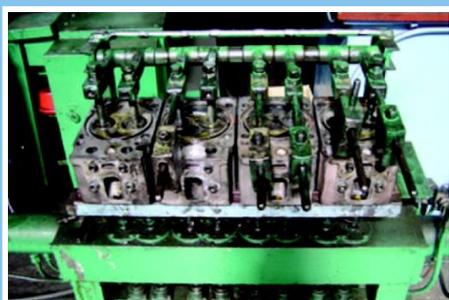


ВНТВ

Воронежский научно-технический вестник
1 (47) март 2024



Научно-технический журнал ^(2*)

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)

Евтюков 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)

Шевцова 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

Е-mail: vestnikvglta@mail.ru

Телефон: (473) 253-73-11

Сайт: <http://vestnikvglta.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

Волков К.Г., Ипатов А.Г. Методика упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания наплавкой металлокерамических материалов..... 3

Безъязычный В.Ф., Пleshкун В.В. Теоретический анализ влияния коррозии поверхности деталей машин на концентрацию напряжений в поверхностном слое материала деталей..... 11

Прокорец Г. А., Мельникова Е. П., Прокорец А.А. Удаление заусенцев и скругление острых кромок вибрационной абразивной обработкой на деталях из бронзы..... 22

Попов А.И. Атомно-дислокационная модель удаления поверхностных слоев струйным электролитно-плазменным полированием 31

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Лебедев В.А., Коваль Н.С., Котенко О.Н. Технологическое обоснование рациональной конструкции электромеханических датчиков на основе размерно-точностного анализа 52

Малинин П.В., Бочкарев П.Ю. Группирование по технологическим признакам операций продольного бесцентрового шлифования..... 61

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Булатов С.В., Горбачёв С.В., Кеян Е.Г., Фаскиев Р.С., Хасанов И.Х. К вопросу разработки стратегии управления рисками при приобретении запасных частей автотранспортными предприятиями в современных рыночных условиях..... 70

Зеликов В.А., Денисов Г.А., Феофилова А.А., Струков Ю.В., Стородубцева Т.Н., Струкова И.Ю. Анализ вариантов исследования наезда на пешехода или дикое животное, вышедшего под произвольным углом из-за движущегося встречного препятствия..... 77

Дрючин Д.А., Горбачёв С.В., Мельников А.Н., Фаскиев Р.С. Влияние условий хранения автобусов в крытых отапливаемых стоянках на интенсивность коррозионного изнашивания кузовов..... 89

Комаров Ю.Я., Ганзин С.В., Сильченков Д.Д., Зеликова Н.В. К вопросу обоснования применения оптимальной технологии организации дорожного движения на перекрестках..... 103

Рассоха В.И. Способ автоматического регулирования схождения управляемых колёс автотранспортного средства в процессе движения..... 111

Сафиуллин Р.Н., Шаммазов И.А., Сафиуллин Р.Р., Сорокин К.В., Мошников А.Р. Адаптивно-управляемый метод контроля технического состояния топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы силовой установки транспортного средства... 123

Гудков В.В., Сокол П.А., Василенко А.В., Янин А.Н. Анализ влияния основных внешних сил и реакций на величину бокового увода управляемых и неуправляемых колес при криволинейном движении двухосного автомобиля..... 134

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-3-10



УДК 621.791.725

UDC 621.791.725

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

МЕТОДИКА УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НАПЛАВКОЙ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

METHOD FOR STRENGTHENING PARTS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY SURFACING OF CERAMIC MATERIALS

✉¹ **Волков Кирилл Георгиевич**, к.т.н., научный сотрудник, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Ижевск, e-mail: wolkow-kirill@mail.ru

✉¹ **Volkov Kirill Georgievich**, candidate of technical sciences, researcher, Udmurt federal research center of the Ural branch of the Russian academy of sciences, Izhevsk, e-mail: wolkow-kirill@mail.ru

Ипатов Алексей Геннадьевич, к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация и ремонт машин», Удмуртский государственный аграрный университет, г. Ижевск.

Ipatov Alexey Gennadievich, candidate of technical sciences, associate professor of the department "Operation and repair of machines", Udmurt state agrarian university, Izhevsk.

Аннотация. В работе представлена методика упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания на примере выпускных клапанов ГРМ. Для упрочнения рабочей поверхности тарелки клапана использовалось покрытие на основе металлокерамической порошковой композиции, наплавляемой короткоимпульсной лазерной установкой. Выполнены исследования физико-механических характеристик упрочняющего покрытия, выполнена оценка ресурса упрочненного выпускного клапана.

Annotation. The paper presents a method for strengthening parts of internal combustion engines using timing exhaust valves as an example. To strengthen the working surface of the valve disc, a coating based on a metal-ceramic powder composition, fused with a short-pulse laser system, was used. Studies of the physical and mechanical characteristics of the strengthening coating have been carried out, and the service life of the reinforced exhaust valve has been assessed.

Ключевые слова: УПРОЧНЯЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ, КОРОТКОИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА, МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ.

Keywords: STRENGTHENING COATING, SHORT PULSE LASER SURFACING, CERAMIC COATING.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Повышение мощности, уменьшение потребления топлива, снижение токсичных выбросов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является общемировой тенденцией. В первую очередь это связано с повышением экономической эффективности использования ДВС во всех отраслях экономики. Повышение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания приво-

дит к увеличению нагрузок на узлы и агрегаты. Форсирование ДВС приводит к ухудшению условий смазывания пар трения, к повышению температурного фона в камере сгорания, увеличению механических нагрузок [1-13]. Увеличение негативного воздействия на детали двигателей внутреннего сгорания приводит к сокращению срока службы, что впоследствии ухудшает экономическую эффективность от принятых мер по повышению эксплуатационных показателей. Для решения возникшей проблемы предлагаются различные методы упрочнения как деталей ДВС, так и деталей машин в целом. Упрочнение деталей машин, либо отдельных рабочих поверхностей производится различными способами: механической, термической обработкой, наплавкой, модификацией поверхностного слоя и т. д. В [14] представлена технология термомеханической обработки конструкционных материалов, позволяющей получать цилиндрические детали с повышенным уровнем механических свойств, например для полый цилиндрической детали из стали 30ХГСН2А предел прочности $\sigma_b = 1879$ МПа, предел пропорциональности $\sigma_{0,2} = 1721$ МПа, условное относительное удлинение $\delta = 13,3$ %, условное относительное сужение $\psi = 63,5$ %). Данный процесс заключается в предварительном нагреве детали токами высокой частоты, последующем винтовом обжати и охлаждении. Данный процесс описан в [7] на примере пальцев траков гусеничных машин. В [15-17] представлена технология по восстановлению коленчатых валов ДВС с обеспечением требуемого ресурса, который достигается в условиях ремонтного производства. Данная технология основана на плазменном напылении специального покрытия и одновременной электро-механической обработке с последующим охлаждением струями воды. Это позволило получить улучшенные физико-механические и трибологические показатели поверхности шеек коленчатого вала с покрытием относительно метода с последующей электро-механической обработкой. Одним из распространенных способов создания покрытий является гальваническое осаждение металла из жидкого электролита на подложку. Таким методом в работе [18] предлагается восстановление и упрочнение толкателей газораспределительного механизма.

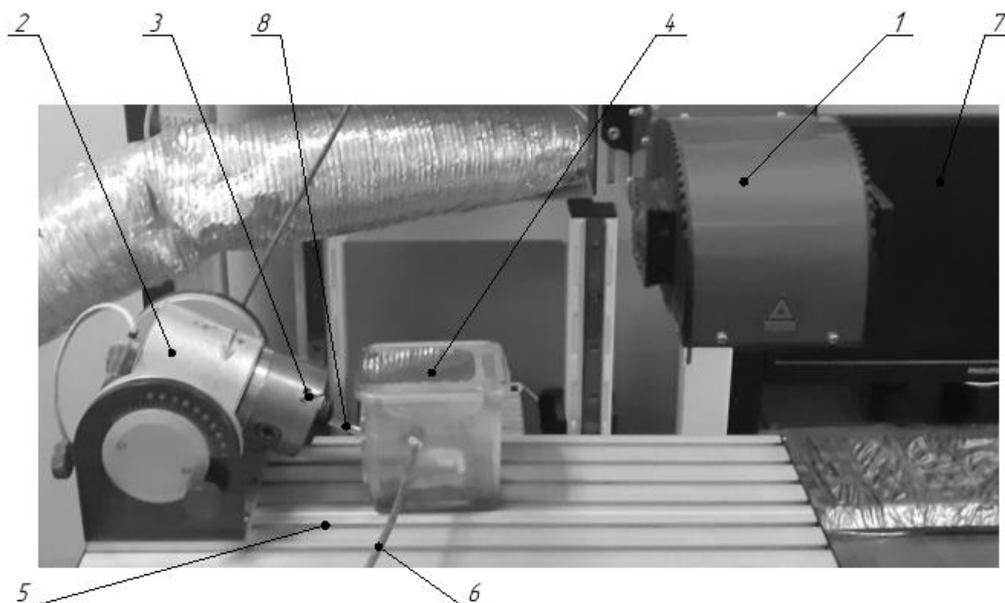
Несмотря на многообразие технологий и методик по упрочнению деталей машин, существует множество открытых вопросов и не в полной мере решенных задач. Поэтому разработка новых методик для увеличения ресурса является актуальной. Несмотря на многочисленные исследования и разработанные методики технологии по упрочнению рабочей фаски выпускных клапанов ГРМ двигателей внутреннего сгорания, вопрос по увеличению ресурса выпускных клапанов и сопряжения «клапан-седло» является открытым. Наиболее остро данная проблема наблюдается при работе ДВС на относительно дешевом [13, 19] газовом топливе. Использование газообразного топлива приводит к повышению температуры отработавших газов на 15 % по отношению к работе на бензине и на 25 % при работе на дизельном топливе [11]. Увеличение температуры продуктов сгорания, обтекающих рабочую фаску выпускного клапана, приводит к окислению защитного покрытия и преждевременному разрушению поверхности. Исходя из этого, разработка методики упрочнения поверхности рабочей фаски выпускного клапана ГРМ является основной целью данной работы.

