, представляет собой одну из наиболее острых проблем в сфере безопасности дорожного движения. Несмотря на различные программы по профилактике и жесткие меры контроля, количество ДТП, связанных с употреблением алкоголя, остается на высоком уровне. В работе определены основные характеристики ДТП с участием водителей в состоянии алкогольного опьянения на автомобильных дорогах федерального значения Алтайского края и самих водителей. Рассмотрены распределения ДТП в течении года, по периодам суток, дням недели и по видам ДТП. В качестве основных характеристик при

CHARACTERISTICS OF ROAD ACCIDENTS INVOLVING DRIVERS UNDER THE INFLUENCE OF ALCOHOL

✉¹ Pechatnova Elena Vladimirovna, candidate of technical sciences, associate professor of the department «Organization and safety of traffic», Altai state technical university named after I. I. Polzunov, Barnaul, e-mail: phukcia@yandex.ru

Kiryushin Ivan Ivanovich, senior lecturer at the department of computer science and special technology of the Barnaul law institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, lecturer at the College of Altai State University, Master's student at the Altai state technical university named after I.I. Polzunov, Barnaul.

Nagorny Nikolay Nikolaevich, candidate of philosophical sciences, associate professor, associate professor of the department of humanities and socio-economic disciplines, Siberian law institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Krasnoyarsk.

Annotation. Accidents on the roads associated with the participation of drivers under the influence of alcohol are one of the most acute problems in the field of road safety. Despite various prevention programs and strict control measures, the number of alcohol-related accidents remains at a high level. The paper defines the main characteristics of road accidents involving drivers under the influence of alcohol on highways of federal significance in the Altai Territory and the drivers themselves. The distribution of accidents during the year, by periods of the day, days of the week and by types of accidents is considered. When analyzing data on drivers, age, gender, and direct traffic violations were considered as the main characteristics, and vehicle types were also considered. The research method was frequency analysis.

анализе данных о водителях выступили возраст, пол, непосредственное нарушение ПДД, также рассмотрены типы ТС. Методом исследования выступил частотный анализ.

Ключевые слова: ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНАЯ АВАРИЙНОСТЬ, ВОДИТЕЛИ В СОСТОЯНИИ АЛКОГОЛЬНОГО ОПЬЯНЕНИЯ, ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ДТП, СОЦИАЛЬНЫЙ ПОРТРЕТ ВОДИТЕЛЯ, АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ.

Keywords: ROAD ACCIDENTS, DRIVERS UNDER THE INFLUENCE OF ALCOHOL, FREQUENCY ANALYSIS OF ROAD ACCIDENTS, SOCIAL PORTRAIT OF A DRIVER, FEDERAL ROADS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В связи с растущим уровнем автомобилизации успешное решение задач обеспечения безопасности дорожного движения (БДД) и предотвращение ДТП является одним из важнейших условий, способствующих улучшению и повышению качества и продолжительности жизни граждан РФ и снижения показателей их преждевременной смертности [1]. Аварийность с участием лиц в состоянии алкогольного опьянения представляет собой значимую проблему общественного здравоохранения и БДД [2-4]. Даже при незначительном употреблении алкоголя и отсутствии клинических признаков опьянения не только ухудшается способность управлять транспортным средством и реагировать на изменения дорожной обстановки, но и увеличивается риск травм и летального исхода водителя и других участников дорожного движения, включая пассажиров и пешеходов [5-7]. Согласно официальной информации в России за 2024 год отмечено 11485 ДТП с водителями в состоянии опьянения, что составляет 9 % от общего числа ДТП, в них пострадало 14488 человек (9 % от общего числа раненых) и погибло 3509 человек (24 % от общего числа погибших)¹.

Данная проблема также свойственна и для других развитых стран, так в [8] указывается, что в Республике Кипр, Люксембурге, Испании, Словении и Франции доля смертельных случаев в результате ДТП с участием водителей в алкогольном опьянении превышает 30 %.

Изучение вопросов аварийности помогает разрабатывать эффективные стратегии профилактики, включая законодательные инициативы, направленные на ужесточение ответственности за управление транспортным средством в состоянии опьянения, внедрение технологий контроля трезвости водителей [9]. Кроме того, научные знания помогают улучшать систему подготовки водителей, формировать сознательное отношение к управлению автомобилем, повышать уровень осведомленности населения о рисках вождения в нетрезвом виде. Таким образом, изучение проблемы аварийности с водителями в состоянии опьянения является актуальным направлением научных исследований, способствующим снижению уровня травматизма и смертности на дорогах, повышению общей культуры поведения участников дорожного движения.

Основную часть ДТП с участием водителей занимают аварии с водителями в состоянии алкогольного опьянения (около 90 %), поэтому рассмотрим основные работы, посвящённые выбранной теме.

Исследование, проведенное кафедрой судебной медицины в Государственном медицинском колледже Северной Индии на основе данных о ДТП с 2021 по 2023 год показало, что наиболее распространенной возрастной группой водителей в состоянии алкогольного опьянения

¹ <http://stat.gibdd.ru/>

ния – участников ДТП, является возрастная группа водителей 21–30 лет (34,37 %), также выявлено, что 89,06 % из них мужчины [10]. В работе [11] определены факторы, влияющие на частоту водителей в алкогольном опьянении – участников ДТП, среди них: возраст, пол, отсутствие брака, проживание в сельской местности и курение. Схожие результаты получены в исследовании [12], в частности, в группе водителей в состоянии алкогольного опьянения более распространены разведенные водители или вдовцы более, также подтверждена гораздо большая частота мужчин среди пьяных водителей, хотя анализ возрастных групп показал другие результаты: наибольшая частота обнаружена в возрастной группе 40–49 лет. Исследователи из Национального университета Чи Нань определили факторы, влияющие на частоту повторного управления автомобилем в состоянии алкогольного опьянения: выяснено, что люди с высшим образованием и женатые водители с детьми в возрасте от 1 до 5 лет менее склонны к повторным нарушениям в этой сфере [13]. Российскими исследователями проведен анализ осужденных за нетрезвое управление транспортным средством и было определено, что средний возраст составил 33 года, что ниже среднероссийского возраста автовладельца, а также, что большая часть из них имели образование не выше среднего специального и были заняты трудом, не требующим высокой квалификации [14]. Схожие результаты указываются в работах [15, 16], где определено, что основной возрастной группой водителей в алкогольном опьянении, участников ДТП, является группа возраста 30–40 лет.

В статье [17] указывается, что более высока вероятность тяжелых последствий с участием водителей в алкогольном опьянении при столкновениях сзади и в период с 22:00 до 01:00. Одно из объяснений более серьезных травм при ДТП с участием водителей в алкогольном опьянении дано в [18], где исследователи обнаружили связь между превышением скоростного режима и употреблением водителями алкогольных напитков. Аналогичные результаты отражены в [16], где статистический анализ показал, что около 25 % непосредственных нарушений ПДД, которые привели к ДТП, являлись несоответствие скорости конкретным условиям, а 12 % – нарушений вследствие превышения скоростного режима.

Анализ опубликованных научных результатов по данной теме показал, что существуют определенные факторы, при которых наблюдается повышенная частота водителей в алкогольном опьянении – участников ДТП, однако некоторые из этих результатов носят дискуссионный характер. Целью работы является определение факторов, влияющих на частоту водителей в алкогольном опьянении, которые являлись участниками ДТП.

2 Материалы и методы

Для проведения исследования проанализирована база данных ДТП с материальным ущербом и с пострадавшими, где участником ДТП были водители в состоянии алкогольного опьянения, которые произошли на автомобильных дорогах федерального значения в Алтайском крае за период с 2022 по 2024 год. Всего проанализировано 158 ДТП, из них 93 ДТП с пострадавшими и 65 ДТП с материальным ущербом.

Исследование включало в себя два этапа: анализ показателей ДТП с участием водителей в алкогольном опьянении (распределение в течении года, по периодам суток, по видам ДТП) и анализ характеристик самих водителей в алкогольном опьянении. Время суток определено с помощью специализированного сервиса Карта дня и ночи на Яндекс картах².

Исследование проведено с помощью одномерного и двухмерного частотного анализа, реализованного в программах MS Excel и Statistica.

² <https://yandex.ru/maps/night-overlay/>

3 Результаты исследований

На первом этапе получено распределение ДТП по месяцам года, которое показано на рис. 1.



Рисунок 1 – Распределение ДТП с водителями в алкогольном опьянении по месяцам

Наибольшее число ДТП в том числе с пострадавшими отмечается в апреле, июле, октябре и декабре.

Распределение ДТП по дням недели показано на рис. 2. Наибольшее количество ДТП отмечается в выходные дни, а также в пятницу и понедельник.

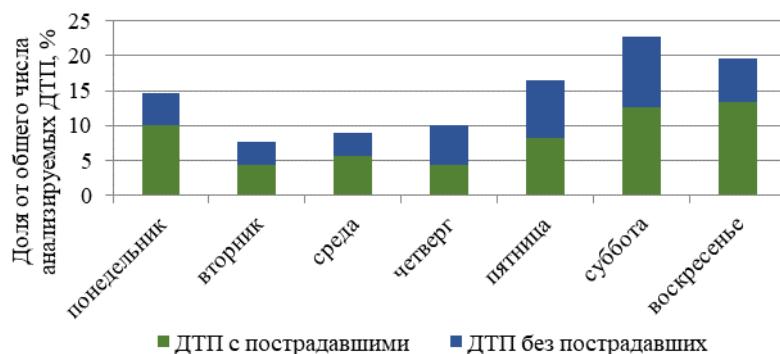


Рисунок 2 – Распределение ДТП с водителями в алкогольном опьянении по дням недели

Распределение анализируемых ДТП по периодам суток отражено на рис. 3. Основная часть ДТП фиксируется ночью.

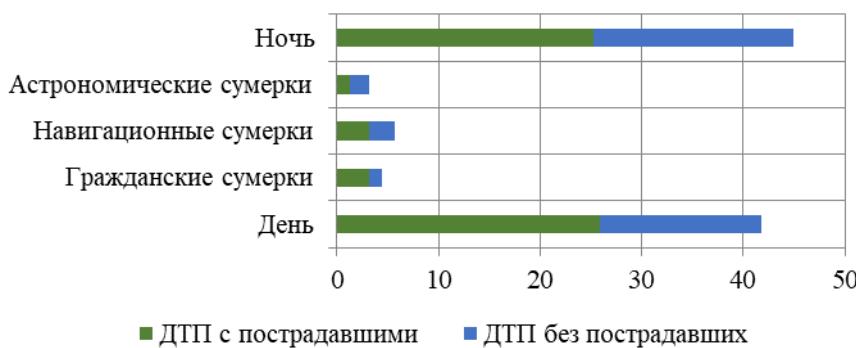


Рисунок 3 – Распределение ДТП с водителями в алкогольном опьянении по периодам суток

Проведен анализ ДТП с водителями в алкогольном опьянении по видам ДТП (рис. 4). Наиболее распространены столкновения, съезды с дороги.

На втором этапе исследования проанализированы характеристики водителей – участников ДТП в алкогольном опьянении. Определено, что более 94 % из них являлись мужчинами. Распределение по полу и возрасту показано на рис. 5. Наибольшая частота наблюдается в возрастной группе от 34 до 39 лет как среди женщин, так и мужчин. С увеличением возраста число случаев уменьшается среди мужчин, среди женщин отсутствуют водители старше 49 лет.

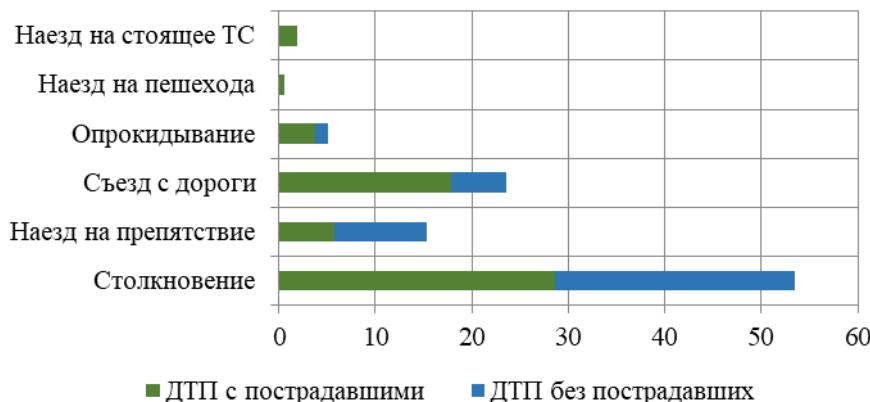


Рисунок 4 – Распределение ДТП с водителями в алкогольном опьянении по видам ДТП

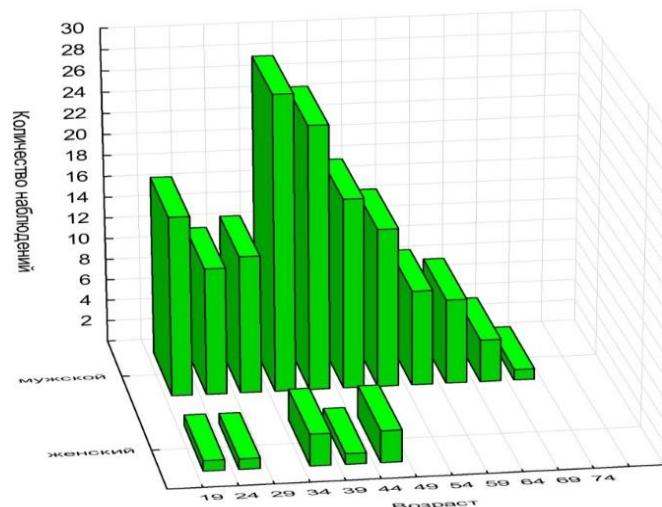


Рисунок 5 – Распределение водителей в алкогольном опьянении по полу и возрасту

Проведен двухмерный частотный анализ в группах пол – число погибших в ДТП, пол – число пострадавших. Определено что в ДТП с участием женщин в алкогольном опьянении не зафиксировано погибших. В отношении пострадавших: 66 % ДТП с участием водителей-женщин были с одним пострадавшим, 33 % – без пострадавших; с водителями мужчинами 51 % – без пострадавших, 27 % – с одним пострадавшим, 22 % с двумя и более пострадавшими.

Наибольшее количество ДТП с погибшими с участием водителя в алкогольном опьянении отмечается в возрастной группе водителя от 34 до 39 лет. Распределение водителей по возрастным группам и количеству пострадавших показано на рис. 6 (ДТП без пострадавших исключены). Наибольшее количество пострадавших в ДТП отмечается в возрастных группах водителей 19-24 года, 34-39 лет и 39-44 года.

Далее проанализированы непосредственные нарушения ПДД – нарушения ПДД, которые стали причиной ДТП. Распределение показано на рис. 7. Наиболее распространенными

видами являются неправильный выбор дистанции, нарушение правил расположения транспортного средства на проезжей части и несоответствие скорости конкретным условиям. Среди указанных нарушений отмечается также наибольшее число погибших и пострадавших.

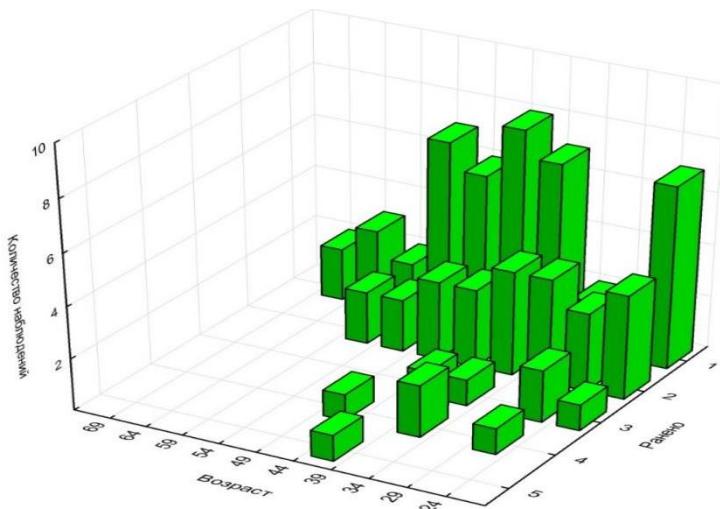


Рисунок 6 – Распределение водителей в алкогольном опьянении по возрасту и числу пострадавших



Рисунок 7 – Распределение водителей в алкогольном опьянении по непосредственным нарушениям ПДД, %

Результаты двухмерного анализа в паре возраст – непосредственное нарушение ПДД показаны на рис. 8. Определено, что наибольшая частота исследуемой группы водителей – участников ДТП отмечается в возрасте от 39 до 44 лет при несоответствии скорости конкретным условиям. Также большая частота водителей отмечается в возрасте от 34 до 39 лет при несоответствии скорости конкретным условиям и нарушении правил расположения транспортного средства на проезжей части. Стоит отметить, что для наиболее младшей группы водителей (от 19 до 24 лет) свойственны несоответствие скорости и выезд на полосу встречного движения, а распространенное нарушение правил расположения ТС – в значительно меньшей степени. В старшей возрастной группе (от 59 лет) водители по нарушениям ПДД распределены практически равномерно.

Среди характеристик транспортных средств (ТС) выделено, что более половины из них – легковые автомобили В-класса длиной до 3,9 м, далее следуют легковые автомобили С-класса длиной до 4,3 м (24 %). Среди нелегковых ТС отмечены самосвалы, бортовые грузовые

автомобили. Также зафиксирован один случай ДТП с водителем управляющим гужевой повозкой в состоянии алкогольно опьянения. Водители-женщины в состоянии алкогольного опьянения управляли только легковыми ТС.

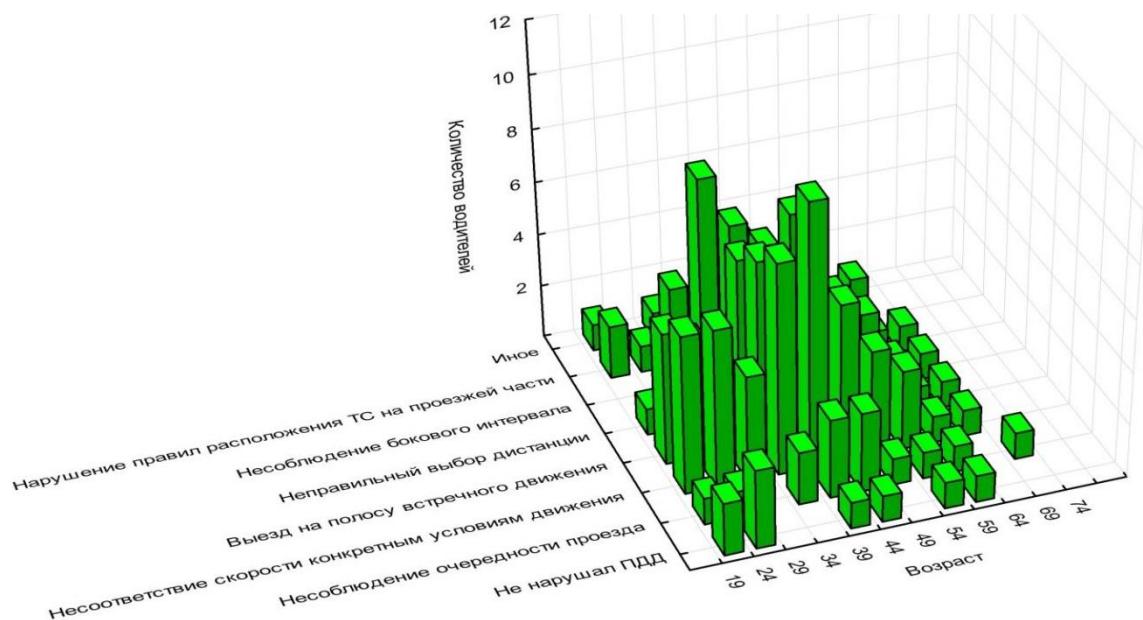


Рисунок 8 – Распределение водителей в алкогольном опьянении по непосредственным нарушениям ПДД и возрастным группам

4 Обсуждение и заключение

В результате анализа определены отдельные характерные особенности аварийности с участием водителей в алкогольном опьянении. В частности выявлено, что наибольшее число ДТП с пострадавшими лицами фиксируется в переходные периоды – в апреле и октябре. Учитывая результаты частотного анализа непосредственных нарушений ПДД можно сделать вывод о том, что изменение погодных условий, гололедные явления являются своеобразным катализатором для возникновения ДТП с участием водителей в алкогольном опьянении. Вероятно, это связано с увеличенным временем реакции у таких водителей, в результате чего при неожиданном изменении условий движения, возникновения аварийной ситуации такие водители имеют гораздо меньший шанс предотвратить ДТП. Достаточно ожидаемым является результат увеличения ДТП в выходные дни и ночью – это связано с социально поведенческими детерминантами (актуализация досуговых практик, связанных с потреблением алкоголя), экономико-правовыми аспектами (снижение плотности патрулирования и ограниченная доступность такси в ночное время) и пр. Распределение ДТП с участием водителей в алкогольном опьянении по видам в определенной степени схоже с общим распределением ДТП на автомобильных дорогах федерального значения (преобладание столкновений – более 50 %), но отличается увеличенной долей съездов с дороги и наездов на препятствия. Это объясняется потерей внимания и увеличенным временем реакции водителями в состоянии алкогольного опьянения, что препятствует своевременному реагированию на неожиданные препятствия, изменения дорожной обстановки и возникновению аварийных ситуаций.

Определен социальный портрет типичного водителя в алкогольном опьянении – участника ДТП. Это мужчина в возрасте от 34 до 39 лет, управляющий легковым автомобилем В-класса. Преобладание мужчин обусловлено комплексным взаимодействием биологических, психологических и социально-культурных факторов. Отсутствие ДТП с летальными исходами среди водителей – женщин в состоянии алкогольного опьянения обуславливается большей осторожностью и избеганием рискованных ситуаций женщинами в целом.

Анализ нарушений ПДД, которые привели к ДТП показал, что наиболее распространенным является несоответствие скорости конкретным условиям движения, что вероятно является следствием ошибочной оценки дорожной обстановки лицами в состоянии алкогольного опьянения. Примечательно, что среди молодых водителей преобладают «рискованные» нарушения – несоответствие скорости и выезд на полосу встречного движения, а среди наиболее старших нет выраженных нарушений. Это согласовывается с психологическими особенностями возраста – более выраженная склонность к риску в молодом возрасте и более осторожное поведение в старшем.

Аварийность с участием водителей в алкогольном опьянении представляет собой серьезную социальную проблему: водитель, находящийся в состоянии алкогольного опьянения, быстро перестает осознавать свои возможности, преуменьшает опасность и преуменьшает свои водительские способности [19]. Для снижения числа таких водителей необходимо принимать различные меры, в частности различные курсы реабилитации и переподготовки водителей, лишенных права управления [20], установка алкозамков, но одним из наиболее эффективных продолжает оставаться профилактическая работа сотрудниками Госавтоинспекции. Полученные результаты имеют практическую значимость ввиду того, что могут позволить осуществлять такие мероприятия более направленно – с учетом особенностей аварийности и социального портрета водителя в состоянии алкогольного опьянения – участника ДТП. Профилактическая и реабилитационная работа с этой социальной группой может стать одним из основных направлений комплексной работы по снижению аварийности с участием водителей в алкогольном опьянении.

Основным перспективным направлением исследований в этой сфере является анализ характеристик водителей, привлеченных по статье 12.8 Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях, т.е. анализ административной практики, не связанной с ДТП и сравнение результатов с данными, полученными в настоящей научной работе.

Список литературы

- 1 Печатнова, Е. В. Влияние отдельных метеорологических параметров на риск возникновения наезда на пешехода / Е. В. Печатнова, И. А. Новиков, К. С. Нечаев, И. П. Иванов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2024. – № 6. – С. 53-59. – DOI 10.36535/0236-1914-2024-06-8.
- 2 Smailović, Emir The effects of a change in permissible blood alcohol concentration limit on involving drink-driving in road accidents / Emir Smailović, Pešić Dalibor, Markovic Nenad, Antić Boris, Lipovac Krsto // Transportation Research Procedia. – 2020. – 45. – p.201-209. – DOI 10.1016/j.trpro.2020.03.008.
- 3 Dordoye, Eugene Affram / Perception of Alcohol Use and Alcohol Use Disorder among Persons Involved in Road Accidents at an Emergency Department: A Cross-Sectional Study. Eugene Affram Dordoye, Kwame Dzivornu Emmanuel, Danso Abigail Djankpa, Francis Adjenti Kweku. // Nigerian Medical Journal. – 2023. – 64. p.503-507. – DOI 10.60787/NMJ-64-4-324.
- 4 Yadav, Ooha Drowsiness and Alcohol Detection System. / Yadav Ooha, Alli Daisy // Compliance Engineering. – 2021. – 11. p.294.
- 5 Ruiz Alvaro Concentrations of Alcohol in the Blood and Risk of Road Accidents: A Systematic Review of the Literature. /Alvaro Ruiz, Macías Muñoz Felipe, Restrepo Carlos, Rondon Martin, Lozano Juan // Revista Colombiana de Psiquiatría. – 2010 – 39. – p.249s-278s.
- 6 Cheriyan, George. Social determinants and drunken driving. / George Cheriya // Injury Prevention. – 2024 – 30. p.A151.1-A151. – DOI 10.1136/injuryprev-2024-SAFETY.361.
- 7 Sukmawati, Adik Causality Study of Drunk Driver Traffic Violations on Road Safety. / Adik Sukmawati, Farid Achmad // DiH: Jurnal Ilmu Hukum. – 2024 – 31-42. – DOI 10.30996/dih.v0i0.12105.
- 8 Kumar S, Ram A study on the Efficacy of Alcohol Detection in the prevention of Drunken Driving. / S. Ram Kumar, S. Shriprayan, R. Vinithraja, G. Manikandan, M. Sandeep // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021 – 1145. – 012084. – DOI 10.1088/1757-899X/1145/1/012084.
- 9 Carter, Patrick Modeling the Injury Prevention Impact of Mandatory Alcohol Ignition Interlock Installation in All New US Vehicles. / Patrick Carter, Flannagan Carol, Bingham C Raymond, Rebecca Cunningham, Jonathan Rupp // American journal of public health. – 2015 – 105. – p.e1-e8. – DOI 10.2105/AJPH.2014.302445.

- 10 Sharma, Abhishek Road traffic accident autopsy cases: Injury pattern and alcohol use. / Abhishek Sharma, Manoj Sharma, Parmar Kirti // Journal of Family Medicine and Primary Care. – 2025. – 14. – p.3997-4000. – DOI 10.4103/jfmpc.jfmpc_466_25.
- 11 Vichitkunakorn, Polathep Binge drinking and drunk driving among current drinkers in Thailand. / Vichitkunakorn Polathep, Intusoma Utcharee, Assanangkornchai, Sawitri // Injury Prevention. – 2022 – 28. – p.A2.1-A2. – DOI 10.1136/injuryprev-2022-safety2022.5.
- 12 Portman, Maria Profile of a drunk driver and risk factors for drunk driving./ Maria Portman, A. Penttilä, Haukka Jari, Ansavuori Sirpa, C.J.P. Eriksson, Gunnar Teemu, H Koskimaa, K. Kuoppasalmi // Findings in roadside testing in the province of Uusimaa in Finland 1990-2008. Forensic science international. – 2013 – 231. 20-7. – DOI 10.1016/j.forsciint.2013.04.010.
- 13 Jou, Rong-Chang Factors Affecting Recidivism of Drunk Driving for Car and Motorbike Users. / Rong-Chang Jou, Lu Yi-Hao // Mathematical Problems in Engineering. – 2021. – p.1-16. – DOI 10.1155/2021/9065416.
- 14 Пфау, Т. В. Особенности социальных установок мужчин, позволяющих себе управление транспортным средством в состоянии опьянения / Т. В. Пфау, Ю. С. Вторушина, Е. Н. Власова [и др.] // Психология. Историко-критические обзоры и современные исследования. – 2021. – Т. 10, № 3-1. – С. 117-129. – DOI 10.34670/AR.2021.60.83.016.
- 15 Смирнов, О. А. Психологические инструменты профилактики вождения в состоянии алкогольного и наркотического опьянения: обобщение международной практики / О. А. Смирнов, Д. Н. Слабкая, А. В. Новиков // Психология. Историко-критические обзоры и современные исследования. – 2022. – Т. 11, № 3-1. – С. 242-248. – DOI 10.34670/AR.2022.18.12.031.
- 16 Горбатенко, Д. С. Нетрезвое состояние водителя как причина дорожно-транспортного происшествия / Д. С. Горбатенко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 11. – С. 27-29.
- 17 Senathipathi, Vilmurugan A study of factors influencing the severity of road crashes involving drunk drivers and non drunk drivers / Velmurugan Senathipathi, Seetharaman Padma, Errampalli Madhu, Shukla Anuradha, S.Gangopadhyay // Research in Transportation Economics. – 2013 – 38. p.78-83. – DOI 10.1016/j.retrec.2012.05.015.
- 18 Mark, Johnson. Drunk driving has a speeding problem / Johnson Mark // Traffic Injury Prevention. – 2025 – 26. p.1-5. – DOI 10.1080/15389588.2025.2456942.
- 19 Siniša, Franjić. Drunk Drivers / Franjić Siniša // International Journal of Forensic Sciences. – 2019 – 4. – DOI 10.23880/ijfsc-16000154.
- 20 Казанова, Л. А. Опыт зарубежных стран по реабилитации водителей, управлявших транспортным средством в состоянии алкогольного опьянения / Л. А. Казанова, А. М. Прохорова // Безопасность дорожного движения. Сборник научных трудов. – 2019. – № 18. – С. 74-78.

References

- 1 Pechatnova, E. V. Vliyanie otdel'nyh meteorologicheskikh parametrov na risk vozniknoveniya naezda na peshekhoda / E. V. Pechatnova, I. A. Novikov, K. S. Nечаев, I. P. Ivanov // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyj informacionnyj sbornik. – 2024. – № 6. – S. 53-59. – DOI 10.36535/0236-1914-2024-06-8.
- 2 Smailović, Emir The effects of a change in permissible blood alcohol concentration limit on involving drink-driving in road accidents / Emir Smailović, Pešić Dalibor, Markovic Nenad, Antić Boris, Lipovac Krsto // Transportation Research Procedia. – 2020. – 45. – p.201-209. – DOI 10.1016/j.trpro.2020.03.008.
- 3 Dordoye, Eugene Affram / Perception of Alcohol Use and Alcohol Use Disorder among Persons Involved in Road Accidents at an Emergency Department: A Cross-Sectional Study. Eugene Affram Dordoye, Kwame Dziwornu Emmanuel, Danso Abigail Djankpa, Francis Adjenti Kweku. // Nigerian Medical Journal. – 2023. – 64. p.503-507. – DOI 10.60787/NMJ-64-4-324.
- 4 Yadav, Ooha Drowsiness and Alcohol Detection System. / Yadav Ooha, Alli Daisy // Compliance Engineering. – 2021. – 11. p.294.
- 5 Ruiz Alvaro Concentrations of Alcohol in the Blood and Risk of Road Accidents: A Systematic Review of the Literature. /Alvaro Ruiz, Macías Muñoz Felipe, Restrepo Carlos, Rondon Martin, Lozano Juan // Revista Colombiana de Psiquiatría. – 2010 – 39. – p.249s-278s.
- 6 Cheriyan, George. Social determinants and drunken driving. / George Cheriya // Injury Prevention. – 2024 – 30. p.A151.1-A151. – DOI 10.1136/injuryprev-2024-SAFETY.361.
- 7 Sukmawati, Adik Causality Study of Drunk Driver Traffic Violations on Road Safety. / Adik Sukmawati, Farid Achmad // DiH: Jurnal Ilmu Hukum. – 2024 – 31-42. – DOI 10.30996/dih.v0i0.12105.

8 Kumar S, Ram A study on the Efficacy of Alcohol Detection in the prevention of Drunken Driving. / S. Ram Kumar, S. Shripriyan, R. Vinithraja, G. Manikandan, M. Sandeep // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021 – 1145. – 012084. – DOI 10.1088/1757-899X/1145/1/012084.

9 Carter, Patrick Modeling the Injury Prevention Impact of Mandatory Alcohol Ignition Interlock Installation in All New US Vehicles. / Patrick Carter, Flannagan Carol, Bingham C Raymond, Rebecca Cunningham, Jonathan Rupp // American journal of public health. – 2015 – 105. – p.e1-e8. – DOI 10.2105/AJPH.2014.302445.

10 Sharma, Abhishek Road traffic accident autopsy cases: Injury pattern and alcohol use. / Abhishek Sharma, Manoj Sharma, Parmar Kirti // Journal of Family Medicine and Primary Care. – 2025. – 14. – p.3997-4000. – DOI 10.4103/jfmpc.jfmpc_466_25.

11 Vichitkunakorn, Polathep Binge drinking and drunk driving among current drinkers in Thailand. / Vichitkunakorn Polathep, Intusoma Utcharee, Assanangkornchai, Sawitri // Injury Prevention. – 2022 – 28. – p.A2.1-A2. – DOI 10.1136/injuryprev-2022-safety2022.5.

12 Portman, Maria Profile of a drunk driver and risk factors for drunk driving./ Maria Portman, A. Penttilä, Haukka Jari, Ansavuori Sirpa, C.J.P. Eriksson, Gunnar Teemu, H Koskimaa, K. Kuoppasalmi // Findings in roadside testing in the province of Uusimaa in Finland 1990-2008. Forensic science international. – 2013 – 231. 20-7. – DOI 10.1016/j.forsciint.2013.04.010.