2 Материалы и методы

Для упрочнения поверхности рабочей фаски выпускного клапана использовалась порошковая композиция на основе никеля с добавлением карбида кремния и диоксида циркония. Никелевая основа позволяет достигать высоких показателей жаростойкости покрытия (температура окисления 800 °С). Также никель выступает в качестве пластичной матрицы в разработанной композиции, воспринимая ударные нагрузки, возникающие при посадке клапана в седло. Карбид кремния дополнительно повышает жаростойкость композиции за счет образования оксидной пленки в приграничном слое. Диоксид циркония повышает твердость и плотность покрытия [1, 20, 21]. Затем готовилась суспензия, состоящая из порошковой композиции, спирта этилового и канифоли сосновой.

Полученная суспензия наносилась на обрабатываемую поверхность выпускного клапана специальным аппликатором, подвергалась выдержке для высыхания. Подготовленный

клапан устанавливался в специальную герметичную камеру, заполняемую аргоном. Данная камера устанавливалась на стол короткоимпульсной лазерной установки. Стержень клапана зажимался в трехкулачковый патрон привода с шаговым электродвигателем. Наплавка производилась сканированием поверхности обмазки лазерным лучом, оплавливающим порошковую суспензию и тонкий слой металла подложки. Затем производился поворот клапана вокруг продольной оси на угол $0,9$ градуса. Схема установки для наплавки представлена на рис. 1.



1 – лазерная установка, 2 – привод клапана, 3 – трехкулачковый патрон, 4 – камера для наплавки, 5 – рабочий стол установки, 6 – трубка для подвода аргона, 7 – компьютер для управления установкой; 8 – стержень клапана

Рисунок 1 – Установка для наплавки упрочняющего покрытия

Для обеспечения требуемого качества поверхности клапан после наплавки подвергался алмазному выглаживанию на токарно-винторезном станке 95ТС-1. Данная операция позволяла достичь шероховатости поверхности $Ra\ 0,63$ мкм. Более подробно технология наплавки и алмазного выглаживания описаны в работе [2].

Для выявления физико-механических характеристик упрочняющего покрытия рабочей фаски выпускного клапана был проведен ряд исследований, связанных с определением трибологических параметров, металлографическим анализом, определением микротвердости, рентгеноструктурным фазовым анализом. Для выполнения перечисленных исследований использовались стандартные и общепринятые методики, описанные в [5, 6, 12, 17]. В качестве оборудования были выбраны: машина трения 2070 СМТ-1, оптический микроскоп НЕОРНОТ-32, электронный микроскоп FEI Inspect S50, микротвердомер ПМТ-3, дифрактометр Empyrean с вакуумной камерой Anton Paar НТК 1200N.

Сравнительная оценка ресурса выпускного клапана с упрочняющим покрытием проводилась по результатам экспериментальной отработки двух образцов – серийного и упрочненного на стенде, представленном на рис. 2. Методика и программа ресурсных испытаний выпускных клапанов ГРМ представлена в работе [8], основанной на результатах исследований, приведенных в [3, 4].



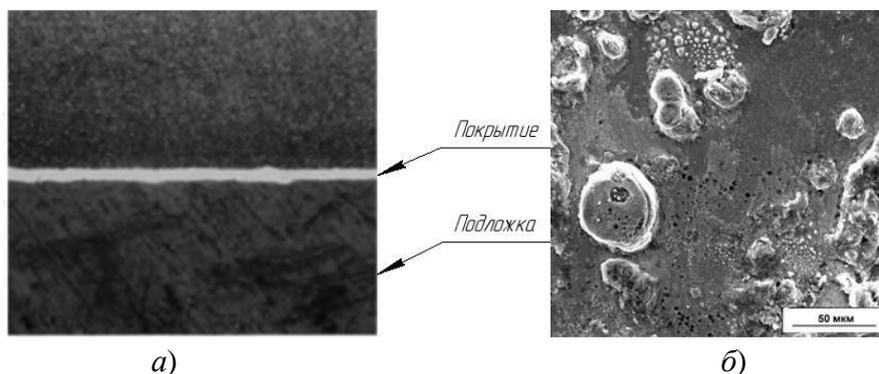
1 – рама, 2 – регулируемый по высоте стол, 3 – подъемный механизм, 4 – асинхронный электродвигатель, 5 – кулачковый привод толкателя, 6 – толкатель, 7 – выпускной клапан, 8 – головка блока цилиндров, 9 – струбцина, 10 – фен промышленный, 11 – горелка газовая, 12 – магнитный пускатель, 13 – терморегулятор, 14 – баллон газовый

Рисунок 2 – Стенд для ресурсных испытаний выпускных клапанов ГРМ

3 Результаты исследований

Для исследований физико-механических характеристик были использованы лабораторные образцы в виде дисков из материала, соответствующего тарелке выпускного клапана, на поверхность которых наносилось покрытие. По результатам исследований было определено, что среднее значение коэффициента сухого трения для упрочняющего покрытия в паре с серым чугуном составил 0,12, что на 30 % ниже в сравнении с покрытием, применяемым в серийных клапанах. Аналогичный результат был получен и для интенсивности изнашивания, среднее значение которого составило $6 \cdot 10^{-7}$ г/м.

В результате металлографического анализа были получены снимки поперечного сечения микрошлифа и снимки поверхности образца, которые представлены на рис. 3.



а) снимок поперечного сечения микрошлифа, б) снимок поверхности микрошлифа

Рисунок 3 – Результаты металлографического анализа

Данные исследования позволили определить, что среднее значение толщины упрочняющего покрытия составило 40 мкм, при этом в поперечном сечении не наблюдаются отслоения, трещины и иные дефекты. По снимкам, полученным на электронном микроскопе

(рис. 3, б), было сделано заключение об отсутствии поверхностных дефектов, а также о наличии в структуре включений карбида кремния и диоксида циркония.

Исследования, выполненные на микротвердомере ПМТ-3, позволили определить, каким образом изменяется микротвердость упрочняющего покрытия по толщине слоя. Результаты представлены на рис. 4.

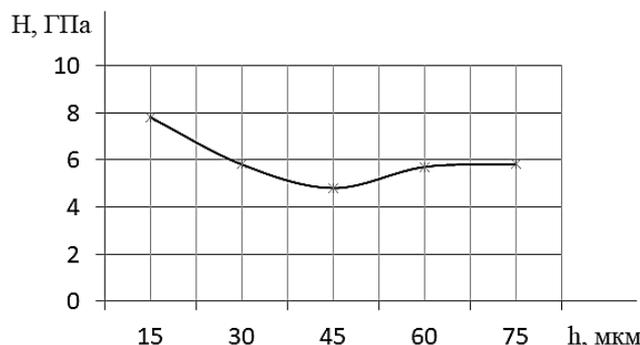


Рисунок 4 – Результаты исследований микротвердости упрочняющего покрытия

Из графика (рис. 4) видно, что среднее значение микротвердости покрытия составило 6,3 ГПа, что на 20...25 % выше, чем у покрытий, используемых на серийных клапанах. Данное значение микротвердости позволяет упрочняющему покрытию лучше сопротивляться износу в результате воздействия твердых загрязняющих частиц.

Рентгеноструктурный фазовый анализ проводился при диапазоне температур от 25 °С до 900 °С. В результате анализа было определено, что все компоненты покрытия находятся в аморфном состоянии во всем диапазоне температур. Это говорит о высокой стабильности параметров упрочняющего покрытия, так как при увеличении температуры эксплуатации до 900 °С не будут происходить фазовые превращения, влияющие на структуру покрытия.

После оценки результатов исследований физико-механических параметров покрытия были подготовлены выпускные клапаны с упрочняющим покрытием и серийные клапаны газового двигателя КАМАЗ 820.60, которые подверглись стендовым испытаниям. В результате стендовых испытаний, длившихся 200 ч для каждого клапана, были составлены графики изменения ширины пояска приработки от наработки (рис. 5).

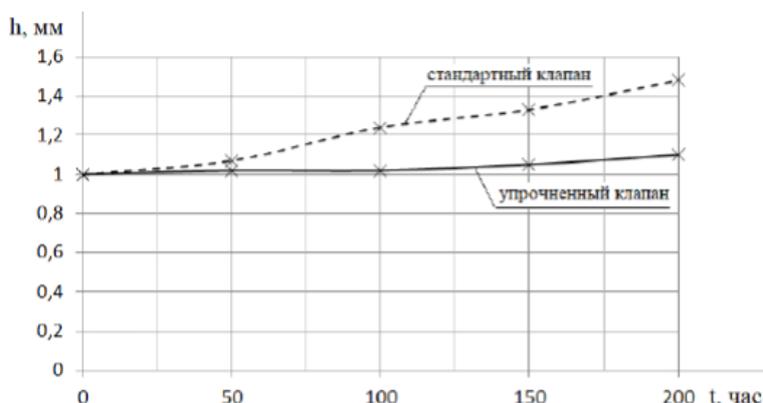


Рисунок 5 – Результаты стендовых испытаний выпускных клапанов ГРМ

Затем была проведена аппроксимация экспериментальных данных, по результатам которой составлен прогноз наработки клапанов до предельного состояния ширины пояска 2 мм. Результаты исследований показали, что интенсивность износа серийного клапана в 2 раза выше, чем у клапана с упрочняющим покрытием.

4 Обсуждение и заключение

В данной работе описана методика упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания на примере выпускных клапанов ГРМ газовых двигателей. Выполнены исследования физико-механических характеристик упрочняющего покрытия на основе никеля с добавлением карбида кремния и диоксида циркония. Сравнительный анализ результатов лабораторных исследований показал, что упрочняющее покрытие имеет на 20...30 % лучшие характеристики в сравнении с покрытием рабочей фаски выпускных клапанов, изготавливаемых серийно. Положительная динамика также наблюдалась при выполнении ресурсных испытаний, в результате которых было определено, что интенсивность изнашивания выпускного клапана с упрочняющим покрытием в 2 раза меньше, чем у серийного клапана. Однако в реальных условиях данная разница может быть несколько меньше, так как при стендовых испытаниях не имитировался ряд факторов, например давление в камере сгорания.

Описанная в данной работе методика может быть применена не только для упрочнения выпускных клапанов ГРМ, но и в других узлах двигателей. Например, в работе [10], подобная методика была успешно применена при восстановлении валов роторов турбокомпрессоров.

Список литературы

- 1 Алисин, В. В. Износостойкое металлокерамическое покрытие с ультрадисперсной упрочняющей фазой для узлов трения, содержащих кристаллы диоксида циркония / В. В. Алисин // *Journal of Advanced Research in Natural Science*. – 2019. – №. 7. – С. 10-14.
- 2 Восстановление и упрочнение рабочей фаски клапана двигателя внутреннего сгорания методом селективной лазерной наплавки (SLM) / К. Г. Волков, А. Г. Ипатов, Е. В. Харанжевский, С. Н. Шмыков // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. – 2022. – № 9. – С. 20-26.
- 3 Гоц, А. Н. Выбор режимов ускоренных испытаний головки цилиндров автомобильного дизеля / А. Н. Гоц, В. С. Клевцов // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2018. – № 2. – С. 26-33.
- 4 Гоц, А. Н. Методика расчета теплонапряженного состояния головки цилиндров дизеля жидкостного охлаждения / А. Н. Гоц, В. С. Клевцов // *Современные наукоемкие технологии*. – 2020. – № 5. – С. 26-32.
- 5 Драгуленко, В. В. Детонационные явления в современных форсированных бензиновых двигателях внутреннего сгорания / В. В. Драгуленко, А. А. Бондаренко // *Наука, образование, молодежь: горизонты развития: Сборник трудов по материалам Национальной научно-практической конференции, Керчь, 10 марта 2021 года / Под общей редакцией Е.П. Масюткина, науч. редактор Т.Н. Попова*. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». – 2021. – С. 18-23.
- 6 Жуковец, И. И. Механические испытания металлов / И. И. Жуковец. – М.: Высшая школа. – 1980. – 191 с.
- 7 Засыпкин, А. Д. Упрочнение пальцев траков гусеничных машин ВТМО винтовым обжатием / А. Д. Засыпкин, В. Б. Дементьев // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2012. – № 4. – С. 37-39.
- 8 Исследование работоспособности упрочненных клапанов ДВС / А. Г. Ипатов, П. В. Дородов, С. Н. Шмыков [и др.] // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2023. – № 1(73). – С. 48-53.
- 9 К вопросу определения фактической наработки двигателей внутреннего сгорания / С. В. Мальчиков, М. А. Сватков, И. М. Колесников, И. М. Блянкинштейн // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. – 2018. – № 2. – С. 84-89.
- 10 Малинин, А. В. Влияние антифрикционных керамических покрытий в подшипниковых сопряжениях на эффективность работы турбокомпрессора / А. В. Малинин, А. Г. Ипатов, С. Н. Шмыков // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2023. – № 2(74). – С. 71-75.

11 Марков, В. А. Сравнительный анализ альтернативных моторных топлив для дизелей / В. А. Марков, Е. В. Бебенин, С. П. Гладышев // Известия вузов. Машиностроение. – 2014. – №5(650). – С. 43 – 48.

12 Методика и результаты трибологических исследований смесового рыжико-минерального топлива / А. П. Уханов, В. А. Мачнев, Е. Г. Ротанов [и др.] // Наука в центральной России. – 2019. – № 2(38). – С. 108-116.

13 ООО «Газпром газомоторное топливо»: сайт. Санкт-Петербург, 2023. URL: <https://gmt.gazprom.ru/about/avtomobilnoe-toplivo-ecogas/> (дата обращения 17.09.2023).

14 Патент № 2320731 С2 Российская Федерация, МПК С21D 8/00. Способ высокотемпературной термомеханической обработки цилиндрических заготовок переменного сечения и устройство для его реализации : № 2006113895/02 : заявл. 24.04.2006 : опубл. 27.03.2008 / В. Б. Дементьев, А. Д. Засыпкин ; заявитель Институт прикладной механики УрО РАН.

15 Посметьев, В. И. Оценка эффективности перспективной комбинированной технологии для восстановления шеек коленчатых валов двигателей лесовозных автопоездов / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2021. – Т. 4, № 4(38). – С. 86-101.

16 Русаков, А. А. Рентгенография металлов / А. А. Русаков. – Москва: Атомиздат, 1977. – 480 с.

17 Скрябин, В. А. Металлографический анализ образцов из порошковых материалов / В. А. Скрябин, А. Е. Зверовщиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2019. – № 3. – С. 33-36.

18 Упрочнение деталей газораспределительного механизма двигателей внутреннего сгорания гальваническим покрытием / Ю. П. Гнездилова, А. И. Перьков, В. В. Каменев, И. А. Демидова // Молодежная наука - гарант инновационного развития АПК : материалы X Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Курск, 19–21 декабря 2018 года. Том Часть 3. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия. – 2019. – С. 273-277.

19 Федеральная служба государственной статистики: сайт. Москва, 2023. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/131_23-08-2023.html (дата обращения 17.09.2023).

20 Шиганов, И. Н. Модифицирование поверхности алюминиевых сплавов карбидами кремния методом лазерного оплавления / И. Н. Шиганов, П. Е. Самарин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – №. 6 (6). – С. 4–11.

21 Tribological performance of boron-based superhard coatings sliding against different materials / E. V. Kharanzhevskiy [et al.] // Wear. – 2021. – Т. 477. – С. 203 – 835.

References

1 Alisin, V.V. Wear-resistant metal-ceramic coating with an ultradispersed strengthening phase for friction units containing zirconium dioxide crystals / V.V. Alisin // Journal of Advanced Research in Natural Science. – 2019. – No. 7. – pp. 10-14.

2 Restoration and strengthening of the working chamfer of an internal combustion engine valve using selective laser cladding (SLM) / K. G. Volkov, A. G. Ipatov, E. V. Kharanzhevsky, S. N. Shmykov // Repair. Recovery. Modernization. – 2022. – No. 9. – P. 20-26.

3 Gots, A. N. Selection of modes for accelerated testing of the cylinder head of an automobile diesel engine / A. N. Gots, V. S. Klevtsov // Tractors and agricultural machines. – 2018. – No. 2. – P. 26-33.

4 Gots, A. N. Methodology for calculating the heat-stressed state of the cylinder head of a liquid-cooled diesel engine / A. N. Gots, V. S. Klevtsov // Modern science-intensive technologies. – 2020. – No. 5. – P. 26-32.

5 Dragulenko, V. V. Detonation phenomena in modern forced gasoline internal combustion engines / V. V. Dragulenko, A. A. Bondarenko // Science, education, youth: development horizons: Collection of papers based on the materials of the National Scientific and Practical Conference, Kerch

, March 10, 2021 / Under the general editorship of E.P. Masyutkina, scientific editor T.N. Popova. – Kerch: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kerch State Marine Technological University”. – 2021. – pp. 18-23.

6 Zhukovets, I. I. Mechanical testing of metals / I. I. Zhukovets. – M.: Higher school. – 1980. – 191 p.

7 Zasyupkin, A.D. Strengthening the track fingers of VTMO tracked vehicles by screw compression / A.D. Zasyupkin, V.B. Demytyev // Tractors and agricultural machines. – 2012. – No. 4. – P. 37-39.

8 Study of the performance of reinforced internal combustion engine valves / A. G. Ipatov, P. V. Dorodov, S. N. Shmykov [etc.] // Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy. – 2023. – No. 1(73). – pp. 48-53.

9 On the issue of determining the actual operating time of internal combustion engines / S. V. Malchikov, M. A. Svatkov, I. M. Kolesnikov, I. M. Blankinshtein // Intellect. Innovation. Investments. – 2018. – No. 2. – P. 84-89.

10 Malinin, A.V. The influence of antifriction ceramic coatings in bearing matings on the efficiency of a turbocharger / A.V. Malinin, A.G. Ipatov, S.N. Shmykov // Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy. – 2023. – No. 2(74). – pp. 71-75.

11 Markov, V. A. Comparative analysis of alternative motor fuels for diesel engines / V. A. Markov, E. V. Bebenin, S. P. Gladyshev // News of universities. Mechanical engineering. – 2014. – No. 5 (650). – P. 43 – 48.