13 Jou, Rong-Chang Factors Affecting Recidivism of Drunk Driving for Car and Motorbike Users. / Rong-Chang Jou, Lu Yi-Hao // Mathematical Problems in Engineering. – 2021. – p.1-16. – DOI 10.1155/2021/9065416.

14 Pfau, T. V. Osobennosti social'nyh ustanovok muzhchin, pozvolyyayushchih sebe upravlenie transportnym sredstvom v sostoyanii op'yaneniya / T. V. Pfau, Yu. S. Vtorushina, E. N. Vlasova [i dr.] // Psichologiya. Istoriko-kriticheskie obzory i sovremennye issledovaniya. – 2021. – T. 10, № 3-1. – S. 117-129. – DOI 10.34670/AR.2021.60.83.016.

15 Smirnov, O. A. Psichologicheskie instrumenty profilaktiki vozkhdeniya v sostoyanii alkogol'nogo i narkoticheskogo op'yaneniya: obobshchenie mezhdunarodnoj praktiki / O. A. Smirnov, D. N. Slabkaya, A. V. Novikov // Psichologiya. Istoriko-kriticheskie obzory i sovremennye issledovaniya. – 2022. – T. 11, № 3-1. – S. 242-248. – DOI 10.34670/AR.2022.18.12.031.

16 Gorbatenko, D. S. Netrezvoe sostoyanie voditelya kak prichina dorozhno-transportnogo proisshestviya / D. S. Gorbatenko // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya. – 2020. – № 11. – S. 27-29.

17 Senathipathi, Velmurugan A study of factors influencing the severity of road crashes involving drunk drivers and non drunk drivers / Velmurugan Senathipathi, Seetharaman Padma, Errampalli Madhu, Shukla Anuradha, S.Gangopadhyay // Research in Transportation Economics. – 2013 – 38. p.78-83. – DOI 10.1016/j.retrec.2012.05.015.

18 Mark, Johnson. Drunk driving has a speeding problem / Johnson Mark // Traffic Injury Prevention. – 2025 – 26. p.1-5. – DOI 10.1080/15389588.2025.2456942.

19 Siniša, Franjić. Drunk Drivers / Franjić Siniša // International Journal of Forensic Sciences. – 2019 – 4. – DOI 10.23880/ijfsc-16000154.

20 Kazanova, L. A. Opyt zarubezhnyh stran po reabilitacii voditelej, upravlyavshih transportnym sredstvom v sostoyanii alkogol'nogo op'yaneniya / L. A. Kazanova, A. M. Prohorova // Bezopasnost' dorozhного dvizheniya. Sbornik nauchnyh trudov. – 2019. – № 18. – S. 74-78.

© Печатнова Е. В., Кирюшин И. И., Нагорный Н. Н., 2025



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ОПТИМИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА АВТОТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Иванников Валерий Александрович,
д.т.н., профессор кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Шаталов Евгений Владимирович,
к.т.н., доцент кафедры организации перевозок и безопасности движения, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Зеликов Владимир Анатольевич,
д.т.н., профессор кафедры организации перевозок и безопасности движения, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

✉¹ Жайворонок Денис Александрович,
к.т.н., доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: dzhaivoronok@bk.ru

Бухтояров Владимир Николаевич,
к.т.н., доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: buchtoayrov@yandex.ru

Аннотация. Представлена архитектура информационной системы сети станций технического обслуживания автотранспортной инфраструктуры, реализующая комплексный подход

OPTIMIZATION OF MONITORING OF ROAD TRANSPORT INFRASTRUCTURE USING CENTRALIZED DATA PROCESSING TECHNOLOGY

Ivannikov Valery Aleksandrovich,
doctor of technical sciences, professor of the department of production, repair and operation of machines, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Shatalov Evgeny Vladimirovich,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of production, repair and operation of machines, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Zelikov Vladimir Anatolyevich,
doctor of technical sciences, professor of the organization of transportation and traffic safety, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

✉¹ Zhaivoronok Denis Alexandrovich,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of production, repair and operation of machines, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: dzhaivoronok@bk.ru

Bukhtoyarov Vladimir Nikolaevich,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of production, repair and operation of machines, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: buchtoayrov@yandex.ru

Annotation. The architecture of the information system of the network of service stations of the motor transport infrastructure is presented, which implements an integrated monitoring approach using

мониторинга с применением передовых технологий сбора, передачи и обработки данных. Разработан алгоритм компенсации помех каналов централизованного мониторинга информации автотранспортного предприятия.

advanced technologies for data collection, transmission and processing. An algorithm has been developed to compensate for interference from centralized information monitoring channels of a motor transport company.

Ключевые слова: АВТОТРАНСПОРТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА, СТАНДАРТЫ, КАНАЛЫ СВЯЗИ, ТЕХНОЛОГИИ, ЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ.

Keywords: ROAD TRANSPORT INFRASTRUCTURE, STANDARDS, COMMUNICATION CHANNELS, TECHNOLOGIES, CENTRALIZED DATA PROCESSING, NOISE IMMUNITY.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В современной мире, где мобильность и эффективная логистика играют ключевую роль в экономическом развитии, надежное и эффективное функционирование автотранспортной инфраструктуры (АТИ) становится критически важным. Автомобильные дороги, мосты, туннели и другие элементы транспортной сети требуют постоянного мониторинга и технического обслуживания для обеспечения безопасности, предотвращения аварий и минимизации задержек. Традиционные методы мониторинга, основанные на периодических визуальных осмотрах и ручном сборе данных, часто оказываются неэффективными, трудоемкими и подверженными человеческим ошибкам. В связи с этим, разработка и внедрение современных систем мониторинга, использующих передовые технологии сбора, передачи и обработки данных, представляется актуальной и необходимой задачей для автотранспортных предприятий (АТП). Как правило в информационных технологиях доминируют тенденции к децентрализации и распределенным вычислениям, в то же время концепция централизованной обработки данных (ЦОД) часто остается в тени. Однако, несмотря на популярность распределенных систем, ЦОД сохраняет свою актуальность и, более того, во многих сценариях может предложить значительные преимущества, которые часто недооцениваются.

Кроме того, в процессе обмена данными в централизованной системе автотранспортной инфраструктуры каналы связи подвержены внешним преднамеренным и непреднамеренным электромагнитным воздействиям, что приводит к потере качества данных, искажает информацию или уничтожает ее полностью [1].

В литературных источниках отсутствует комплексный подход одновременного использования централизованной обработки данных и компенсации помех (КП) в каналах связи, посредством разработки алгоритма компенсации помех. Традиционно, эти две задачи решались раздельно: централизованная обработка данных фокусировалась на оптимизации вычислительных процессов и агрегации информации, а КП в каналах связи была направлена на минимизацию искажений сигнала, возникающих при передаче. Однако, в современных телекоммуникационных системах, особенно в контексте интернета и сетей 5G и последующих поколений, раздельное решение этих задач становится недостаточно эффективным [2]. Большие объемы данных, передаваемые по беспроводным каналам, подвержены воздействию различных видов помех, таких как многолучевое распространение, интерференция и шум. Одновременное увеличение пропускной способности и снижение задержек требуют интегрированного подхода, способного адаптироваться к динамически меняющимся условиям.

В результате предлагаемого подхода одновременного использования централизованной обработки данных и КП в каналах связи автотранспортной инфраструктуры достигается значительное улучшение производительности телекоммуникационных систем: повышается пропускная способность; снижаются задержки распространения сигнала; увеличивается

надежность передачи данных. Консолидация ресурсов и инфраструктуры часто приводит к снижению операционных расходов и упрощению масштабирования – оптимизации затрат. Кроме того, повышается эффективность аналитики, централизованный доступ к данным облегчает проведение всестороннего анализа и извлечение ценных инсайтов, необходимых для принятия обоснованных решений.

Цель работы – реализация комплексного подхода оптимизация мониторинга автотранспортной инфраструктуры путем централизованной обработки данных и подавления помех в каналах связи, посредством разработки алгоритма КП, с целью повышения эффективности и надежности передачи информации в сложных условиях работы АТП.

Полученные результаты могут быть полезны автотранспортным предприятиям с развитой сетью филиалов, работающих с различными системами мониторинга и управления транспортом в условиях роста объема и сложности генерируемой информации автотранспортной инфраструктуры. Информация будет интересна специалистам, занимающимся управлением безопасностью, целостностью и соответствия данных нормативным требованиям.

2 Материалы и методы

Для оптимизации мониторинга данных предлагается использование полностью централизованной архитектуры информационной системы сети станций технического обслуживания автотранспортной инфраструктуры (рис. 1).

Для схемы, изображенной на рис. 1, разработан следующая система действий из 6 частей:

1) Вся работа фокусируется в едином центре автотранспортного предприятия. Централизованная архитектура подразумевает использование одного мощного компьютера или группы компьютеров, часто размещенных в специализированных помещениях для обработки данных. Большинство задач выполняются непосредственно там же, и результаты остаются в этом же помещении. В качестве примера можно привести системы расчета заработной платы. Однако, для некоторых задач требуется участие сотрудников, находящихся вне вычислительного центра. Например, для проведения инвентаризации требуется ввод данных работниками на местах. В этой схеме каждый пользователь получает доступ к центральному компьютеру через терминал [3]. В этом случае, каждый работник автотранспортного предприятия, задействованный в информационной сфере имеет возможность проводить анализ параметров, поступающих с датчиков автомобилей (данные о перемещении транспорта в реальном времени с помощью GPS/ГЛОНАСС, информацию о маршрутах, расписании, дорожных условиях, пробках, погоде и показателях эксплуатации автомобилей (пробег, часы работы, расход топлива, износ шин) для оптимизации логистики, обеспечения своевременной доставки и реагирования на чрезвычайные ситуации) на собственном терминале. Кроме того, такие сотрудники имеют возможность выбирать терминал необходимой производительности в зависимости от особенностей и сложности выполняемых задач.

2) Один или несколько компьютеров необходимо разместить в центре обработки данных АТП. В крупных автотранспортных предприятиях с разветвленной сетью по нескольким городам или даже субъектам Российской Федерации могут использоваться мощные серверы, требующие особых условий, например, вентиляции помещений или съемного пола [4]. В организациях меньшего масштаба центральным компьютером (или компьютерами) является высокопроизводительный сервер или средняя по возможностям машина, примером которой может служить компьютер с процессором 4–8 ядер, 16–32 Гб оперативной памяти, SSD-накопителя объемом от 1 ТБ для быстрой работы и хранения данных, а также сетевые интерфейсы для подключения к локальной сети и интернету. Он может выполнять роли файлового хранилища, веб-сервера, сервера баз данных или почтового сервера, обеспечивая централизованный доступ к данным и управлению ресурсами.

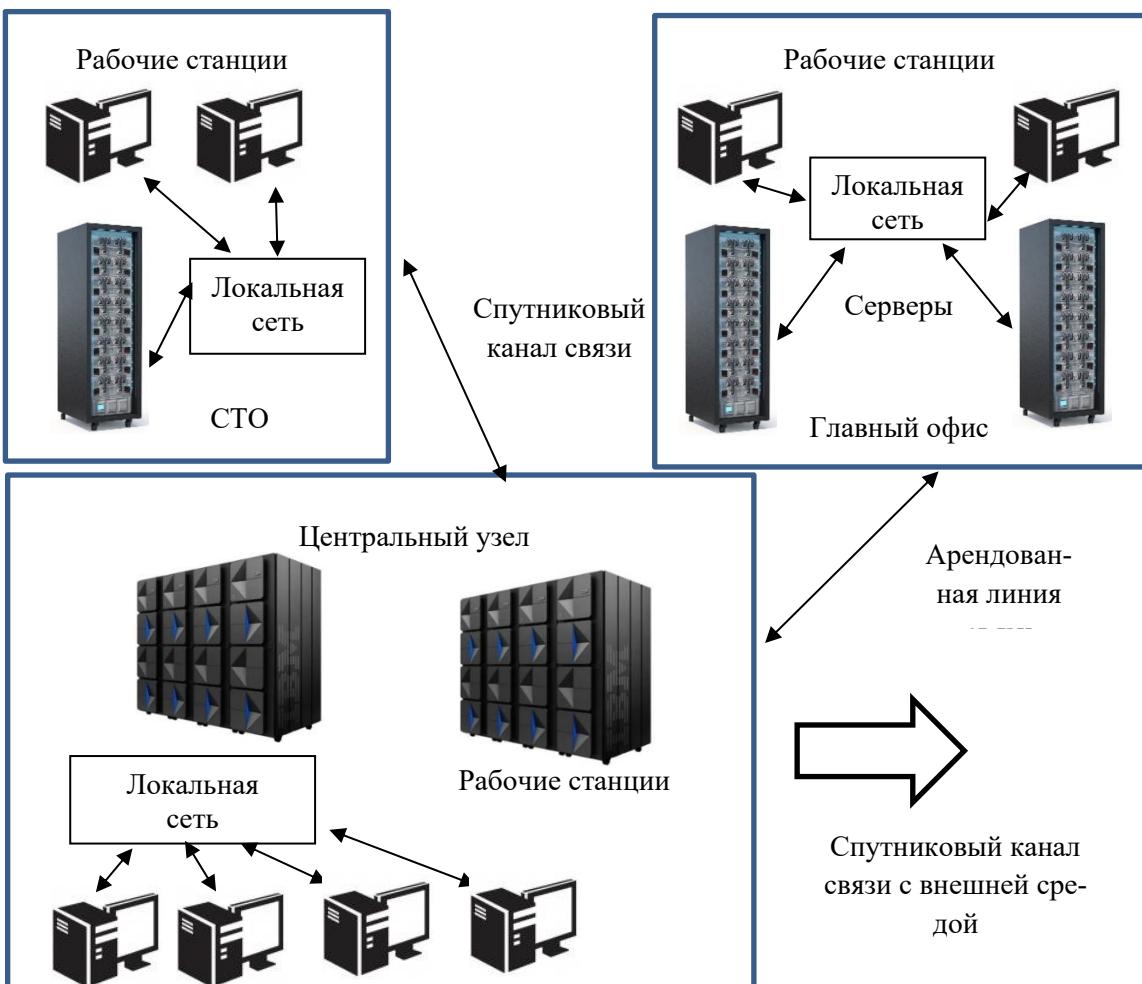


Рисунок 1 – Архитектура информационной системы сети станций технического обслуживания автотранспортной инфраструктуры

3) Все приложения устанавливаются на центральный вычислительный узел. Сюда входят приложения, которые по своей природе требуют централизации или служат всей организации, например, системы расчета заработка платы или приложения для пользователей данного отдела.

4) Все данные хранятся в файлах и базах данных центра обработки данных автотранспортного предприятия. Центральный компьютер (или компьютеры) имеет к ним доступ. Данные включают в себя информацию, требуемую различными отделениями АТП, такую как сведения по инвентаризации, а также информацию, служащую для поддержки работы одного отделения, например, отдел, занимающийся маркетингом, может поддерживать базу данных с информацией, полученной из опросов заказчиков [5].

5) Служба централизованной обработки данных включает в себя технический персонал, обслуживающий оборудование обработки данных и непосредственно работающий с этим оборудованием. Кроме того, программирование большей частью (а подчас и целиком) выполняется персоналом вычислительного центра. У такой централизованной организации имеется ряд достоинств. Можно экономить на покупке и обслуживании аппаратного и программного обеспечения. В центре обработки данных могут работать профессиональные программисты, решающие задачи для различных отделов. Руководство может управлять обработкой данных, вводить стандарты программирования, систематизировать структуру файлов с данными, продумать и реализовать политику безопасности [6]. В качестве примера централизованной обработки данных рассмотрим средства обработки данных сети станций технического обслуживания (СТО). Структура средств обработки данных показана на рис. 1.

6) Менеджер обработки данных или менеджер информационных систем несет ответственность за средства обработки данных. В зависимости от размера и важности вычислительных средств контроль осуществляется на среднем или на верхнем руководящем уровне. Довольно часто руководство центром обработки данных находится в руках одного из высших руководителей соответствующей автотранспортной инфраструктуры, в ряде очень крупных организаций имеется должность, аналогичная должности представителя по связи с прессой. Полномочия ответственного работника находятся на уровне совета директоров. В том случае, если управление обработкой данных сосредоточено на весьма высоком уровне, подчиненный руководителя несет ответственность за центр обработки данных, в то время как руководитель информационной службы или службы обработки данных имеет более широкие полномочия в вопросах, касающихся корпоративных данных, использования и защиты информации [7].

Как было отмечено выше передача информации в централизованной схеме может осуществляться как по кабельным, так и по беспроводным каналам связи [7]. В целом в проводных системах обеспечить помехоустойчивость от внешних воздействий проще, чем в беспроводных, поскольку проводные каналы связи позволяют использовать экранирование и фильтры для защиты сигналов от электромагнитных помех, тогда как беспроводные системы полагаются на открытое пространство, которое более подвержено внешнему влиянию. При этом в процессе формирования радиосигналов с угловой модуляцией в трактах формирования появляется паразитная фазовая модуляция (ПФМ), которая ухудшает качественные показатели радиосистем.

Представляется актуальным синтезировать алгоритм работы компенсаторов ПФМ с регулировкой по возмущению и регулируемыми усилителями или перемножителями сигналов в квадратурных ветвях, инвариантных к паразитным фазовым приращениям входного сигнала, т.е. компенсаторов, в которых происходит полная компенсация ПФМ и отсутствует преобразование ПФМ входного сигнала в паразитную амплитудную модуляцию выходного сигнала (ПАМ).

Определим искомые законы изменения амплитуд компенсационных сигналов $k_k(\phi_1)$ и $k_c(\phi_1)$, при которых осуществляется полная компенсация ПФМ входного сигнала и отсутствует ее преобразование в ПАМ выходного сигнала. Запишем:

$$u_k = kU_1 k_k(\phi_1) \cos(\omega_0 t + \phi_1), \quad (1)$$

$$u_c = kU_1 k_c(\phi_1) \sin(\omega_0 t + \phi_1), \quad (2)$$

В этом случае напряжение на выходе сумматора определяется формулой:

$$u_2 = U_2 \cos(\omega_0 t + \phi_2), \quad (3)$$

в которой

$$U_2 = kU_1 \sqrt{k_k^2(\phi_1) + k_c^2(\phi_1)}, \quad (4)$$

$$\phi_2 = \arctg \frac{k_k(\phi_1) \sin \phi_1 - k_c(\phi_1) \cos \phi_1}{k_k(\phi_1) \cos \phi_1 + k_c(\phi_1) \sin \phi_1}. \quad (5)$$

В общем случае совместное решение выражений (4) и (5) позволяет определить $k_k(\phi_1)$ и $k_c(\phi_1)$ при заданных U_2 и ϕ_2 .

Определим $k_k(\phi_1)$ и $k_c(\phi_1)$ при

$$\begin{cases} U_2 = \sqrt{2}kU_1, \\ \phi_2 = -\pi/4, \end{cases} \quad (6)$$

а также при

$$\begin{cases} U_2 = kU_1, \\ \varphi_2 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Очевидно, что условия (6) и (7) удовлетворяют требованию инвариантности компенсатора к паразитным фазовым приращениям входного сигнала, однако предполагают построение компенсаторов по разным схемам.

Подставив правые части выражений (6) в левые части уравнений (4) и (5), после преобразований получим:

$$2 = k_k^2(\phi_1) + k_c^2(\phi_1), \quad (8)$$

$$1 = -\frac{k_k(\phi_1) \sin \phi_1 - k_c(\phi_1) \cos \phi_1}{k_k(\phi_1) \cos \phi_1 + k_c(\phi_1) \sin \phi_1}. \quad (9)$$

Совместное решение (8) и (9) относительно $k_k(\phi_1)$ и $k_c(\phi_1)$ дает:

$$\begin{aligned} k_k(\phi_1) &= \cos \phi_1 - \sin \phi_1, \\ k_c(\phi_1) &= \cos \phi_1 + \sin \phi_1. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив правые части выражений (7) в левые части уравнений (4) и (5), после преобразований получим:

$$1 = k_k^2(\phi_1) + k_c^2(\phi_1), \quad (11)$$

$$0 = k_k(\phi_1) \sin \phi_1 - k_c(\phi_1) \cos \phi_1. \quad (12)$$

Совместное решение (11) и (12) относительно $k_k(\phi_1)$ и $k_c(\phi_1)$ дает:

$$\begin{aligned} k_k(\phi_1) &= \cos \phi_1, \\ k_c(\phi_1) &= \sin \phi_1. \end{aligned} \quad (13)$$

где U_1 – амплитуда входных данных с помехой, В; ϕ_1 – мгновенное значение отклонения фазы входного сигнала, В; U_Σ – амплитуда суммарного сигнала при ϕ_1 , В; ε – постоянный фазовый сдвиг, В; α – начальный между входным и компенсационным сигналами; Ψ – фаза сигнала, В.

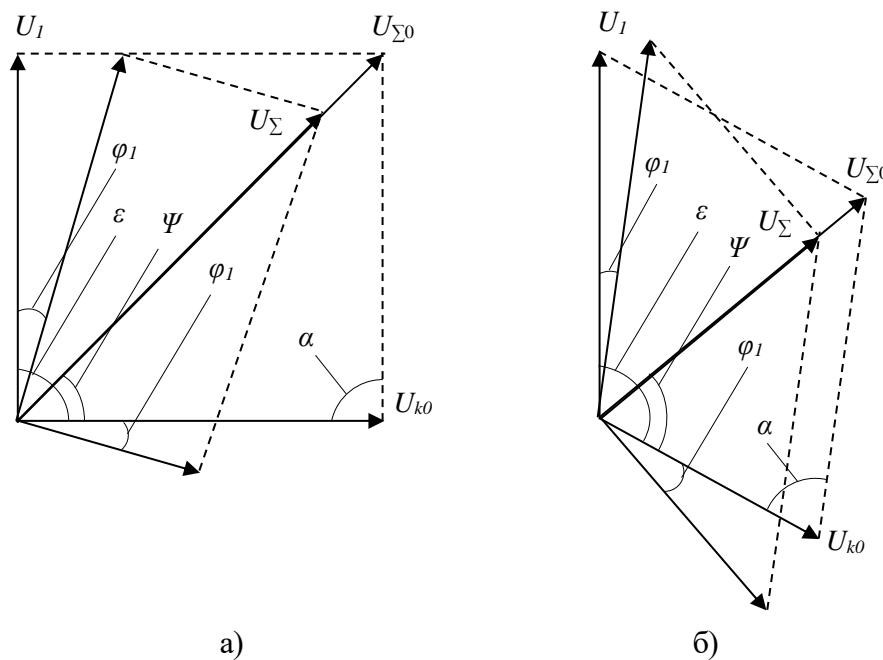
Таким образом, предложенный алгоритм инвариантен к паразитным приращениям фазы входного высокочастотного сигнала [7].

3 Результаты исследований

В соответствии со схемой, изображенной на рис. 1, работа главного офиса СТО, расположенного в отдалённом районе или даже городе, обеспечивается несколькими рабочими станциями и персональными компьютерами (ПК), связанными локальной сетью с различными серверами. Эти серверы поддерживают большинство файлов, используемых в повседневной работе и в работе головного офиса. Центр обработки данных может находиться в нескольких километрах от головного офиса и связан с ним арендованной цифровой линией с пропускной способностью от десятков Мбит/с до нескольких Гбит/с. Сердцем центра обработки данных являются два мощных сервера, один служит для обработки транзакций по заказу различных видов ремонтов и технического обслуживания от физических и юридических лиц, других АТП. Другой подобный по мощности

сервер выполняет деловые приложения, например, программы учета финансовых ресурсов, количество клиентов и рабочего персонала. Центр данных может быть связан при помощи спутниковых линий связи с каждой из СТО сети крупного автотранспортного предприятия [6].

Как показали исследования, в автотранспортных предприятиях в процессе приёма-передачи информации по беспроводным каналам связи, изменения в данных возникают вследствие частотных искажений, вызванных неидеальностью амплитудно-частотной характеристики системы обработки и передачи данных. Результатом работы предложенного алгоритма компенсации помех каналов централизованного мониторинга информации автотранспортного предприятия является то, что при ортогональном сложении сигналов с равными начальными амплитудами, когда $k = 1$ и $\varepsilon = \pi/2$ начальная фаза суммарного сигнала и $\varphi_{\Sigma} = \pi/4$. На рис. 2, а изображена векторная диаграмма, поясняющая принцип компенсации помех с искажением по фазе.



U_1 – амплитуда входных данных с помехой; φ_1 – мгновенное значение отклонения фазы входного сигнала; $U_{\Sigma 0}$, U_{k0} – соответственно амплитуды суммарного и компенсационного сигналов при $\varphi_1 = 0$; U_{Σ} – амплитуда суммарного сигнала при φ_1 ; ε – постоянный фазовый сдвиг, α – начальный между входным и компенсационным сигналами; Ψ – фаза сигнала

Рисунок 2 – Векторные диаграммы алгоритма компенсации помех каналов централизованного мониторинга информации автотранспортного предприятия

Из диаграммы видно, что при любых $\varphi_1(t) < \pi/4$ фаза выходного сигнала φ_{Σ} остается постоянной и равной $\pi/4$. В то же время автокомпенсация помех с искажением по фазе описываемым методом сопровождается возникновением дополнительных помех с амплитудной модуляцией, подавление которой требует в дальнейшем разработки соответствующего алгоритма компенсации (рис. 2, б).

В табл. 1 приведены результаты исследования, проведенного для определения дальности и скорости передачи данных от подвижных и стационарных объектов до центра обработки данных (рис. 1) автотранспортного предприятия по беспроводным каналам связи в различных условиях до и после компенсации помех.

Централизованная конфигурация отвечает множеству потребностей сети станций технического обслуживания или других структурных подразделений автотранспортной инфраструктуры. Система заказа автозапчастей, бронирования даты технического обслуживания может обрабатывать несколько десятков миллионов запросов в год. Это означает, что самая свежая информация о наличии тех или иных запчастей, агрегатов, необходимых сопутствующих материалов, масел,

комплектующих и т.д. во всех СТО собрана в одном месте. Такая система со своевременной информацией помогает обеспечить высокий процент занятых площадок, рабочих постов, персонала в сети станций технического обслуживания или других структурных подразделений крупного автотранспортного предприятия. Кроме того, централизованная система собирает и хранит сведения о качестве работы сотрудников, своевременности оплаты клиентами оказанных услуг и другие подробности о работе каждой СТО. Это позволяет руководителям высшего звена анализировать информацию в целях выработки рекомендаций по удовлетворению требований клиентов. Без центральной системы достаточно сложно было бы собрать и использовать множество разных типов данных, необходимых для анализа спроса.

Таблица 1 – Сравнительная таблица скорости и дальности передачи данных автотранспортной инфраструктуры с использованием технологии ЦОД с КП

Зона действия	Технология	Максимальное расстояние		Максимальная скорость	
		Нет КП	КП	Нет КП	КП
Городская застройка	4G LTE	1,7–4,5 км	2–5,1 км	до 250 кбит/с	до 300 кбит/с
Открытая местность	LoRaWAN	13–17 км	15–20 км	до 18 кбит/с	до 27 кбит/с
Промышленные помещения	Wi-Fi 6	430 м–1,4 км	500 м–2 км	3,5 Гбит/с	9,6 Гбит/с

4 Обсуждение и заключение

Таким образом, централизованная обработка данных в автотранспортной инфраструктуре несмотря на развитие распределенных систем сохраняет свою актуальность во многих вариантах организации автотранспортных предприятий, а дополнительная компенсация помех в беспроводных каналах связи повышает безопасность и целостность передаваемой информации. Однако, побочным эффектом подавления помех с фазовой составляющей является формирование амплитудных помех. Централизация позволяет легче контролировать доступ к данным, обеспечивать их целостность и безопасность. Это особенно важно для организаций, работающих с конфиденциальной информацией или соблюдающих строгие нормативные требования. Кроме того, централизованное управление вычислительными ресурсами позволяет более эффективно их использовать, избегая дублирования и обеспечивая оптимальную загрузку серверов, а значит, что в некоторых случаях особенно для малых и средних предприятий централизованная инфраструктура может быть более экономически выгодной, чем распределенное решение.

Список литературы

1 Современные системы и технологии на транспорте: проблемы и перспективы: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 24–25 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – 296 с. – ISBN 978-5-7994-1172-5. – DOI 10.58168/MSTT2025. – EDN PCMGFE.

2 Вопросы реализации междисциплинарных связей и актуализации информации преподаваемых дисциплин на примере мониторинга подвижных объектов автотранспортной инфраструктуры / Д. А. Жайворонок, В. А. Иванников, С. В. Дорохин [и др.] // Инновации и передовые технологии в развитии транспортных систем : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 15 января 2025 года. – Воронеж: Министерство науки и высшего образования РФ, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 10-14. – DOI 10.58168/IATDTS2025_10-14. – EDN PPGNKO.

3 Статистика и анализ ДТП с участием женщин-водителей / А. В. Шурупова, И. А. Кондратенко, Н. И. Злобина [и др.] // Современные системы и технологии на транспорте: проблемы и перспективы : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 24–25 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 152-155. – DOI 10.58168/MSTT2025_152-155. – EDN DRBEFP.

4 Features of radio communication organization in lugging areas / D. Zhaivoronok, A. Novikov, I. Terehina, F. Shakina // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 04020. – DOI 10.1051/bio-conf/202414504020. – EDN JHZYQC.

5 Посметьев, В. И. Актуальность промышленного получения высококачественной хвои на основе использования мобильных транспортных средств / В. И. Посметьев, Д. А. Жайворонок // Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе перспективных технологий и научно-технических решений: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 06–07 октября 2022 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – С. 15-19. – DOI 10.58168/PRTOW2022_15-19. – EDN RMZQRD.

6 Дорохин, С. В. Организации радиосвязи с удаленными подвижными наземными объектами / С. В. Дорохин, В. А. Иванников, Д. А. Жайворонок // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – Т. 12, № 4(47). – DOI 10.26102/2310-6018/2024.47.4.028. – EDN DHXOLK.

7 Иванников, В. А. Особенности транспортировки древесной зелени в природно-производственных условиях республики Саха (Якутия / В. А. Иванников, Д. А. Жайворонок, Ф. А. Шакина // Транспортные системы и дорожная инфраструктура Крайнего Севера : Сборник материалов IV Всероссийского форума, Якутск, 28–29 марта 2024 года. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2024. – С. 193-197. – EDN EUKOZO.

References

1 Modern systems and technologies in transport: problems and prospects : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of the VGLTU named after G.F. Morozov, Voronezh, April 24-25, 2025. Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2025. 296 p. ISBN 978-5-7994-1172-5. - DOI 10.58168/MSTT2025. – EDN PCMGFE.

2 Issues of implementation of interdisciplinary connections and updating information of taught disciplines on the example of monitoring mobile objects of motor transport infrastructure / D. A. Zhayvoronok, V. A. Ivannikov, S. V. Dorokhin [et al.] // Innovations and advanced technologies in the development of transport systems : Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Voronezh, January 15 In 2025. Voronezh: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2025. pp. 10-14. – DOI 10.58168/IATDTS2025_10-14. – EDN PPGNKO.

3 Statistics and analysis of accidents involving women drivers / A.V. Shurupova, I. A. Kondratenko, N. I. Zlobina [et al.] // Modern systems and technologies in transport: problems and prospects : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of the VGLTU named after G.F. Morozov, Voronezh, April 24-25, 2025. Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2025. pp. 152-155. – DOI 10.58168/MSTT2025_152-155. – EDN DRBEFP.

4 Features of radio communication organization in lugging areas / D. Zhaivoronok, A. Novikov, I. Terehina, F. Shakina // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 04020. – DOI 10.1051/bio-conf/202414504020. – EDN JHZYQC.

5 Posmetev, V. I. The relevance of industrial production of high-quality needles based on the use of mobile vehicles / V. I. Posmetev, D. A. Zhayvoronok // Problems of operation of motor transport and ways to solve them based on promising technologies and scientific and technical solutions : proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, October 06-07 In 2022. Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2022. pp. 15-19. - DOI 10.58168/PRTOW2022_15-19. – EDN RMZQRD.

6 Dorokhin, S. V. Organization of radio communication with remote mobile terrestrial objects / S. V. Dorokhin, V. A. Ivannikov, D. A. Zhayvoronok // Modeling, optimization and information technologies. – 2024. – Vol. 12, No. 4(47). – DOI 10.26102/2310-6018/2024.47.4.028 . – EDN DHXOLK.

7 Ivannikov V. A., Zhaivoronok D. A., Shakina F. A. Features of transportation of tree greens in the natural and industrial conditions of the Republic of Sakha (Yakutia) // Transport systems and road infrastructure of the Far North : Collection of materials of the IV All-Russian Forum, Yakutsk, March 28-29, 2024. Yakutsk: NEFU Publishing House, 2024, pp. 193-197, EDN EUKOZO.

© Иванников В. А., Шаталов Е. В., Зеликов В. А.,
Жайворонок Д. А., Бухтояров В. Н., 2025



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПЕШЕХОДНОГО ПОТОКА ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ПЕШЕХОДНОГО ПЕРЕХОДА

Кущенко Лилия Евгеньевна,
д.т.н., профессор кафедры эксплуатации и организации движения автотранспорта, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород.