12 Methods and results of tribological studies of mixed camelina-mineral fuel / A. P. Ukhanov, V. A. Machnev, E. G. Rotanov [etc.] // Science in Central Russia. – 2019. – No. 2(38). – pp. 108-116.

13 Gazprom Gas Engine Fuel LLC: website. St. Petersburg, 2023. URL: <https://gmt.gazprom.ru/about/avtomobilnoe-toplivo-ecogas/> (access date 09.17.2023).

14 Patent No. 2320731 C2 Russian Federation, IPC C21D 8/00. Method of high-temperature thermomechanical processing of cylindrical blanks of variable cross-section and device for its implementation: No. 2006113895/02: application. 04/24/2006: publ. 03/27/2008 / V. B. Demytyev, A. D. Zasyupkin; applicant Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

15 Posmetyev, V.I. Assessing the effectiveness of a promising combined technology for restoring the crankshaft journals of engines of timber road trains / V.I. Posmetyev, A.M. Kadyrmetov, V.O. Nikonov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2021. – T. 4, No. 4(38). – P. 86-101.

16 Rusakov, A. A. Radiography of metals / A. A. Rusakov. – Moscow: Atomizdat, 1977. – 480 p.

17 Skryabin, V. A. Metallographic analysis of samples from powder materials / V. A. Skryabin, A. E. Zverovshchikov // All materials. Encyclopedic reference book. – 2019. – No. 3. – P. 33-36.

18 Strengthening parts of the gas distribution mechanism of internal combustion engines with galvanic coating / Yu. P. Gnezdilova, A. I. Perkov, V. V. Kamenev, I. A. Demidova // Youth science - a guarantor of innovative development of the agro-industrial complex: materials of the X All-Russian (national) scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists, Kursk, December 19–21, 2018. Volume Part 3. – Kursk: Kursk State Agricultural Academy. – 2019. – pp. 273-277.

19 Federal State Statistics Service: website. Moscow, 2023. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/131_23-08-2023.html (access date 09/17/2023).

20 Shiganov, I. N. Modification of the surface of aluminum alloys with silicon carbides using the laser melting method / I. N. Shiganov, P. E. Samarin // Engineering journal: science and innovation. – 2012. – No. 6 (6). – P. 4–11.

21 Tribological performance of boron-based superhard coatings sliding against different materials / E. V. Kharanzhevskiy [et al.] // Wear. – 2021. – T. 477. – P. 203 – 835.

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-11-21



УДК 621.8

UDC 621.8

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА КОНЦЕНТРАЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ

THEORETICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF CORROSION OF THE SURFACE OF MACHINE PARTS ON THE STRESS CONCENTRATION IN THE SURFACE LAYER OF THE MATERIAL OF THE PARTS

✉¹ **Безъязычный Вячеслав Феоктистович**, д.т.н., проф. кафедры авиационных двигателей и общего машиностроения, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева, г. Рыбинск e-mail: technology@rsatu.ru

✉¹ **Bezjazychnyi Vyacheslav Feoktistovich**, doctor of technical sciences, professor of the department of aircraft engines and general mechanical engineering, Rybinsk state aviation technical university named after P. A. Solovyov, Rybinsk, e-mail: technology@rsatu.ru

Плешкун Владислав Валерианович, заместитель главного технолога ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск.

Pleshkun Vladislav Valerianovich, deputy chief technologist of PJSC UEC-Saturn, Rybinsk.

Аннотация. Изложены результаты исследования влияния коррозии поверхности детали после механической обработки лезвийным инструментом на показатель прочности материала детали, характеризуемый концентрацией напряжений в поверхностном слое материала деталей – эффективным коэффициентом концентрации напряжений. Представлена расчетная зависимость и результаты расчета с оценкой степени изменения влияния коррозии на шероховатость поверхности и ее влияние на изменение коэффициента концентрации напряжений.

Annotation. The results of the study of the effect of corrosion of the surface of the part after machining with a blade tool on the strength index of the material of the part, characterized by the stress concentration in the surface layer of the material of the parts - the effective stress concentration coefficient. The calculated dependence and calculation results are presented with an assessment of the degree of change in the effect of corrosion on the surface roughness and its effect on the change in the stress concentration coefficient.

Ключевые слова: ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ, ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ, КОРРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ, КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ.

Keywords: CUTTING, SURFACE LAYER, SURFACE CORROSION, STRESS CONCENTRATION IN THE MATERIAL OF THE SURFACE LAYER.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В материалах деталей машин, в том числе и в материалах деталей ГТД, в силу их конструктивных особенностей, а также в силу особенностей их работы, возможно создание концентрации напряжений, т. е. неравномерное их распределение в материале детали, которое характеризуется коэффициентом концентрации напряжений.

Концентрация напряжений при простом напряженном состоянии оценивается теоретическим концентратором напряжений α_σ , равным отношению напряжения при наличии концентратора к напряжению в той же точке при отсутствии концентратора. При усталостном знакопеременном нагружении деталей концентрация напряжений оценивается эффективным концентратором напряжений K_σ , который характеризует отношение предела выносливости образца с концентрацией напряжений к пределу выносливости гладкого образца такого же размера без концентрации напряжений [1-6].

Концентратором напряжений в материале деталей при усталостном нагружении может быть и шероховатость поверхности [1]. Учитывая тот факт, что шероховатость поверхности в процессе эксплуатации вследствие коррозионного воздействия изменяется [7], можно сделать вывод о влиянии коррозионного процесса на усталостную прочность детали, оцениваемую пределом выносливости материала детали σ_{-1} [2, 3].

К сожалению, надлежащим образом этот вопрос изучен недостаточно. Практически отсутствуют сведения о степени и характере влияния изменения шероховатости поверхности детали в процессе эксплуатации вследствие коррозионных процессов. Известные авторам данной работы научные и практические публикации по проблеме коррозии деталей машин, в том числе авиационных газотурбинных двигателей, относятся к вопросам химических процессов коррозии, а также к вопросам получения материалов с целью снижения влияния коррозии на эксплуатационные свойства деталей машин [8-14]. В связи с изложенным вопрос изучения влияния коррозионных процессов на изменение прочностных характеристик материала поверхностного слоя детали, в частности, на изменение эффективного коэффициента концентрации напряжений, в том числе в авиадвигателестроении, является актуальной задачей. Для целей исследования, по мнению авторов, потребовалось на основе исследований [1] разработать расчетную зависимость для проведения исследования.

2 Материалы и методы

Обоснование расчетной зависимости для определения коэффициента концентрации напряжений в поверхностном слое материала детали

Для условий оптимального резания, характеризуемого минимумом износа режущего инструмента [15], используя факт стабильности процесса резания и, как следствие, высоты неровностей на обработанной поверхности, можно определять влияние условий обработки, в частности режимов резания, на предел выносливости материала детали эффективным коэффициентом концентрации напряжений [2]:

$$K_\sigma = 1 + q_\sigma(\alpha_\sigma - 1),$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации нормальных напряжений: при кручении и сдвиге $\alpha_\sigma = 1 + \sqrt{\gamma t / \rho}$; при растяжении и изгибе $\alpha_\sigma = 1 + 2\sqrt{\gamma t / \rho}$, где t – максимальная глубина впадины концентратора напряжений; ρ – радиус кривизны на дне впадины; γ – коэффициент, зависящий от отношения шага неровностей к их высоте; q_σ – коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений.

Значение коэффициента γ может быть определено по рекомендациям [3], однако более удобным является использование зависимости, полученной на основе данных, приведенных в

этой работе, с использованием которых построены графики, представленные на рис. 1 и 2, на основе которых получена зависимость вида: $\gamma = x \cdot (Sm/Rz)^y$, где Sm – средний шаг неровностей по средней линии; Rz – высота неровностей на поверхности. Значение коэффициента x и показателя степени y в формуле при различных значениях соотношения Sm/Rz представлены в табл. 1.

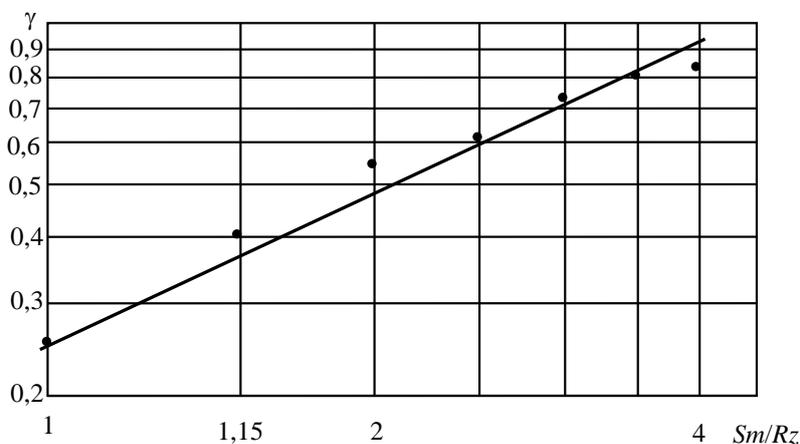


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента γ от величины отношения шага неровностей к их высоте (Sm/Rz до 4)

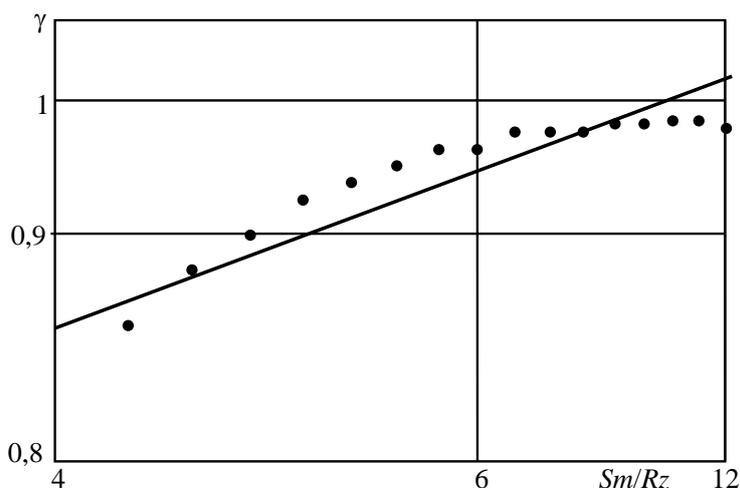


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента γ от величины отношения шага неровностей к их высоте (Sm/Rz от 4 и более)

Таблица 1 – Значения x и y в формуле для определения γ

Значения Sm/Rz	x	y	При R^2
до 4	0,25	0,944	0,9859
от 4 и выше	0,76	0,134	0,8155

Значение q_σ определяется по формуле $q_\sigma = 1/(1 + a/r_{\text{ВП}})$, где a – константа материала [4]. Значения её следует принимать в зависимости от предела прочности материала детали на растяжение из таблицы, приведенной в [3]. Однако более удобно использовать зависимость, полученную с использованием графика, представленного на рис. 3 и построенного на основе данных, приведенных в [3].

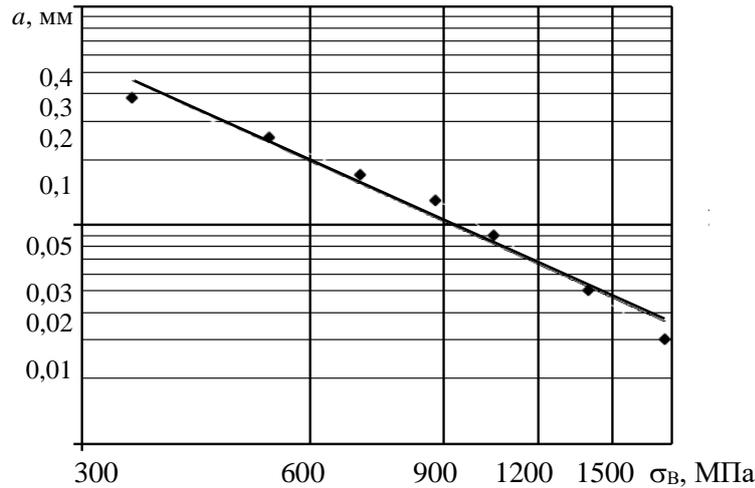


Рисунок 3 – Значение коэффициента a в зависимости от предела прочности материала на разрыв σ_B

На основе графика (рис. 3) при $R^2 = 0,9729$ значение a определяется по формуле, мкм:

$$a = 4610\sigma_B^{-1,573},$$

где σ_B – предел прочности материала детали на разрыв, МПа.

Принимаем $t = Rz$, так как высота микронеровностей на поверхности при обработке с оптимальной температурой резания $Rz = R_{max}$, где Rz – высота неровностей на обработанной поверхности, R_{max} – максимальная высота неровностей.

С учётом вышеизложенного и того, что $Ra = 0,2Rz$ [17], после преобразования формула для определения α_σ при кручении и сдвиге принимает вид

$$\alpha_\sigma = 1 + 2,58 \left(\frac{Rz}{Sm} \right) \sqrt{x \left(\frac{Sm}{Rz} \right)^y},$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля.

Принимая $\rho = r_{вп} = 0,03(Sm/Ra)$ [17], где $r_{вп}$ – радиус кривизны впадин профиля неровностей, после преобразований эффективный коэффициент концентрации напряжений может быть определен по формулам:

– при кручении и сдвиге

$$K_\sigma = 1 + \frac{0,387 RzSm}{0,15Sm^2 + aRz} \sqrt{x(Sm/Rz)^y}; \quad (1)$$

– при растяжении и изгибе

$$K_\sigma = 1 + \frac{0,774 RzSm}{0,15Sm^2 + aRz} \sqrt{x(Sm/Rz)^y}. \quad (2)$$

3 Результаты исследований

Были выполнены расчеты значений K_{σ} для образцов из стали 30ХГСА, фрагмент которых представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Фрагмент расчета изменений коэффициентов концентрации напряжений в поверхностном слое материала детали (сталь 30ХГСА) вследствие коррозии в процессе эксплуатации

Условия обработки	S , мм/об	S_m , мкм	$Rz_{исх}$, значение после обработки (изготовления), мкм	τ , год эксплуатации	Rz , значение после эксплуатации, мкм	$K_{\sigma 1}$, кручение и сдвиг	$K_{\sigma 2}$, растяжение и изгиб	$(K_{\sigma 2 кор} - K_{\sigma 2 исх}) / K_{\sigma 2 исх}$, %
$V = 150$ м/мин; $r = 1$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 15^\circ$; $t = 0,5$ мм; $\rho_1 = 20$ мкм	0,1	141	2,5 $K_{\sigma 1} = 1,049$, $K_{\sigma 2} = 1,097$	1	4,298	1,077	1,153	5,10
				2	4,76	1,083	1,167	6,38
				3	5,081	1,088	1,176	7,20
				4	5,335	1,091	1,183	7,84
				5	5,549	1,094	1,188	8,30
	0,15	183	4,2 $K_{\sigma 1} = 1,062$, $K_{\sigma 2} = 1,124$	1	6,435	1,089	1,177	4,72
				2	7,01	1,095	1,19	5,87
				3	7,412	1,1	1,199	6,67
				4	7,731	1,103	1,206	7,30
				5	7,799	1,104	1,208	7,47
	0,2	247	7,7 $K_{\sigma 1} = 1,082$, $K_{\sigma 2} = 1,164$	1	10,579	1,108	1,216	4,47
				2	11,323	1,114	1,228	5,50
				3	11,843	1,118	1,237	6,27
				4	12,256	1,122	1,244	6,87
				5	12,604	1,125	1,249	7,30
	0,25	302	11,5 $K_{\sigma 1} = 1,099$, $K_{\sigma 2} = 1,198$	1	14,904	1,124	1,247	4,09
				2	15,785	1,13	1,26	5,18
				3	16,401	1,134	1,268	5,84
				4	16,891	1,137	1,275	6,43
				5	17,303	1,14	1,28	6,84

Учитывая, что шероховатость обработанной поверхности в наибольшей степени зависит от подачи S , радиуса при вершине резца в плане r и радиуса округления режущей кромки резца ρ_1 , был выполнен анализ влияния этих параметров процесса резания на значение эффективного коэффициента напряжений K_{σ} .

Характер влияния на значение эффективного коэффициента концентрации напряжений в материале поверхностного слоя детали изменения скорости резания V и подачи S для материала 30ХГСА представлен на рис. 4.

Зависимость изменения $K_{\sigma_{2 кор}}$ от радиуса скругления лезвия резца r при вершине приведена на рис. 5.

Изменение $K_{\sigma_{2 кор}}$ от радиуса округления лезвия режущей кромки ρ_1 представлено на рис. 6.

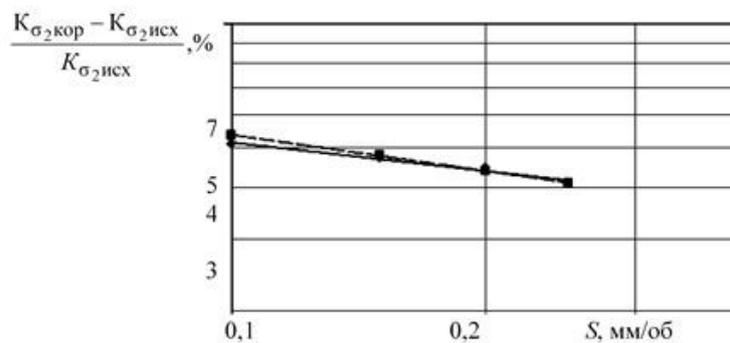


Рисунок 4 – Зависимость изменения $K_{\sigma_2\text{кор}}$ от скорости резания и подачи при длительности эксплуатации один год

Обозначения на рис. 4:

$$\begin{aligned} \text{—} \quad V = 150 \text{ м/мин, } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 3,0233 S^{-0,231}, \% , \\ \text{- - - - -} \quad V = 190 \text{ м/мин, } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 2,7327 S^{-0,294}, \% , \\ \text{- - - - -} \quad V = 250 \text{ м/мин, } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 2,7542 S^{-0,29}, \% . \end{aligned}$$

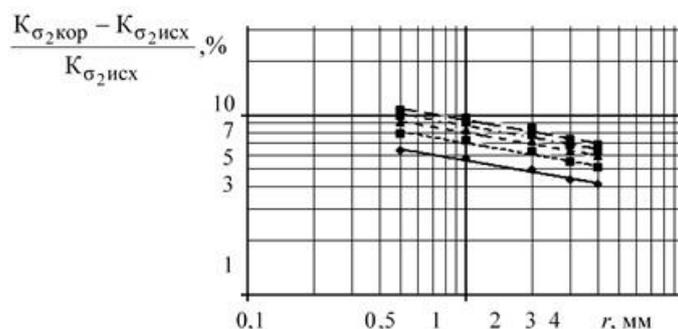


Рисунок 5 – Зависимость изменения $K_{\sigma_2\text{кор}}$ от радиуса скругления лезвия при вершине резца в плане