Дорохин Сергей Владимирович,
д.т.н., профессор, декан автомобильного факультета, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

✉¹ Камбур Алина Сергеевна,
старший преподаватель кафедры защиты в чрезвычайных ситуациях, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород,
e-mail: bobeshko.alya@mail.ru

Аннотация. Представлена математическая модель управления движением регулируемого пешеходного перехода, базирующаяся на основе свода правил нечеткой логики для минимизации вероятности возникновения наезда на пешехода, а также повышения безопасности дорожного движения на пешеходных переходах и снижения задержки транспортных средств, находящихся в пути перед регулируемым пешеходным переходом. Приведена расчетная часть сигналов управления движением пешеходного потока на основании нечеткого вывода. Определены характеристики правил нечеткого вывода. Представлена визуализация поверхности нечеткого вывода управления движением пешеходного потока.

PEDESTRIAN FLOW MANAGEMENT MODEL FOR A CONTROLLED PEDESTRIAN CROSSING

Kushchenko Liliya Evgenievna,
doctor of technical sciences, professor department of operation and organization of motor transport, Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod.

Dorokhin Sergey Vladimirovich,
doctor of technical sciences, professor, dean of the automobile faculty, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

✉¹ Kambur Alina Sergeevna,
senior lecturer of the department of emergency protection, Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod,
e-mail: bobeshko.alya@mail.ru

Annotation. A mathematical model for pedestrian flow control at a controlled pedestrian crossing is presented. This model is based on a set of fuzzy logic rules to minimize the likelihood of pedestrian collisions, improve road safety at pedestrian crossings, and reduce delays for vehicles traveling in front of the controlled pedestrian crossing. The calculated portion of pedestrian flow control signals based on fuzzy inference is presented. The characteristics of fuzzy inference rules are determined. A visualization of the fuzzy inference surface for pedestrian flow control is presented.

Ключевые слова: ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЕ ПРОИСШЕСТВИЕ, ПЕШЕХОДНЫЙ ПЕРЕХОД, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ, НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННАЯ, СВЕТОФОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ.

Keywords: ROAD TRAFFIC ACCIDENT, PEDESTRIAN CROSSING, TRAFFIC CONTROL, FUZZY LOGIC, MATHEMATICAL MODEL, LINGUISTIC VARIABLE, TRAFFIC LIGHT CONTROL.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Повышение безопасности движения пешеходов обуславливается высокими показателями смертности вследствие возникновения дорожно-транспортного происшествия (ДТП) с вышеуказанными участниками движения.

Данный вопрос является приоритетным направлением государственной политики и важным фактором обеспечения устойчивого социально-экономического и демографического развития страны согласно прогнозу социально-экономического развития на период до 2030 года [1].

Тема «нулевой смертности» в результате ДТП соответствует установке Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. с последующим прогнозом до 2035 г.

Актуальность работы определяется необходимостью повышения безопасности дорожного движения (БДД) и эффективности функционирования участков улично-дорожной сети, в частности пешеходных переходов (ПП) на основе комплекса мероприятий, способствующих минимизации вероятности возникновения ДТП, а, следовательно, снижения смертности на дорогах. Анализ наездов на пешеходов, происходящих на нерегулируемых и регулируемых пешеходных переходах, свидетельствует о высоком уровне аварийности.

Установлено, что наезд на пешехода занимает 2-е место по причинам аварийности после столкновения транспортных средств. Далее идут нарушения требований светофорного регулирования, правил проезда кольцевого движения, несоблюдение дистанции.

Показатели аварийности с участием водителей с признаками алкогольного опьянения снизились практически на 20 % в сравнении с предыдущим годом, это связано с ужесточением наказания и штрафов. Число погибших в данных происшествиях уменьшилось более чем на 30 % (785 чел.), раненых в них — на 19,2 % (5567 чел.).

Отмечено, что успешно достигнуты целевые показатели снижения аварийности нацпроекта «Безопасные качественные дороги». По итогам 2024 года удалось достичь значения транспортного риска ниже, чем планового значения – 2,47 против 2,57. Социальный риск равен плановому значению – 10,2.

Снижение аварийности и смертности установлено в ряде регионов РФ, например, в Орловской, Белгородской, Воронежской, Липецкой областях, а также в республиках Калмыкии, Мордовии, Татарстане и Карачаево-Черкессии [2].

Количество погибших растет и зафиксировано в 25 субъектах РФ. Каждое произошедшее ДТП анализируется, изучается и устанавливаются его причины и условия в момент совершения ДТП. Определяются очаги аварийности с помощью которых в дальнейшем определяется внедрение того или иного мероприятия для предотвращения вероятности возникновения ДТП.

Количество наездов на пешеходов в 2020 – 2024 гг. сократилось на 8,5 %, но тем не менее число погибших пешеходов возросло практически на 2 %, раненых – на 3 % (рис. 1).

Проведенный анализ статистических данных свидетельствует о том, что необходимо регулярно уделять особое внимание безопасности движения пешеходов. Несмотря на снижение количества ДТП с участием пешеходов виден рост числа погибших в данных дорожных происшествиях, что еще раз подтверждает актуальность темы исследования и свидетельствует о необходимости разработки моделей, методик и мероприятий, направленных на повышение безопасности движения пешеходов.

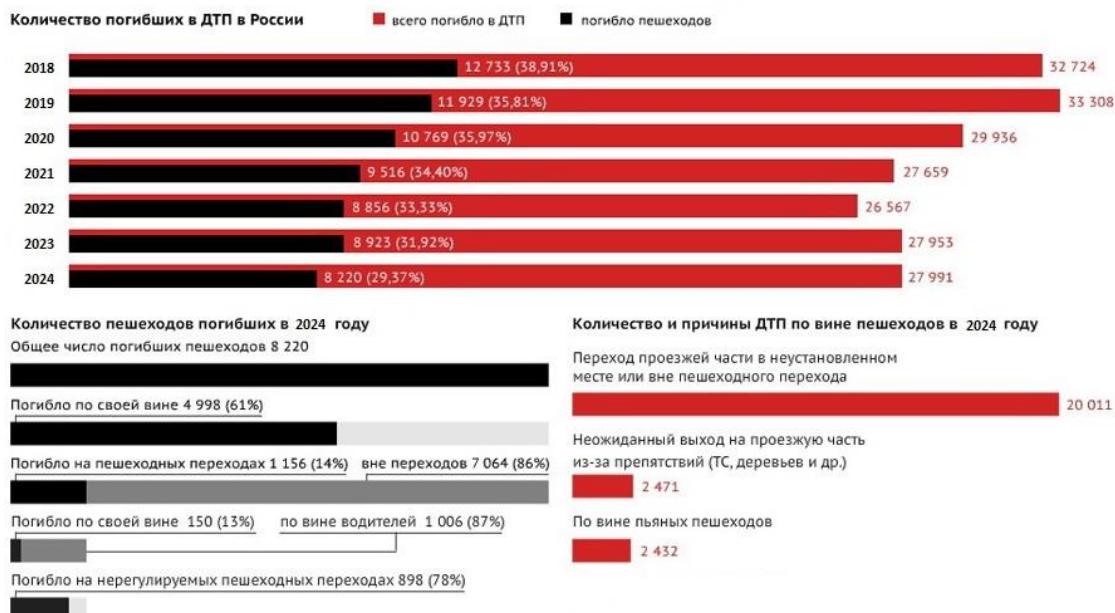


Рисунок 1 – Основные показатели аварийности из-за наездов на пешеходов за период 2018-2024 гг. в РФ

На территории Белгородской области происходят ДТП по различным причинам с различной степенью тяжести и последствий. Анализ проведен на основе официальных данных ГИБДД по Белгородской области за период 2020-2024 гг. На рис. 2 представлены основные показатели аварийности из-за наездов на пешеходов на территории Белгородской области за 2020-2024 гг., на рис. 3 – на территории Белгородской городской агломерации (БГА) [3-6].

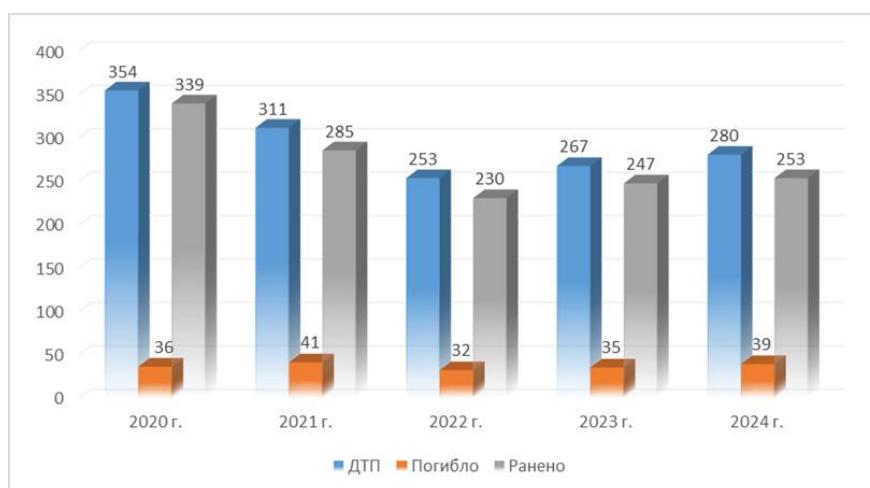


Рисунок 2 – Основные показатели аварийности из-за наездов на пешеходов за период 2020-2024 гг. в регионе



Рисунок 3 – Основные показатели аварийности из-за наездов на пешеходов за период 2020-2024 гг. в Белгородской городской агломерации

Развитие практико-ориентированных методик и методов повышения БДД таких участников дорожного движения как пешеходы, а также разработка математических моделей и теории нечеткой логики требует постановки и решения научной задачи [6, 8].

Целью работы является повышение безопасности движения пешеходов на регулируемых пешеходных переходах. Разработанная математическая модель применима как для Белгородской области, так и для других городов с численностью населения до 1 млн чел., что еще раз подтверждает актуальность исследования.

2 Материалы и методы

Нечеткая логика применяется в различных областях, где присутствуют неопределенность и неточность. Широко используется в медицинской диагностике для управления неопределенностью симптомов и повышения точности диагнозов. Системы помощи водителю, такие как антиблокировочные системы тормозов (ABS) и системы стабилизации автомобиля используют нечеткую логику для обработки неточной информации и обеспечения безопасного вождения, посредством тонкой реакции и оптимизации сцепления шин с дорогой.

Математическая теория нечетких множеств позволяет описывать нечеткие понятия и знания, а также оперировать этими знаниями и делать нечеткие выводы. Данная теория применима и в управлении дорожным движением для оптимизации транспортных потоков и уменьшения заторов в режиме реального времени, поскольку посредством нечеткой логики удается расширить границу приложения систем автоматизации за пределы применимости классической теории автоматического управления [7].

При разработке математической модели управления движением пешеходного потока для регулируемого ПП, базирующейся на основе свода правил нечеткой логики, позволяющей эффективно управлять транспортными и пешеходными потоками перед регулируемыми ПП, были определены лингвистические переменные, три из которых входные и одна – выходная [6, 9]:

α_1 – количество людей, собирающихся в пешеходной зоне для осуществления перехода через пешеходный переход;

α_2 – темп изменения количества людей, собирающихся на красный сигнал светофора для пешеходов, чел/с;

α_3 – ширина проезжей части дороги, м;

α_4 – время зеленого сигнала для пешеходного светофора, с.

Для каждой лингвистической переменной были определены термы и функции принадлежности (ФП). Для первой лингвистической переменной α_1 из статистических данных определен диапазон $\Delta \alpha_1 = [0; 36]$. Для описания переменной α_1 введено пять ФП, равномерно распределенных по всему диапазону изменения [6]:

- VS (*Very Small*) – «очень малое» [0; 0; 2; 9];
- S (*Small*) – «малое» [0; 9; 18];
- M (*Medium*) – «среднее» [9; 18; 27];
- B (*Big*) – «большое» [18; 27; 36];
- VB (*Very Big*) - «очень большое» [27; 34; 36; 36].

Для построения ФП для второй входной переменной α_2 проведен расчет количества пешеходов и изменения его темпа. Результаты измерений получены на основании анализа статистических данных [6, 10]. Темп изменения количества пешеходов определяется следующим образом:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_{\text{конеч}} - n_{\text{нач}}}{\Delta t}, \quad (1)$$

где $n_{\text{конеч}}$ – количество пешеходов в конечный момент времени, $n_{\text{нач}}$ – количество пешеходов в предыдущий момент времени, $\Delta t = 1$ мин – период измерения количества пешеходов.

Область значений лингвистической переменной $\Delta \alpha_2$ (темпер изменение количества людей, собирающихся на красный сигнал светофора для пешеходов) разделена на пять диапазонов. Каждому из них присвоена качественная характеристика (терма) (рис. 4) [6, 11]:

- NB (*Negative Big*) – «отрицательное большое» [-20; -20; -16; -8];
- NS (*Negative Small*) – «отрицательное малое» [-16; -8; 0];
- Z (*Zero*) – «нулевое» [-8; 0; 8];
- PS (*Positive Small*) – «положительное малое» [0; 8; 16];
- PB (*Positive Big*) – «положительное большое» [8; 16; 20; 20].

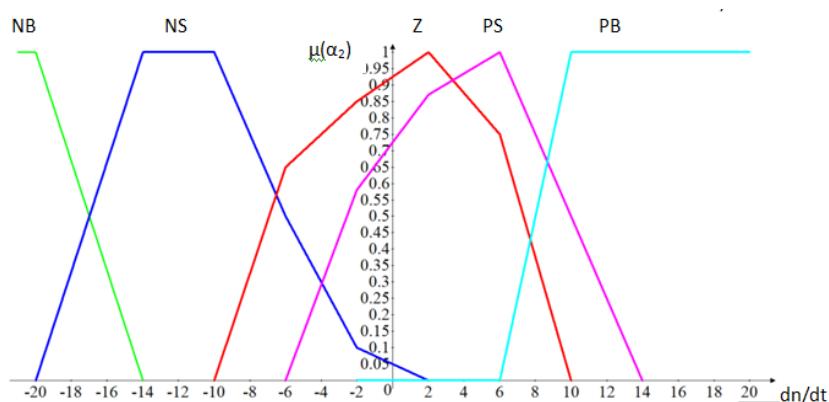


Рисунок 4 – ФП лингвистической переменной α_2

Для характеристики переменной $\Delta \alpha_3$ (ширина проезжей части дороги, и одна выходная лингвистическая переменная) диапазон изменения показателя составляет от 7 до 30. С учетом этого область значений лингвистической переменной α_3 лежит в интервале [7; 30]. Для описания лингвистической переменной α_3 введены пять ФП, распределенных по всему диапазону значений переменной [6, 12-14]:

- VS (*Very Small*) – «очень малое» [7; 7; 8; 12,75];
- S (*Small*) – «малое» [7; 12,75; 18,5];
- M (*Medium*) – «среднее» [12,75; 18,5; 24,25];
- B (*Big*) – «большое» [18,5; 24,25; 30];
- VB (*Very Big*) «очень большое» [24,25; 29; 30; 30].

Исходя из условий формирования управляющих сигналов светофорного объекта на основании статистических данных, принят диапазон значений выходной лингвистической переменной $\Delta\alpha_4$ (время зеленого сигнала светофорного регулирования для пешеходов), составляющий от 16 до 44 секунд. Для описания переменной α_4 введены 5 ФП, равномерно распределенных по всему диапазону изменения [6]:

- VS (*Very Small*) – «очень малое» [16; 16; 17; 23];
- S (*Small*) – «малое» [16; 23; 30];
- M (*Medium*) – «среднее» [23; 30; 37];
- B (*Big*) – «большое» [30; 37; 44];
- VB (*Very Big*) – «очень большое» [37; 43; 44; 44].

Полученные ФП для входных и выходной лингвистических переменных представлены на рис. 5.

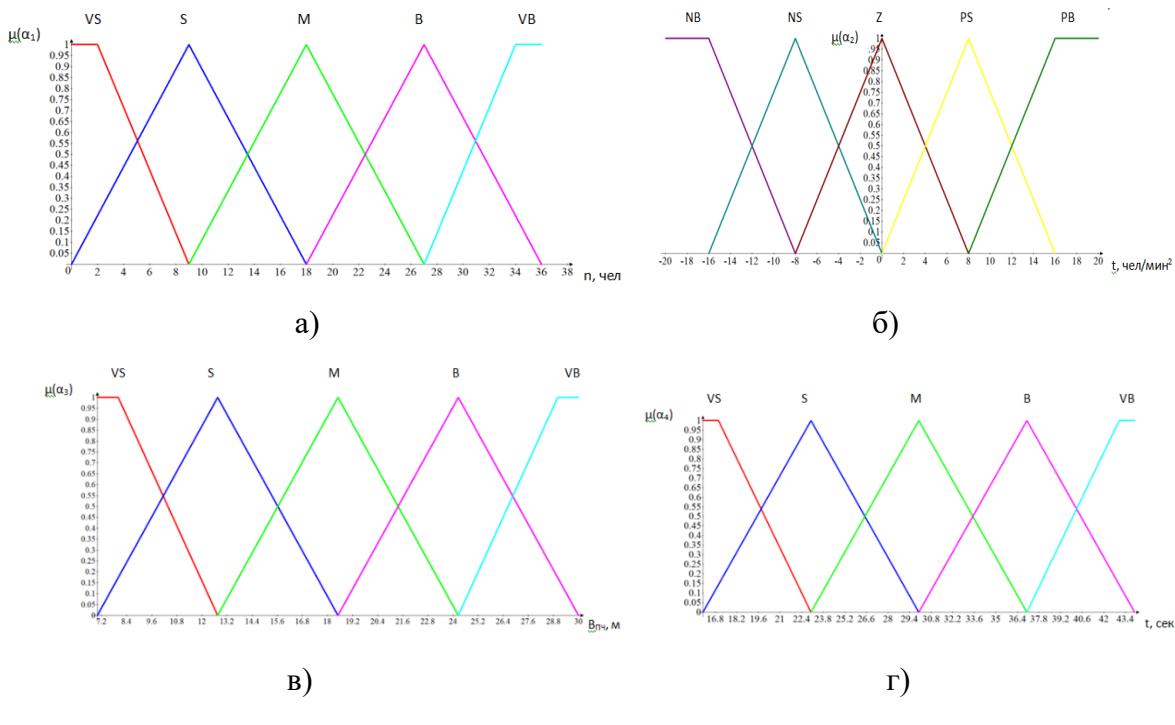


Рисунок 5 – ФП для лингвистических переменных

3 Результаты исследований

В результате исследования для выработки управляющих сигналов светофорного регулирования составлены 80 правил нечеткой продукции на основе статистических данных, полученных в результате измерений и табличных значений о ширине проезжей части (ГОСТ-Р 52399-2022 «Автомобильные дороги общего пользования. Геометрические элементы. Геометрические требования», «СП 42.13330.2016. Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*» [15-17]).

Для наглядного примера приведены пять характерных правил нечеткого вывода:

1. ЕСЛИ $\alpha_1 = \text{VS}$ И $\alpha_2 = \text{Z}$ И $\alpha_3 = \text{PS}$, ТО $\alpha_4 = \text{S}$;
2. ЕСЛИ $\alpha_1 = \text{PS}$ И $\alpha_2 = \text{NB}$ И $\alpha_3 = \text{PM}$, ТО $\alpha_4 = \text{S}$;
3. ЕСЛИ $\alpha_1 = \text{PB}$ И $\alpha_2 = \text{NB}$ И $\alpha_3 = \text{B}$, ТО $\alpha_4 = \text{M}$;
4. ЕСЛИ $\alpha_1 = \text{VB}$ И $\alpha_2 = \text{PM}$ И $\alpha_3 = \text{B}$, ТО $\alpha_4 = \text{B}$;
5. ЕСЛИ $\alpha_1 = \text{VB}$ И $\alpha_2 = \text{PB}$ И $\alpha_3 = \text{PB}$, ТО $\alpha_4 = \text{NB}$ [6].

Разработанная модель управления движением пешеходного потока базируется на алгоритме Мамдани. Для реализации системы нечеткого вывода применялся пакет *Fuzzy Logic Toolbox* программной среды *Matlab* [18].

Пример расчета полученного сигнала управления длительностью светофорного цикла на основании нечеткого вывода выглядит следующим образом: $\alpha_1 = 27$ – количество пешеходов; $\alpha_2 = 16$ – темп изменения количества пешеходов, скапливающихся на запрещающий сигнал, свидетельствует о различном характере; $\alpha_3 = 22,5$ – ширина проезжей части дороги. В результате процесса нечеткого вывода получено значение $\alpha_4 = 37$ – время разрешающего сигнала светофорного регулирования для пешеходного светофора [6, 19].

Визуализация поверхности нечеткого вывода управления движением пешеходного потока показана на рис. 6.

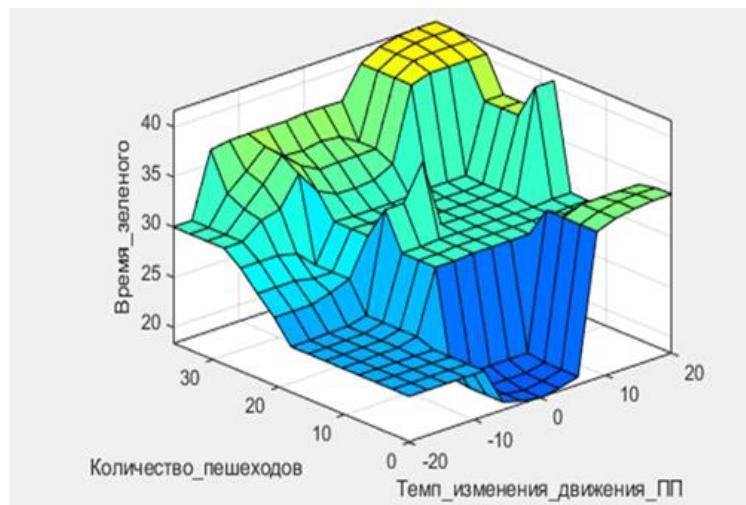


Рисунок 6 – Визуализация поверхности нечеткого вывода для разработанной модели управления светофором для пешеходного потока

Представленная на рис. 6 поверхность нечеткого вывода позволяет установить зависимость значения выходной переменной α_4 от значений входных переменных α_1 , α_2 и α_3 нечеткой модели управления движением пешеходного потока. На основании полученной зависимости имеется возможность программировать контроллер, а также реализовывать соответствующий нечеткий алгоритм управления светофорным объектом для пешеходного потока [6, 20-22].

В ходе апробации данной модели установлено, что задержки транспортных средств в пути снизятся на 20,6 % и абсолютное значение количества снизится на 33,3 % [6].

Данные представлены на рис. 7.

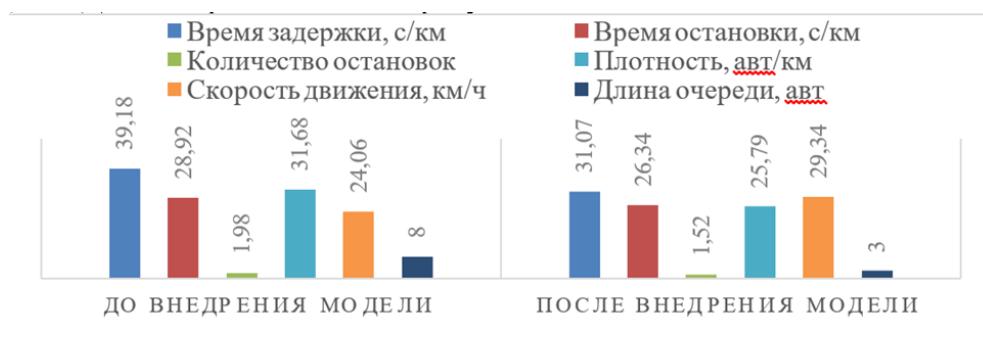


Рисунок 7 – Графическое изображение изменения характеристик транспортного потока до и после внедрения модели

Таким образом, использование математической модели управления движением пешеходного потока по регулируемому пешеходному переходу, базирующуюся на основе свода правил нечеткой логики позволяет повысить эффективность управления движением на регулируемом ПП, что положительно влияет на уровень БДД за счет снижения количества ДТП с участием пешеходов. Кроме того, обеспечивается уменьшение экономических расходов и потерь за счет экономии топлива от снижения задержек транспортных средств и пассажиров в пути.

4 Обсуждение и заключение

Результаты работ обсуждались на Международных научно-практических конференциях и форумах таких как: «Информационные технологии и инновации на транспорте» (Орёл, 2020-2025 гг.), «Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок и безопасности движения» (Саратов, 2020-2022 гг.); MATEC Web of Conferences The VII International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Management of Transport Systems», (ITMTS 2021); «Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте» (Вологда, 2021 г.); «Современные автомобильные материалы и технологии» (Курск, 2021- 2023 гг.); «Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте» (Липецк, 2022 г.); «Актуальные проблемы развития транспортно-промышленного комплекса: инфраструктурный, управляемый и образовательный аспекты» (Донецк, 2022 г.); «Транспортные и транспортно- технологические системы» (Тюмень, 2022-2024 гг.); «Молодежь и транспорт. Настоящее и будущее» (Орёл, 2023 г., 2024 г.); «Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования» (Орёл, 2024 г.); «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах» (Санкт-Петербург 2024 г.), а также опубликованы в изданиях, включенных в зарубежные аналитические базы данных Web of Science и Scopus.

Заключение

1. Разработана математическая модель управления движением пешеходного потока по регулируемому пешеходному переходу, базирующаяся на нечеткой логике и позволяющая управлять длительностью разрешающего сигнала светофорного регулирования как для пешеходных, так и транспортных потоков.

2. Приняты три входных лингвистических переменных: «количество людей, собирающихся в пешеходной зоне для осуществления перехода через пешеходный переход», диапазон которой находится в пределах $\Delta\alpha_1 = [0; 36]$; «темпер изменение количества людей, собирающихся на красный сигнал светофора для пешеходов» – $\Delta\alpha_2 = [-20;20]$; «ширина проезжей части дороги» – $\Delta\alpha_3 = [7; 30]$, а также одна выходная лингвистическая переменная «время зеленого сигнала для пешеходного светофора» с диапазоном $\Delta\alpha_4 = [16; 44]$.

3. Результат расчета одного из сигналов управления движением пешеходного потока на основании нечеткого вывода выглядит следующим образом: $\alpha_1 = 27$ – количество людей, собирающихся в пешеходной зоне для осуществления перехода через ПП, чел; $\alpha_2 = 16$ – темп изменения количества людей, собирающихся на красный сигнал светофора для пешеходов; $\alpha_3 = 22,5$ – ширина проезжей части дороги, м. В результате процесса нечеткого вывода получили, что $\alpha_4 = 37$ – время зеленого сигнала для пешеходного светофора, с.

4. В ходе апробации данной модели установлено, что задержки нахождения транспортных средств в пути снизятся на 20,6 % и абсолютное значение количества ДТП снизится на 33,3 %.

Список литературы

- 1 Васильев А.П. Эксплуатация автомобильных дорог. В 2 т.: учебник для студ. высших учеб. заведений / А.П. Васильев. - М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 320 с.
- 2 Власов В.М. Интеллектуальные транспортные системы в автомобильно-дорожном комплексе / В.М. Власов, В.М. Приходько, С.В. Жанказиев, А.М. Иванов. М.: МАДИ. – М.: ООО «МЭЙЛЕР», 2011. – 487 с.
- 3 Гай Л.Е. Заторовые явления. Возможности предупреждения] / Л.Е. Гай, А.И. Шутов, П.А., Воля, С.В. Кущенко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. –2013. – №3. – С.166-168.

4 Жанказиев С.В. Разработка проектов интеллектуальных транспортных систем: учеб. пособие / С.В. Жанказиев. – М.: МАДИ, 2016. – 22 с.

5 Кущенко Л.Е. Камбур А.С., Пехов А.А. Совершенствование организации дорожного движения посредством применения интеллектуальных транспортных систем // Мир транспорта и технологических машин. Орел 2021. – № 3(74). – С. 83-91.

6 Камбур А.С. Повышение безопасности дорожного движения на пешеходных переходах в городских агломерациях: диссерт. на соискание учен. степени кандидата технич. наук/А.С. Камбур. Орел: 2025; – 12 – 118 с.

7 Kambur A., Kushchenko L., Novikov I. Improving traffic management through the use of intelligent transport systems // The VII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Management of Transport Systems" (ITMTS 2021), MATEC Web Conf. Volume 341, 2021.

8 Зырянов В.В., Кочерга В.Г., Поздняков М.Н. (2011) Современные подходы к разработке комплексных схем организации дорожного движения // Транспорт Российской Федерации. СПб. – № 1. – 2011. – С. 28-33

9 Новиков И.А., Кущенко Л.Е., Новописный Е.А., Камбур А.С. Использование интеллектуальных транспортных систем для повышения качества организации дорожного движения // Мир транспорта и технологических машин. – 2022. – № 3-4 (78). – С. 42-49.

10 Новиков А.Н., Кущенко Л.Е., Новописный Е.А., Камбур А.С. Статистический анализ вероятности возникновения дорожно-транспортных происшествий на основе данных интеллектуальных транспортных систем Белгородской агломерации // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 5 (94). – С. 116-122.

11 Жанказиев С.В. Интеллектуальные транспортные системы: учеб. пособие / С.В. Жанказиев. – М.: МАДИ, 2016. – 14 с.

12 Жанказиев С.В. Имитационное моделирование в объектах ИТС: учеб. пособие / С.В. Жанказиев. – М.: МАДИ, 2016. – 40 с.

13 Кущенко Л.Е., Кущенко С.В., Камбур А.С., Улинец И.А. Разработка методики определения рационального выбора длительности разрешающего сигнала светофорного регулирования на основании нейронной сети // Мир транспорта и технологических машин. 2023. – № 4-1 (83). – С. 99-107.

14 Кущенко Л.Е., Камбур А.С., Кущенко С.В. Повышение безопасности дорожного движения на нерегулируемых пешеходных переходах // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 3-1(86). – С. 75-83.

15 Daniel T., Lepers B. Automatic incident detection: a key tool for intelligent traffic management. "Traffic technology international". Annual Review. 1996, p.p. 158-162.

16 Jaffe R.S. The US National ITS Architecture. Part 2 Application. "Traffic technology international". Aug/Sept, 1996, p.p. 71-75.

17 Larson R., Korsak A. A dynamic programming successive technique with convergence proofs. Automatica, vol. 6, 1970, p.p. 245-260.

18 Kulmala R., Noukka M. Raiting the objectives. Finland's ITS strategy to 2010. "Traffic technology international". Feb/Mar., 1998, p.p. 62-66.

19 Nuttal I. Hunting out the budgets. An informal look at who's spending what ITS. "Traffic technology international". April/May, 1998, p.p. 21-22.

20 Nuttal I. Will the tigers roar ITS market potential in ASEAN region. Traffic Technology International. Dec. / Jan. 1998, p.p. 60-64.

21 L. Kushchenko, S. Kushchenko, A. Kambur, A. Novikov. The analyzing of personal and public transport traffic flows in Belgorod agglomeration / L. Kushchenko, S. Kushchenko, A. Kambur, A. Novikov // Journal of Applied Engineering Science 2022, vol. 20 (3), pp. 700-706.

22 L. Kushchenko, S. Kushchenko, A. Novikov, A. Kambur. The use of information technology "Auto-Intellect" to improve the quality of traffic management // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2021.

References

1 Vasiliev A.P. Operation of highways. In 2 volumes: textbook for students of higher educational institutions / A.P. Vasiliev. - M.: Publishing center "Academy", 2010. - 320 p.

2 Vlasov V.M. Intelligent transport systems in the automobile and road complex / V.M. Vlasov, V.M. Prikhodko, S.V. Zhankaziev, A.M. Ivanov. Moscow: MADI. - M.: OOO "MAILER", 2011. - 487 p.

3 Gai L.E. Traffic jams. Prevention possibilities] / L.E. Gai, A.I. Shutov, P.A., Volya, S.V. Kushchenko // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. -2013. – No. 3. – P. 166-168.