Обозначения на рис. 5:

$$\begin{aligned} \text{—} \quad \text{при эксплуатации 1 год: } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 5,5789 r^{-0,21}, \% , \\ \text{- - - - -} \quad \text{при эксплуатации 2 года: } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 6,9918 r^{-0,212}, \% , \\ \text{- - - - -} \quad \text{при эксплуатации 3 года: } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 7,9847 r^{-0,211}, \% , \\ \text{- \cdot - \cdot -} \quad \text{при эксплуатации 4 года: } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 8,7434 r^{-0,217}, \end{aligned}$$

$$\text{---} \text{---} \text{---} \text{ при эксплуатации 5 лет: } \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 9,3854 r^{-0,215} .$$

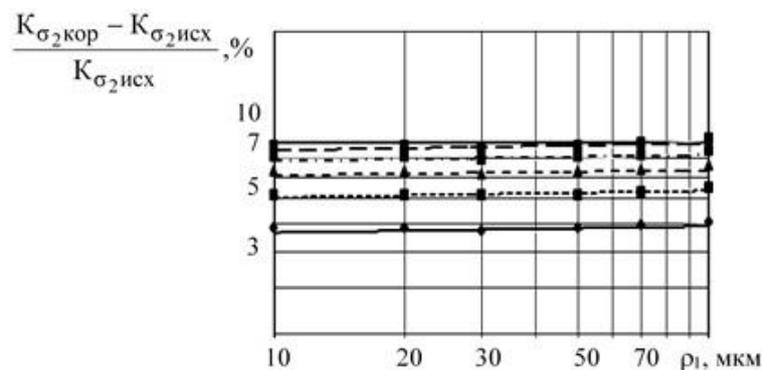


Рисунок 6 – Изменение $K_{\sigma_2\text{кор}}$ от радиуса округления режущей кромки резца ρ_1

Обозначения на рис. 6:

————— при эксплуатации 1 год: $\frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 5,4383 \rho_1^{-0,0173} ,\% ,$
 - - - - - при эксплуатации 2 года: $\frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 6,7775 \rho_1^{-0,0181} ,\% ,$
 при эксплуатации 3 года: $\frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 7,8681 \rho_1^{-0,0137} ,\% ,$
 - при эксплуатации 4 года: $\frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 8,5662 \rho_1^{-0,0161} ,\% ,$
 --- --- при эксплуатации 5 лет: $\frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 9,0923 \rho_1^{-0,0192} ,\% .$

Полученные математические зависимости для определения изменения эффективного коэффициента концентрации напряжений в поверхностном слое материала детали, обусловленного коррозионным процессом при эксплуатации, позволяют прогнозировать изменения предела выносливости материала поверхностного слоя детали. Это возможно в соответствии с алгоритмом, представленном на рис. 7. Описание алгоритма представляет методику расчетного определения изменения предела выносливости материала поверхностного слоя детали в процессе эксплуатации, которая заключается в следующем:

1) Исходя из марки материала детали и вида термической обработки заготовки по соответствующим справочникам определяются свойства обрабатываемого материала: предел прочности на разрыв σ_B , предел текучести σ_T , сопротивление обрабатываемого материала пластичному сдвигу τ_p , удельная объемная теплопроводность c_p , коэффициент теплопроводности λ , температуропроводность a и др.

2) В соответствии с разработанной технологией изготовления детали определяется режим резания (скорость резания V , подача S и глубина резания t), геометрические элементы режущей части инструмента (задний α и передний γ углы резца, главный ϕ и вспомогательный

φ_1 углы реза в плане, радиусы при вершине реза в плане r и округления режущей кромки реза) и др.

3) Определяется величина параметра шероховатости обработанной поверхности $Rz_{исх}$, мкм:

$$Rz_{исх} = \frac{1}{8r} \left\{ \frac{0,6625 a_1^{0,125} c_p \rho \theta_0 \left[4,3(\sin \alpha)^{0,115} V_o^{0,57} a_1^{0,345} \lambda \left(\frac{t}{m} \right)^{0,3} + \lambda_p \beta \varepsilon a^{0,57} \rho_1^{0,075} \right]}{\left[\tau_p a^{-0,42} (\sin \alpha)^{0,025} V_o t^{0,25} m^{0,75-n_o} C_o b^{0,04} \rho_1^{n_o-0,1} (1 - 0,45 \sin \gamma) \right]} \right\}^{\frac{2}{1-n_o}},$$

где a_1 и t – толщина среза и глубина резания при обработке, м; V_o – оптимальная скорость резания, м/с; α и γ – задний и передний углы режущей части инструмента, градус; a – температуропроводность материала обрабатываемой детали, м²/с; λ и λ_p – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов, Вт/м·К; β и ε – угол заострения и угол при вершине реза в плане, радиан; r и ρ_1 – радиус при вершине реза в плане и радиус округления режущей кромки инструмента, м; c_p – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/м³·К; θ_0 – оптимальная температура в зоне резания, °С; τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, МПа; b – длина контакта режущих кромок инструмента с обрабатываемой деталью, м; m – безразмерная величина, зависящая от соотношения подачи и глубины резания, а также геометрических параметров режущей части инструмента [17]; c_o и n_o – постоянные для конкретного сочетания обрабатываемого и инструментального материалов [17].

4) Определяется комплексный параметр скорости коррозионного изнашивания K_c обработанной поверхности в процессе эксплуатации по формуле:

$$K_c = b_o U_H^{b_1} \sqrt{\frac{770}{Sm}},$$

где U_H – степень наклепа материала поверхностного слоя детали после обработки, %; Sm – шаг неровностей по средней линии, мкм; b_o и b_1 – коэффициенты, зависящие от марки и состояния материала (после термической обработки) [19].

5) Определяется скорость коррозионного изнашивания $V_K = V_{K_0} \cdot K_c$,

где V_{K_0} – скорость коррозии образца сравнения, определяемая по формуле в соответствии с методикой Федонина О. Н. [18-21].

6) Определяется параметр шероховатости поверхности Rz после коррозионного воздействия на поверхностный слой материала детали по формулам, мкм:

$$Rz = Rz_{исх} + 3 \sqrt{\frac{3V_K \tau S_m Rz_{исх}}{4 \sin \beta}} + V_K \tau (1 - K_B), \text{ мкм}$$

или

$$Rz = 10,7 \tau^{0,8146} V^{0,1159} \tau^{-0,0059} S^{1,6085} \tau^{-0,057} t^{0,216} \tau^{-0,0064} r^{0,5053} \tau^{-0,087} \rho_1^{0,2498} \tau^{-0,0063} \varphi^{0,1632} \tau^{-0,065},$$

где τ – время корродирования, год; $K_B = 1,28 \dots 2,0$ – коэффициент, учитывающий соотношение скорости коррозии материала выступов и впадин неровностей; β – угол наклона профиля шероховатости, рад; φ – главный угол резца в плане.