- 4 Zhankaziev S.V. Development of intelligent transport systems projects: textbook / S.V. Zhankaziev. – M.: MADI, 2016. – 22 p.
- 5 Kushchenko L.E. Kambur A.S., Pekhov A.A. Improving traffic organization through the use of intelligent transport systems // The World of Transport and Technological Machines. Orel 2021. – No. 3 (74). – P. 83-91.
- 6 Kambur A.S. Improving road safety at pedestrian crossings in urban agglomerations: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / A.S. Kambur. Orel: 2025; – 12 – 118 p.
- 7 Kambur A., Kushchenko L., Novikov I. Improving traffic management through the use of intelligent transport systems // The VII International Scientific and Practical Conference “Information Technologies and Management of Transport Systems” (ITMTS 2021), MATEC Web Conf. Volume 341, 2021.
- 8 Zyryanov V.V., Kocherga V.G., Pozdnyakov M.N. (2011) Modern approaches to the development of integrated traffic management schemes // Transport of the Russian Federation. St. Petersburg. - No. 1. - 2011. - P. 28-33
- 9 Novikov I.A., Kushchenko L.E., Novopisny E.A., Kambur A.S. Using intelligent transport systems to improve the quality of traffic management // World of Transport and Technological Machines. – 2022. – No. 3-4 (78). – P. 42-49.
- 10 Novikov A.N., Kushchenko L.E., Novopisny E.A., Kambur A.S. Statistical analysis of the probability of road accidents based on the data of intelligent transport systems of the Belgorod agglomeration // Bulletin of civil engineers. – 2022. – No. 5 (94). – P. 116-122.
- 11 Zhankaziev S.V. Intelligent transport systems: textbook / S.V. Zhankaziev. – Moscow: MADI, 2016. – 14 p.
- 12 Zhankaziev S.V. Simulation modeling in ITS objects: textbook / S.V. Zhankaziev. – M.: MADI, 2016. – 40 p.
- 13 Kushchenko L.E., Kushchenko S.V., Kambur A.S., Ulinets I.A. Development of a methodology for determining a rational choice of the duration of the permissive signal of traffic light regulation based on a neural network // World of Transport and Technological Machines. 2023. – No. 4-1 (83). – P. 99-107.
- 14 Kushchenko L.E., Kambur A.S., Kushchenko S.V. Improving road safety at unregulated pedestrian crossings // World of Transport and Technological Machines. – 2024. – No. 3-1 (86). – P. 75-83.
- 15 Daniel T., Lepers B. Automatic incident detection: a key tool for intelligent traffic management. "Traffic technology international". Annual Review. 1996, p.p. 158-162.
- 16 Jaffe R.S. The US National ITS Architecture. Part 2 Application. "Traffic technology international". Aug/Sept, 1996, p.p. 71-75.
- 17 Larson R., Korsak A. A dynamic programming successive technique with convergence proofs. Automatica, vol. 6, 1970, p.p. 245-260.
- 18 Kulmala R., Noukka M. Rating the objectives. Finland's ITS strategy to 2010. "Traffic technology international". Feb/Mar., 1998, p.p. 62-66.
- 19 Nuttal I. Hunting out the budgets. An informal look at who's spending what ITS. "Traffic technology international". April/May, 1998, pp. 21-22.
- 20 Nuttal I. Will the tigers roar ITS market potential in ASEAN region. Traffic Technology International. Dec. / Jan. 1998, pp. 60-64.
- 21 L. Kushchenko, S. Kushchenko, A. Kambur, A. Novikov. The analyzing of personal and public transport traffic flows in Belgorod agglomeration / L. Kushchenko, S. Kushchenko, A. Kambur, A. Novikov // Journal of Applied Engineering Science 2022, vol. 20 (3), pp. 700-706.
- 22 L. Kushchenko, S. Kushchenko, A. Novikov, A. Kambur. The use of information technology "Auto-Intellect" to improve the quality of traffic management // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2021.

© Кущенко Л. Е., Дорохин С. В., Камбур А. С., 2025



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ ЗОНЫ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

✉¹ Снятков Евгений Вячеславович, к.т.н., доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: snyatkov@list.ru

Хлистун Владислав Романович, магистр кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Кириченко Игорь Анатольевич, магистр кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Аннотация. Анализ динамики рынка электромобилей показал, что средний годовой темп роста количества зарегистрированных в России машин с 2015 по 2025 год составил 160 %. В этих условиях наиболее остро стоит проблема недостатка зарядных станций, а также их оптимального расположения. Решение данной проблемы заключается в повышении эффективности имеющейся зарядной инфраструктуры, а также планировании новых зарядных станций с учетом особенностей их расположения. Оптимизацию параметров зарядной инфраструктуры предлагается выполнить на основе теории массового обслуживания.

Ключевые слова: ЗАРЯДНАЯ СТАНЦИЯ, ИНФРАСТРУКТУРА, ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ, КОМПОНОВКА, АВТОМОБИЛЕ-МЕСТО, ЗОНА ДЛЯ ЗАРЯДКИ.

ON THE QUESTION OF JUSTIFICATION OF A LAYOUT FOR AN ELECTRIC VEHICLE CHARGING ZONE

✉¹ Snyatkov Evgeniy Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of production, repair and operation of machines, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: snyatkov@list.ru

Hlistun Vladislav Romanovich, master of the department of production, repair and operation of machines, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Kirichenko Igor Anatolievich, master of the department of production, repair and operation of machines, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Annotation. An analysis of the dynamics of the electric vehicle market showed that the average annual growth rate of the number of cars registered in Russia from 2015 to 2025 was 160%. In these conditions, the problem of the lack of charging stations, as well as their optimal location, is most acute. The solution to this problem is to increase the efficiency of the existing charging infrastructure, as well as planning new charging stations, taking into account the specifics of their location. It is proposed to optimize the parameters of the charging infrastructure based on the theory of queuing.

Keywords: CHARGING STATION, INFRASTRUCTURE, ELECTRIC VEHICLE, LAYOUT, CAR-SEAT, CHARGING AREA.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Целью статьи является исследование проблемы недостатка зарядных станций для электромобилей и их расположения, а также концепции её решения за счет разработки новых компоновок размещения зарядных станций, которые позволят увеличить их число на единицу площади и обеспечить владельцев электромобилей доступной инфраструктурой. В статье понятие «зарядная станция» рассматривается как элемент транспортной инфраструктуры, предоставляющий электроэнергию для зарядки аккумуляторного и гибридного электротранспорта [1].

За 2024 год в России было реализовано 17805 новых электромобилей. Это на 26,4 % больше, чем за 2023 год. Как отметили эксперты, это самый высокий показатель в истории нашей страны. Ключевым фактором роста популярности автомобилей с электромотором послужили идеи, заложенные в «Концепции развития производства и использования электротранспорта в России до 2030 года», принятой правительством РФ в 2021 году [2].

Согласно проекту, к концу текущего года на дорогах страны окажутся 25 тыс. новых электромобилей, для которых откроют еще 9,4 тыс. зарядных станций. По плану это должно привести к тому, что к 2030 году доля такого рода транспорта в России составит 10 % [2-5].

Проект правительства предполагает три основных этапа: запуск рынка, который сейчас находится на старте развития; увеличение числа электромобилей в автосалонах и поддержку их производства.

2 Материалы и методы

Основные исследования в выбранной области можно провести методом сравнительного анализа сравнением изменения количества электромобилей и числа зарядных станций. Оптимизацию структуры размещения зарядных станций и компоновочные решения предлагаются исследовать графоаналитическим методом.

На текущий момент общее число электромобилей на территории РФ составляет 59,6 тыс. (рис. 1). Если рынок электромобилей и их общее число в России уверенно растет из года в год, то количество зарядных станций по состоянию на 2025 год находится на отметке 8000 единиц (рис. 2), быстрых из которых всего лишь 2555.

Из диаграмм (рис. 1, 2) видно, что в обоих случаях наблюдается стремительный рост количества электромобилей и зарядных станций, однако показатель того, сколько электромобилей приходится на 1 зарядную станцию (рис. 3) более наглядно отразит ситуацию с зарядной инфраструктурой в России.

Диаграмма количества электромобилей, приходящихся на 1 зарядную станцию (рис. 3), демонстрирует, что в совокупности пропорционального роста нет. За последние 3 года, относительно всего взятого периода с 2016 по 2025 год, этот показатель находится на самом низком уровне, что только доказывает наличие дефицита зарядной инфраструктуры. Дефицит проявляется также еще из-за того, что сама инфраструктура хаотична, расположена в неудобных или неподходящих местах. Все это является следствием того, что не учтена специфика зарядной инфраструктуры. Диаграмма (рис. 3) наглядно показывает, что на 2025 год на 1 зарядную станцию приходится около 7,45 электромобилей. Такой показатель, на первый взгляд, вызывает удивление, ведь такое количество электромобилей легко может зарядиться за сутки, однако зарядка электромобиля – процесс длительный, и, как правило, имеющий свой ритм. Учитывая разрозненность инфраструктуры, зарядка электромобиля может вызывать определенные трудности [1, 6-9].

Проблема заключается также в том, что большинство зарядных станций при отдаче всей своей мощности могут принять на себя только один электромобиль, а зоны зарядки зачастую не очень удобны в использовании. Решением может послужить размещение нескольких зарядных станций на одной локации и оптимизация компоновки зон зарядки с учетом особенностей локации [10].

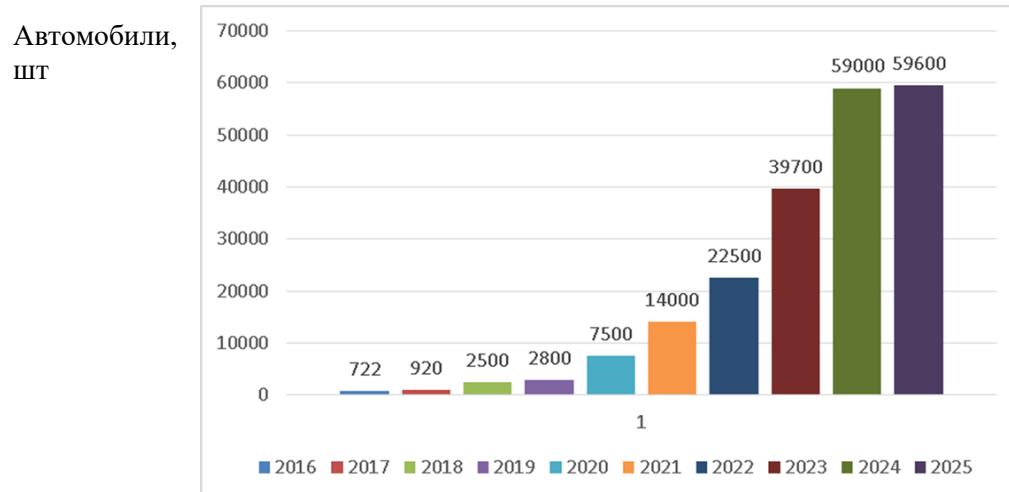


Рисунок 1 – Рост количества электромобилей в России в период с 2016 по 2025 год

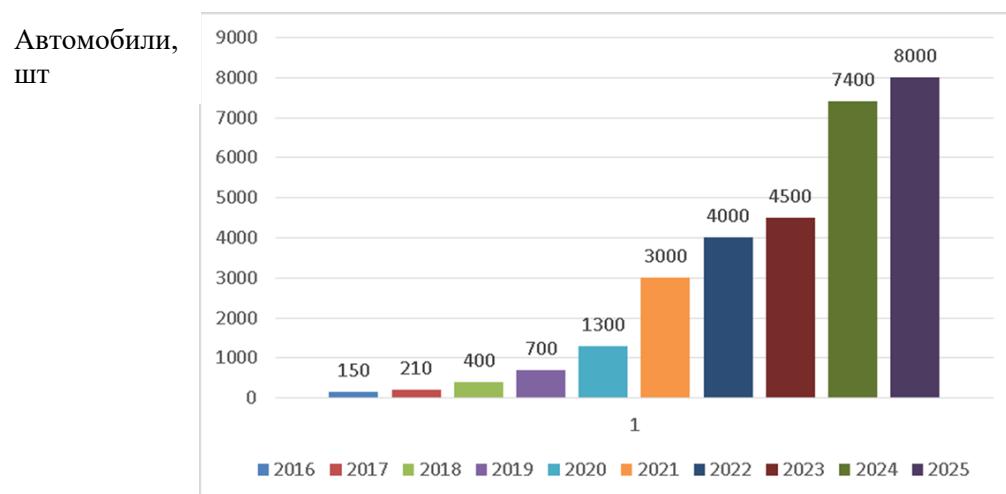


Рисунок 2 – Рост количества зарядных станций в России в период с 2016 по 2025 год

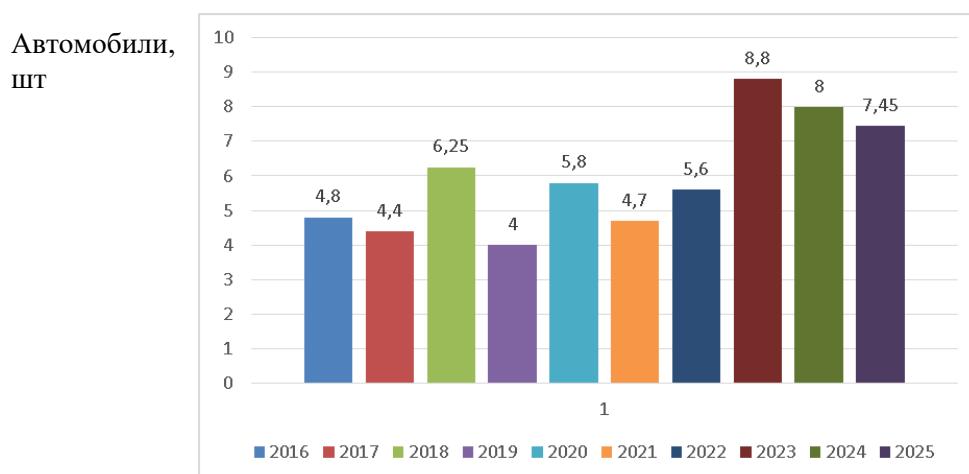


Рисунок 3 – Количество электромобилей, приходящихся на 1 зарядную станцию, в России в период с 2016 по 2025 год

3 Результаты исследований

К основным требованиям, которые стоит учесть при разработке новых планировочных решений зон для зарядки, относятся:

– расположение станций без нарушения функционирования существующей инфраструктуры [11];

– обеспечение удобства для клиентов путем оптимального расположения зон для зарядки.

На территории станции помимо зон для зарядки важно предусмотреть наличие открытой парковочной зоны для клиентов, ожидающих зарядку [12-15].

Так как зарядка аккумулятора электромобиля от 0 до 80 % длится в среднем 1,5 часа, более рациональным будет располагать станции в местах, где клиент сможет сместить вектор внимания с зарядки своего электромобиля в сторону таких мест, как:

– различные зоны отдыха (парковые, лесопарковые массивы, рекреационные зоны рек и озер, включающие в себя объекты инфраструктуры туризма и отдыха);

– предприятия общественного питания (кафе, рестораны и т.д.);

– места временного проживания, предоставляющие услуги размещения (гостиницы, отели и т.д.);

– гипермаркеты и торговые центры;

– театры, кинотеатры, дворцы культуры и концертные залы.

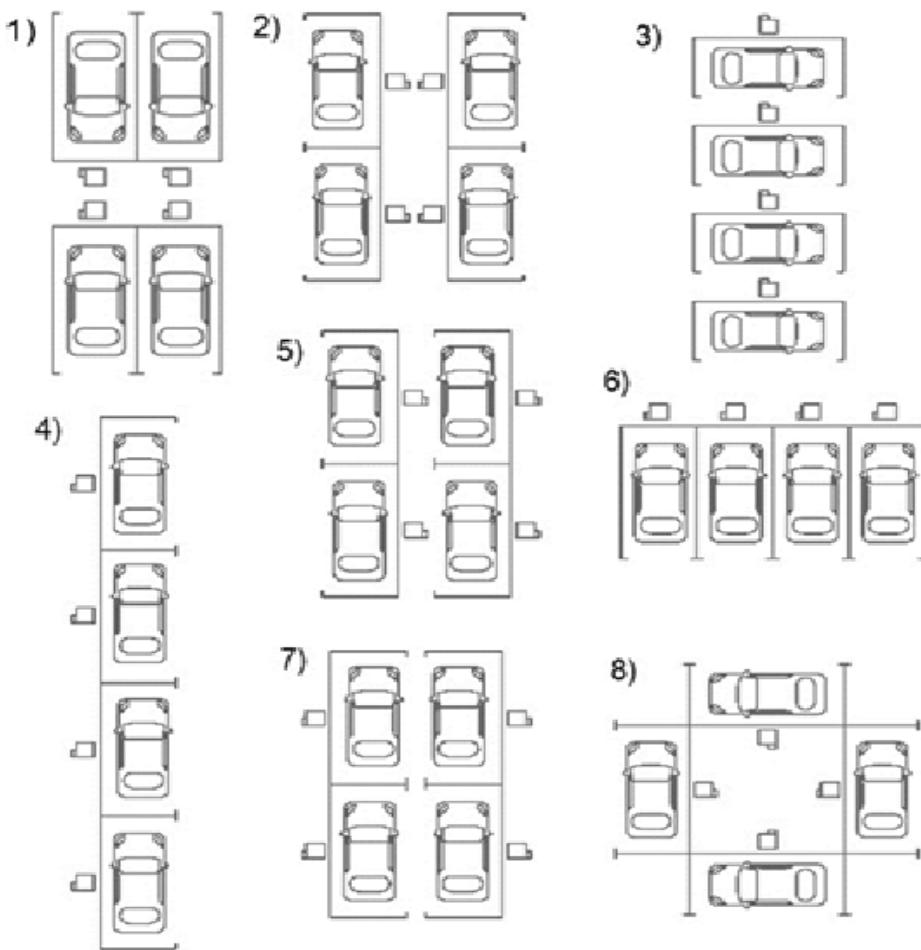
Такое расположение не только повысит удобство для клиента зарядной станции, но и создаст симбиоз с владельцами иной инфраструктуры. Если рассматривать сценарий размещения зарядной станции рядом с кафе или рестораном, собственник заведения общепита получит дополнительного клиента, а владелец электромобиля сможет занять себя на время зарядки, так как в среднем прием пищи в кафе или ресторане занимает от 30 минут до 2 часов. То же самое относится, например, к театрам и кинотеатрам, где сеанс может длиться от 1,5 до 2,5 часов и более. При установке зарядной стации на территории отеля, владелец электромобиля при необходимости может отдать свое ТС парковщику, который поставит его на зарядку, после чего перепаркует на общественную парковочную зону для постояльцев отеля [7, 8, 16-18].