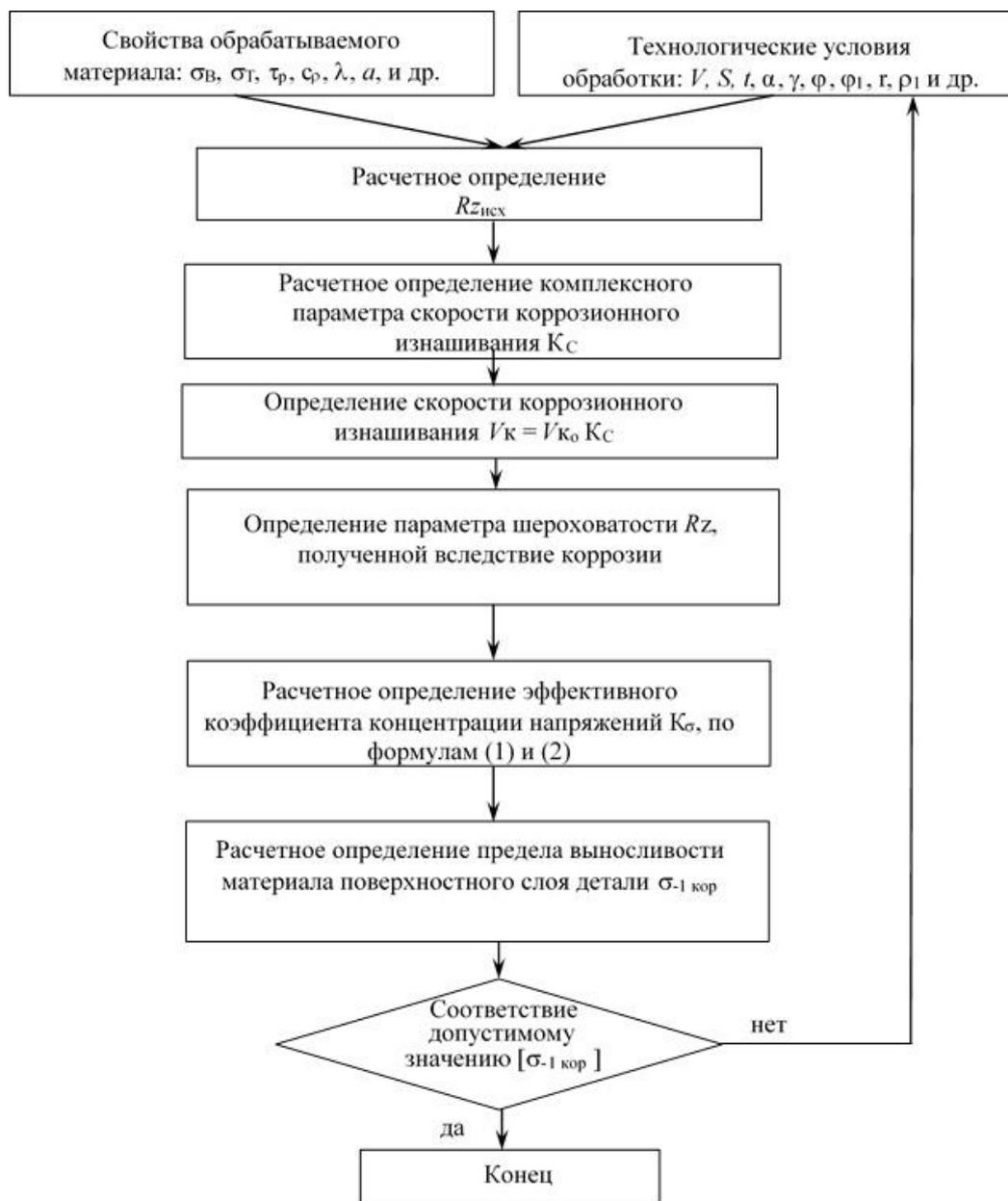


Рисунок 7 – Алгоритм расчетного определения эффективного коэффициента концентрации напряжений во взаимосвязи с технологическими условиями обработки

7) Определяется эффективный коэффициент концентрации напряжений в материале поверхностного слоя детали по формулам (1) и (2).

8) Определяется предел выносливости материала поверхностного слоя детали после коррозии $\sigma_{-1\text{ кор}}$ по формуле $\sigma_{-1\text{ кор}} = \sigma_{-1} / K_\sigma$, где σ_{-1} – предел выносливости исходного материала детали. Если $\sigma_{-1\text{ кор}}$ соответствует допустимому значению, то расчет закончен. Если нет, то необходимо скорректировать технологические условия обработки с целью обеспечения требуемого значения $\sigma_{-1\text{ кор}}$ при заданном периоде эксплуатации детали.

4 Обсуждение и заключение

Установлено, что коэффициент концентрации напряжений в поверхностном слое материала детали при коррозионном воздействии на него возрастает по сравнению с коэффициентом без коррозионного воздействия на величину от 5 до 9 процентов, что существенно при оценке прочностных характеристик детали.

Из режимных параметров процесса обработки на изменение эффективного коэффициента концентрации напряжений наибольшее влияние оказывает подача. Скорость резания в интервале рациональных режимов резания практически не влияет на изменение коэффициента концентрации напряжений в поверхностном слое материала детали.

Существенное влияние на изменение коэффициента напряжений оказывает влияние радиус при вершине резца в плане и радиус округления режущей кромки резца.

Разработанный алгоритм расчетного определения эффективного коэффициента концентрации напряжений во взаимосвязи с технологическими условиями обработки поверхности детали позволяет прогнозировать назначение последних с учетом допустимого значения коэффициента концентрации напряжений.

Список литературы

- 1 Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шор, Г. Б. Иосилевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
- 2 Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие. Изд. 3-е, переработанное и дополненное / Под ред. Серенсена С. В. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
- 3 Петерсон, Р. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1977. – 302 с.
- 4 Елизаветин, М. А. Повышение надежности. Изд. 2-е переработ. и доп. М.: Машиностроение, 1973. – 430 с.
- 5 Сатель Э.А., Елизаветин М. А. Технологические методы повышения качества поверхностного слоя деталей машин. Сборник № 5: «Качество поверхности деталей машин». АН СССР, 1961. – С. 21-26.
- 6 Хевиленд, Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность. М.– Л. «Энергия», 1966. – 231 с.
- 7 Безъязычный В. Ф., Клейменов В. В., Плешкун В. В. К вопросу расчетного определения степени коррозионного влияния в процессе эксплуатации на шероховатость обработанной поверхности // Вестник РГАТУ, № 2(65), 2023. – С. 115-121.
- 8 Братухин Л. Я., Гуревич Л. Я. Коррозионная стойкость высокопрочных нержавеющей сталей. – М.: Авиатехинформ, 1999. – 288 с.
- 9 Братухин, А. Г. Технологическое обеспечение высокого качества надежности, ресурса авиационной техники. – М.: Машиностроение, 1966. – Том I. – 550 с.; том II. – 296 с.
- 10 Логан, Х. Л. Коррозия металлов под напряжением. – М.: Металлургия, 1970. – 340 с.
- 11 Коррозионная стойкость нержавеющей сталей применительно к авиационной технике // Справочное пособие под ред. Л. Я. Гуревич и А. Д. Жирнова. – М.: ВИАМ, 1988.
- 12 Ву Динь Вуй. Атмосферная коррозия металлов в тропиках. – М.: Наука 1994. – 240 с.
- 13 Розенфельд, И. Л. Атмосферная коррозия металлов. – М.: АН СССР, 1960. – 375 с.
- 14 Карненко, Г. В. Прочность стали в коррозионной среде. Киев, Машгиз, 1963. – 188 с.
- 15 Похмурский, В. И. Коррозионная усталость металлов. М.: Металлургия, 1985. – 207 с.
- 16 Макаров, А. В. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 264 с.
- 17 Безъязычный, В. Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.
- 18 Инженерия поверхности деталей / Колл. Авт.; под ред. А. Г. Сулова, М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

19 Федонин, О. Н. Инженерия поверхности детали с позиции ее коррозионной стойкости // Справочник. Инженерный журнал. Приложение № 10. – 2001.– С. 17-19.

20 Суслов А. Г., Дальский А. М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002.– 684 с.

21 Справочник технолога машиностроителя: В 2т / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001.– Т.2.– 944 с.

References

1 Birger I. A. et al. Calculation of the strength of machine parts: Handbook / I. A. Birger, B. F. Shor, G. B. Iosilevich.– 3rd ed., reprint. and additional – M.: Mechanical Engineering, 1979.– 702 p.

2 Serensen S. V., Kogaev V. P., Schneiderovich R. M. Bearing capacity and calculations of machine parts for strength: Manual and reference manual. 3rd edition, revised and supplemented / Ed. Serensen S. V. – M.: Mechanical Engineering, 1975.– 488 p.

3 Peterson R. Stress concentration coefficients.– M.: Mir, 1977.– 302 p.

4 Elizavetin M. A. Improving reliability. Ed. 2nd perabot. and additional M.: Mashinostroenie, 1973.– 430 p.

5 Satel E.A., Elizavetin M. A. Technological methods for improving the quality of the surface layer of machine parts. Collection No. 5: "Surface quality of machine parts". ANSSSR, 1961.– pp. 21-26.

6 Haviland R. Engineering reliability and durability calculation. M.– L. "Energy", 1966.– 231 p.

7 Bezylazny V. F., Kleimenov V. V., Pleshkun V. V. On the issue of the calculated determination of the degree of corrosion effect during operation on the roughness of the treated surface // Bulletin of RGATU, № 2(65), 2023.– Pp. 115-121.

8 Bratukhin L. Ya., Gurevich L. Ya. Corrosion resistance of high-strength stainless steels.– M.: Aviatekhninform, 1999.– 288 p

9 Bratukhin A. G. Technological assurance of high-quality reliability, the resource of aviation equipment. – M.: Mechanical Engineering, 1966. – Volume I.– 550 p.; volume II. – 296 p.

10 Logan H.L. Corrosion of metals under stress. – M.: Metallurgia, 1970.– 340s.

11 Corrosion resistance of stainless steels in relation to aviation technology // Reference manual edited by L. Ya. Gurevich and A.D. Zhirnov.– M.: VIAM, 1988.

12 Wu Dinh Vui. Atmospheric corrosion of metals in the tropics.– M.: Nauka 1994.– 240 p.

13 Rosenfeld I. L. Atmospheric corrosion of metals. – M.: USSR Academy of Sciences, 1960.– 375 p.

14 Karnenko G. V. Strength of steel in a corrosive environment. Kiev, Mashgiz, 1963.–188 p.

15 Pokhmursky V. I. Corrosion fatigue of metals. M.: Metallurgy, 1985.–207 p.

16 Makarov A.V. Optimization of cutting processes. –M.: Mechanical Engineering, 1976.–264 p.

17 Bezjazychnyi V. F. Similarity method in mechanical engineering technology. – M.: Mashino-stroenie, 2012.– 320 p.

18 Engineering of the surface of parts / Coll. Auth.; edited by A. G. Suslov, M.: Mashinostroenie, 2008.– 320 p.

19 Fedonin O. N. Engineering of the surface of a part from the standpoint of its corrosion resistance // Handbook. Engineering magazine. Appendix No. 10 2001.– pp. 17-19.

20 Suslov A. G., Dalsky A.M. Scientific foundations of mechanical engineering technology. M.: Mechanical Engineering, 2002.– 684 p.

21 Handbook of a machine–building technologist: In 2t / edited by A.M. Dalsky, A. G. Suslov, A. G. Kosilova, R. K. Meshcheryakova - 5th ed., reprint. and additional. – M.: Mashinostroye-1, 2001.– Vol.2.– 944 p.