Основными показателями зарядных станций являются число заряжаемых электромобилей в год и полезная площадь участка, которую они занимают.

Исходя из вышеперечисленных ограничений были предложены новые компоновочные схемы зон для зарядки электромобилей, ориентируемых на 4 автомобиле-места (рис. 4).

Такие схемы повышают вариативность размещения зон для зарядки, поскольку имеют различные габариты и занимаемую площадь. Они могут располагаться как в городе, так и за его пределами, что значительно упростит передвижение на электромобиле между городами. Их можно внедрить в общественные парковочные зоны или сделать обособленными в специально отведенных для них местах. Наименования, габариты и занимаемая площадь предлагаемых нами зон для зарядки электромобилей представлены в табл. 1 [19].

Габариты зон для зарядки были рассчитаны путем сложения габаритов автомобиле-мест, ширины дорожной разметки, габаритов зарядной станции и расстояния от станции до электромобиля.



1) перпендикулярная внутренняя; 2) параллельная внутренняя (парная); 3) параллельная боковая (поперечная); 4) параллельная боковая (продольная); 5) параллельная внешняя; 6) перпендикулярная внешняя; 7) параллельная внешняя; 8) параллельная внутренняя (круговая)

Рисунок 4 – Компоновочные схемы расположения зон для зарядки электромобилей

Таблица 1 – Габаритные размеры и занимаемая площадь компоновочных схем зон для зарядки электромобилей

№	Наименование компоновочной схемы	Габаритные размеры, мм	Занимаемая площадь, м ²
1	Перпендикулярная внутренняя	14600 × 5300	77,38
2	Параллельная внутренняя (парная)	12300 × 7500	92,25
3	Параллельная боковая (поперечная)	16700 × 6200	103,54
4	Параллельная боковая (продольная)	24500 × 3800	93,10
5	Параллельная внешняя	12300 × 8100	99,63
6	Перпендикулярная внешняя	10500 × 7300	76,65
7	Параллельная внешняя	12300 × 8100	99,63
8	Параллельная внутренняя (круговая)	11400 × 11400	129,96

Согласно ГОСТ 33062-2014 [12] автомобиле-место для легкового автомобиля при продольной парковке должно иметь габариты 6000 × 2500 мм, ширина разметки – 100 мм. Габариты зарядной станции 600 × 600 мм были взяты исходя из габаритов станции ЭСЭМ-1-50К-2 [6], расстояние от станции до электромобиля принято условно за 500 мм.

4 Обсуждение и заключение

Исследование проблемы недостатка зарядных станций для электромобилей и их расположения показало, что развитие зарядной инфраструктуры является необходимым условием стабильного развития электротранспорта. Несмотря на ежегодное улучшение ситуации с продажами новых электромобилей, на данный момент рост количества зарядных станций от него отстает, при этом характер расположения зарядных станций довольно хаотичен.

При планировании новых зон для зарядки электромобилей следует обратить внимание на территориальный фактор, конкретную локацию для установки, количество зарядных станций на единицу площади, выбор оптимальной компоновки, наличие в месте установки зарядных станций уже существующей инфраструктуры и их взаимодействие с ней.

Даже учитывая то, что некоторое количество владельцев заряжают свои электромобили от домашней сети 220 В, проблема недостатка общественных станций для зарядки в условиях городской застройки остается актуальной, поскольку даже современный электромобиль на одном заряде батареи в реальных условиях эксплуатации редко преодолевает расстояние более 300 км [20].

Однако практический подход, связанный только с увеличением количества зарядных станций даст лишь временное улучшение ситуации. Для комплексного решения проблемы необходима системная оптимизация инфраструктуры зарядных станций и планирование новых зарядных станций с учетом особенностей их расположения и локальной потребности, применяя научные подходы на основе использования теории массового обслуживания и др.

В теории массового обслуживания, имеется возможность моделирования постоянно повторяющихся однотипных задач в одинаковых условиях их появления. В рассматриваемом случае это возможно на основе статистических оценок потока заявок на зарядку, времени нахождения автомобилей на заправке и анализе способов их решения в целях повышения эффективности системы «зарядные станции – автомобили» с учетом времени суток и дней недели.

Список литературы

1 Энтони Д., Оливье Б., Кристель С. Электромобиль, устройство, принцип работы, инфраструктура. – 2022. – URL: (дата обращения 04.04.2025). – Текст: электронный.

2 Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года // Утверждена 23 августа 2021 г. № 2290-р // Правительство Российской Федерации. – 2021. – URL: <http://static.government.ru/media/files/bW9wGZ2rDs3BkeZHf7ZsaxnlbJzQbJJt.pdf> (дата обращения 04.04.2025). – Текст: электронный.

3 Абдуллина, Л. В. Инновационные зарядные станции для электромобилей: технологии, Инфраструктура и перспективы развития / Л. В. Абдуллина // Студенческий. – 2024. – № 17-6(271). – С. 28-31. – EDN MTFFTZ.

4 Сиукаева, Л. М. О внедрении зарядных станций для электромобилей в России / Л. М. Сиукаева, И. Э. Гергиев // Современные тенденции развития науки и производства : сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, Кемерово, 31 марта 2018 года. Том II. – Кемерово: Общество с ограниченной ответственностью "Западно-Сибирский научный центр", 2018. – С. 255-257. – EDN YYQHUL.

5 Поликарпова, В. В. Развитие инфраструктуры зарядных станций для электромобилей в России / В. В. Поликарпова // Молодежная неделя науки института промышленного менеджмента, экономики и торговли : сборник трудов всероссийской студенческой научно-учебной конференции, Санкт-Петербург, 02–07 декабря 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025. – С. 78-81. – EDN WHVMNE.

6 Быстрая зарядная станция электромобилей ЭСЭМ-1-50К-2: описание и спецификация. – URL: https://videoglaz.ru/upload/manuals/Parus-electro/specification_esem1_50k_2.pdf (дата обращения 04.04.2025). – Текст: электронный.

7 Тимофеев, А. Инфраструктура для электромобилей: электрические зарядные станции / А. Тимофеев, Н. Балашенко // Силовая электроника. – 2021. – № 5(92). – С. 62-64. – EDN ERUERF.

8 Николаева, Т. А. О создании сети зарядных станций для электромобилей / Т. А. Николаева, М. В. Константинова // Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции: Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции, Иркутск, 01 февраля 2022 года. Том Часть 1. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. – С. 40-42. – EDN QQRJNY.

9 Мусина, Л. Ф. Электрические транспортные системы: инфраструктура зарядных станций для электромобилей / Л. Ф. Мусина // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 7, № 11(152). – С. 95-103. – DOI 10.36871/ek.up.r.g.2024.11.07.010. – EDN EMHHNG.

10 Куршакова, А. И. Виды зарядных станций для электромобилей и их применение в современном мире / А. И. Куршакова // XI Международная научно-практическая заочная конференция "ЭТАП-2024", посвященная 220-летию КФУ, Набережные Челны, 14 ноября 2024 года. – Набережные Челны: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2024. – С. 831-834. – EDN JEXBZYH.

11 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668096 Российская Федерация. Программа для мониторинга, управления и монетизации зарядных станций для электромобилей: № 2023667394 : заявл. 19.08.2023 : опубл. 23.08.2023 / М. В. Большаков, Е. А. Мачнев, А. В. Елизаров [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Софикс». – EDN GVSCGW.

12 ГОСТ 33062-2014. Требования к размещению объектов дорожного и придорожного сервиса: дата введения 2015-12-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200123714> (дата обращения 04.04.2025). – Текст: электронный.

13 Бояршинов, М. Г. Количественные характеристики использования придорожного парковочного пространства / М. Г. Бояршинов, Ю. А. Щукин, Д. В. Артеменко // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-2 (88). – С. 63-70. – DOI 10.33979/2073-7432-2025-1-2(88)-63-70. – EDN PKUACK.

14 Солиман, И. А. Оптимальное размещение зарядных станций для электромобилей (ЗСЭМ) и электромобилей в сети (ЭМВС) для обеспечения качества электроэнергии / И. А. Солиман // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Тридцать первой международной научно-технической студенческой конференции с международным участием, Москва, 13–15 марта 2025 года. – Москва: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга", 2025. – С. 1086. – EDN VVTZYL.

15 Ихсанов, Р. И. Комплекс зарядных станций для электромобилей / Р. И. Ихсанов, А. А. Стрыйгин, В. А. Елин // Студенческий. – 2022. – № 19-10(189). – С. 29-30. – EDN DBHJFM.

16 Шамбергер, Н. Д. Определение оптимального расположения зарядных станций для электромобилей / Н. Д. Шамбергер, Н. А. Шаронов // Логистика в современном мире. Проблемы и решения : Материалы III Всероссийской мультиязычной научно-практической конференции с международным участием, Новосибирск, 17 мая 2023 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 198-203. – EDN YIDIWN.

17 Анкудинов, А. В. Разработка рекомендаций по внедрению в транспортную инфраструктуру мегаполиса зарядных станций для электромобилей / А. В. Анкудинов, Е. П. Антипова // Актуальные проблемы развития технических наук : Сборник статей участников XXII Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки» / Департамент молодежной политики Свердловской области; ГАУ СО «Дом молодежи»; ФГАУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2020. – С. 149-156. – EDN WWKRAZ.

18 Фарходов, Ж. У. Обоснование расположения зарядных станций для электромобилей / Ж. У. Фарходов, В. А. Топалиди, Ш. К. Хакимов // Экономика и социум. – 2023. – № 6-1(109). – С. 1111-1116. – EDN VWCBXY.

19 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025612934 Российской Федерации. «Оптимизация размещения зарядных станций для электромобилей» : заявл. 21.01.2025 : опубл. 05.02.2025 / И. Н. Булатникова, Е. С. Кахаева, А. С. Клименко, Е. Ю. Горюнова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный технологический университет". – EDN KHFJKO.

20 Результаты натурного эксперимента по установлению зависимости потребляемой мощности электромобилем от внешних факторов / Д. С. Беляев, Е. М. Генсон, Н. В. Лобов, М. А. Вахрушев // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 1-3(84). – С. 63-70. – DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-63-70. – EDN CBNIMN.

References

- 1 Anthony D., Olivier B., Christel S. Electric vehicle, device, operating principle, infrastructure. - 2022. - URL: ([date of access 04.04.2025](#)). - Text: electronic.
- 2 Concept for the development of production and use of electric automobile transport in the Russian Federation for the period up to 2030 // Approved on August 23, 2021 No. 2290-r // Government of the Russian Federation. - 2021. - URL: <http://static.government.ru/media/files/bW9wGZ2rDs3BkeZHf7ZsaxnlbJzQbJJt.pdf> ([date of access 04.04.2025](#)). - Text: electronic.
- 3 Abdullina, L. V. Innovative charging stations for electric vehicles: technologies, infrastructure and development prospects / L. V. Abdullina // Student. – 2024. – No. 17-6(271). – P. 28-31. – EDN MTFFTZ.
- 4 Siukaeva, L. M. On the implementation of charging stations for electric vehicles in Russia / L. M. Siukaeva, I. E. Gergiev // Modern trends in the development of science and production: collection of materials from the VIII International scientific and practical conference, Kemerovo, March 31, 2018. Volume II. – Kemerovo: Limited Liability Company "West Siberian Scientific Center", 2018. – P. 255-257. – EDN YYQHUL.
- 5 Polikarpova, V. V. Development of the infrastructure of charging stations for electric vehicles in Russia / V. V. Polikarpova // Youth Science Week of the Institute of Industrial Management, Economics and Trade: collection of works of the All-Russian student scientific and educational conference, St. Petersburg, December 2–7, 2024. – St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025. – Pp. 78–81. – EDN WHVMNE.
- 6 Fast charging station for electric vehicles ESEM-1-50K-2: description and specification. – URL: https://videoglag.ru/upload/manuals/Parus-electro/specification_esem1_50k_2.pdf ([accessed 04.04.2025](#)). – Text: electronic.
- 7 Timofeev, A. Infrastructure for electric vehicles: electric charging stations / A. Timofeev, N. Balashenko // Power electronics. - 2021. - No. 5 (92). - Pp. 62-64. - EDN ERUERF.
- 8 Nikolaeva, T. A. On the creation of a network of charging stations for electric vehicles / T. A. Nikolaeva, M. V. Konstantinova // Baikal science: ideas, innovations, investments: Collection of materials from the All-Russian scientific and practical conference, Irkutsk, February 1, 2022. Volume Part 1. - Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2022. - Pp. 40-42. - EDN QQRJNY.
- 9 Musina, L. F. Electric transport systems: infrastructure of charging stations for electric vehicles / L. F. Musina // Economy and management: problems, solutions. - 2024. - Vol. 7, No. 11 (152). - Pp. 95-103. - DOI 10.36871/ek.up.p.r.2024.11.07.010. - EDN EMHHNG.
- 10 Kurshakova, A. I. Types of charging stations for electric vehicles and their application in the modern world / A. I. Kurshakova // XI International scientific and practical correspondence conference "STAGE-2024", dedicated to the 220th anniversary of KFU, Naberezhnye Chelny, November 14, 2024. – Naberezhnye Chelny: Kazan (Volga Region) Federal University, 2024. – P. 831-834. – EDN JEXBYH.
- 11 Certificate of State Registration of Computer Program No. 2023668096 Russian Federation. Software for Monitoring, Control, and Monetization of Electric Vehicle Charging Stations: No. 2023667394: declared 19.08.2023: published 23.08.2023 / M. V. Bolshakov, E. A. Machnev, A. V. Elizarov [et al.]; applicant Sofiks Limited Liability Company. – EDN GVSCGW.
- 12 GOST 33062-2014. Requirements for the placement of road and roadside service facilities: effective date 2015-12-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200123714> ([accessed 04.04.2025](#)). – Text: electronic.
- 13 Boyarshinov, M. G. Quantitative characteristics of the use of roadside parking space / M. G. Boyarshinov, Yu. A. Shchukin, D. V. Artemenko // World of Transport and Technological Machines. – 2025. – No. 1-2 (88). – P. 63-70. – DOI 10.33979/2073-7432-2025-1-2(88)-63-70. – EDN PKUACK.
- 14 Soliman, I. A. Optimal placement of charging stations for electric vehicles (ZSEM) and electric vehicles in the network (EVN) to ensure the quality of electric power / I. A. Soliman // Radioelectronics, electrical engineering and power engineering: Abstracts of reports of the Thirty-first international scientific and technical students and postgraduates, Moscow, March 13–15, 2025. – Moscow: OOO "Tsentr poligraficheskikh uslug" Raduga ", 2025. – P. 1086. – EDN VVTZYR.
- 15 Ikhsanov, R. I. Complex of charging stations for electric vehicles / R. I. Ikhsanov, A. A. Strygin, V. A. Elin // Student. – 2022. – No. 19-10 (189). – P. 29-30. – EDN DBHJFM.
- 16 Shamberger, N. D. Determination of the optimal location of charging stations for electric vehicles / N. D. Shamberger, N. A. Sharonov // Logistics in the modern world. Problems and solutions: Proceedings of the III All-Russian multilingual scientific and practical conference with international participation, Novosibirsk, May 17, 2023. – Novosibirsk: Siberian State Transport University, 2023. – P. 198-203. – EDN YIDIWN.

17 Ankudinov, A. V. Development of recommendations for the implementation of charging stations for electric vehicles in the transport infrastructure of a megacity / A. V. Ankudinov, E. P. Antipova // Actual problems of development of technical sciences: Collection of articles by participants of the XXII Regional competition of scientific research works "Scientific Olympus" in the direction of "Technical sciences" / Department of youth policy of the Sverdlovsk region; State Autonomous Institution of the Sverdlovsk region "House of Youth"; Federal State Autonomous Institution of Higher Education Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. - Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 2020. - P. 149-156. - EDN WWKRAZ.

18 Farhodov, Zh. U. Justification for the location of charging stations for electric vehicles / Zh. U. Farhodov, V. A. Topalidi, Sh. K. Khakimov // Economy and Society. - 2023. - No. 6-1 (109). - Pp. 1111-1116. - EDN VWCBXY.

19 Certificate of state registration of computer program No. 2025612934 Russian Federation. "Optimization of the placement of charging stations for electric vehicles": declared. 21.01.2025 : published. 05.02.2025 / I. N. Bulatnikova, E. S. Kakhaeva, A. S. Klimenko, E. Yu. Goryunova ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State Technological University". – EDN KHFJKO.

20 Results of a full-scale experiment to establish the dependence of the power consumed by an electric vehicle on external factors / D. S. Belyaev, E. M. Genson, N. V. Lobov, M. A. Vakhrushev // World of Transport and Technological Machines. – 2024. – No. 1-3(84). – P. 63-70. – DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-63-70. – EDN CBNIMN.

© Снятков Е. В., Хлистун В. Р., Кириченко И. А., 2025