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-22-30



УДК 621.7.09

UDC 621.7.09

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

УДАЛЕНИЕ ЗАУСЕНЦЕВ И СКРУГЛЕНИЕ ОСТРЫХ КРОМОК ВИБРАЦИОННОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКОЙ НА ДЕТАЛЯХ ИЗ БРОНЗЫ

✉¹ **Прокопец Галина Анатольевна**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-На-Дону, e-mail: galinepr@mail.ru

Мельникова Елена Павловна, д.т.н., заведующая кафедрой «Менеджмент организаций», Автомобильно-дорожный институт (филиал) ФГБОУ ВО Донецкого национального технического университета, г. Горловка.

Прокопец Анатолий Александрович, ведущий инженер кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-На-Дону.

Аннотация. Образующиеся в процессе лезвийной обработки деталей заусенцы и острые кромки должны быть удалены. Одним из эффективных методов их удаления является вибрационная абразивная обработка. Представленные результаты исследований объясняют механизм удаления заусенцев и скругления кромок деталей при данной обработке и могут быть использованы при проектировании соответствующей оптимальной технологической операции для ответственных деталей средних размеров из бронзы. Приведены результаты исследований по выбору обрабатывающих сред, режима обработки. На основе результатов проведенных экспериментов получены графические зависимости и проведен их анализ, сделаны выводы, приведены практические рекомендации.

DEBURRING AND ROUNDING OF SHARP EDGES BY VIBRATION ABRASIVE TREATMENT ON BRONZE PARTS

✉¹ **Prokopets Galina Anatolevna**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of Mechanical engineering technology, Don state technical university, Rostov-On-Don, e-mail: galinepr@mail.ru

Melnikova Elena Pavlovna, doctor of technical sciences, head of the department Management of organizations, Automobile and road institute (branch) of the Donetsk national technical university, Gorlovka.

Prokopets Anatoly Alexandrovich, leading engineer of the department of Mechanical Engineering technology, Don state technical university, Rostov-On-Don.

Annotation. The burrs and sharp edges formed during the blade processing of parts must be removed. One of the effective methods of their removal is vibration abrasive treatment. The presented research results explain the mechanism for removing burrs and rounding the edges of parts during this processing and can be used in designing the corresponding optimal technological operation for critical medium-sized bronze parts. The results of research on the choice of processing media and processing mode are presented. Based on the results of the experiments, graphical dependencies were constructed and analyzed, conclusions were drawn, and practical recommendations were given.

Ключевые слова: КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ, ЗАУСЕНЕЦ, ОСТРАЯ КРОМКА, ВИБРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА, ОБРАБАТЫВАЮЩАЯ СРЕДА, РЕЖИМ ОБРАБОТКИ, ОПТИМИЗАЦИЯ.

Keywords: SURFACE QUALITY, BURR, SHARP EDGE, VIBRATION-ABRASIVE TREATMENT, PROCESSING MEDIUM, PROCESSING MODE, OPTIMIZATION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В современном машиностроении широко распространены методы лезвийной обработки. При обработке многих материалов в результате лезвийной обработки на кромках деталей образуются заусенцы, формируются острые кромки. Обломившийся заусенец может привести к выходу из строя изделия или повышенному износу ответственных поверхностей. Острые кромки могут поранить руки оператора, могут выкрашиваться и загрязнять обрабатывающую среду и т.д. Именно поэтому на чертежах многих деталей в машиностроении конструктор указывает техническое требование по скруглению острых кромок и удалению заусенцев.

Существует достаточно много методов удаления заусенцев и скругления острых кромок: обработка металлорежущим инструментом в конце операции формообразования, электрохимическая обработка, обработка абразивным инструментом, в том числе и на слесарных операциях и др. Одним из эффективных методов удаления заусенцев и скругления острых кромок является обработка свободным абразивом, в частности, вибрационная абразивная обработка [1-4].

Преимуществами этого метода обработки являются безразмерность (формообразующие размеры детали при обработке в течение времени, необходимого для удаления заусенцев и скругления острых кромок, практически не изменяются), равномерность обработки поверхностей, возможность одновременной обработки деталей различной формы, близких по своим геометрическим и размерным характеристикам, а также физико-механическим свойствам материала, одинаковость параметров шероховатости по всем направлениям (стохастичность микрорельефа) и др.

На рис. 1 представлена 3D-модель четырехкамерной вибрационной установки для виброабразивной обработки (на схеме условно не показана система промывки технологической жидкостью и двигатель с гибкой муфтой). Рабочие камеры заполняются обрабатывающей средой требуемых характеристик на 70-75 % объема. Обрабатывающая среда при виброабразивной обработке в обязательном случае включает массив абразивных частиц, а также может включать технологическую жидкость и другие элементы, обусловленные целью обработки. Однако иногда обработка может осуществляться и «всухую» без промывки. Режимы обработки устанавливаются за счет изменения угла между дебалансными грузами вибратора (определяющими амплитуду A колебаний рабочей камеры, мм) и за счет изменения числа оборотов вала вибратора (определяющего частоту колебаний f рабочей камеры, Гц). В зависимости от типа (серийности) производства возможны различные схемы обработки. На установку могут устанавливаться от одной до четырех рабочих камер, которые заполняются обрабатывающими средами различных или идентичных характеристик. В одну рабочую камеру допускается при одинаковой цели обработки загружать различные детали (с соблюдением допустимого разброса геометрических, в том числе, микрогеометрических характеристик деталей и физико-механических свойств деталей). Возможны: поэтапная обработка с изменением режимов обработки при прочих равных условиях; обработка деталей в закрепленном состоянии; обработка в состоянии свободной загрузки в обрабатывающую среду и др. С одной стороны, эти факторы обеспечивают высокую гибкость технологии, а с другой, усложняют оптимизацию процесса, особенно по трудоемкости, и требуют учета значительного числа ограничений.

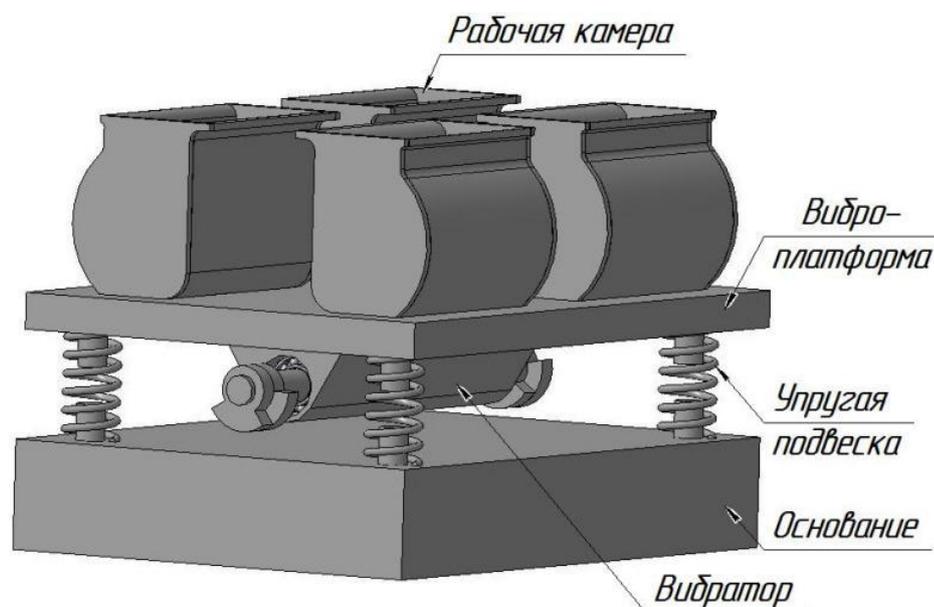


Рисунок 1 – Установка для виброабразивной обработки (система промывки и двигатель условно не показаны)

Удаление заусенцев и скругление кромок на деталях в процессе виброабразивной обработки обеспечивается за счет псевдотекучести обрабатываемой абразивной среды, а также за счет ее интенсивного перемешивания под действием направленных вибраций [5-7]. Нормальные соударения частиц обрабатываемой среды с поверхностью обрабатываемой детали при вибрационной обработке составляют малую часть соударений. Основная часть соударений идет под тупым углом к обрабатываемой поверхности, поэтому обрабатываемая среда огибает поверхность обрабатываемой детали, как бы «перетекает» по поверхности. При этом частицы обрабатываемой среды встречают наибольшее сопротивление движению на заусенцах, а также на выступках и кромках детали, что и создает условия для более интенсивной обработки указанных элементов поверхности. Повышение интенсивности обработки в области расположения на детали заусенцев и острых кромок обусловлено также уменьшением площади контакта взаимодействующих элементов и, как следствие, увеличением удельного давления в контакте частицы обрабатываемой среды и обрабатываемой поверхности и, соответственно, увеличением глубины внедрения частиц обрабатываемой среды в материал обрабатываемой детали.

Механизм удаления заусенцев в зависимости от физико-механических характеристик материала обрабатываемых деталей несколько различается. При обработке сравнительно хрупких материалов с грубыми заусенцами на первом этапе обламываются большие гребешки, а затем остатки удаляются срезанием мельчайших частиц металла. При обработке пластичных материалов, как правило, на первом этапе грубые заусенцы загибаются и значительно реже обламываются. В дальнейшем происходит их последовательное срезание небольшими объемами абразивными частицами обрабатываемой среды. В соответствии с этим и должен производиться выбор вида, размеров и зернистости абразивных частиц обрабатываемой среды, должны определяться режимы обработки, необходимость закрепления деталей и т.д.

В связи со значительной сложностью процессов, имеющих место при протекании процесса виброабразивной обработки, четкое прогнозирование ее результатов и однозначный расчет режима обработки затруднены. Поэтому требуются экспериментальные исследования для уточнения параметров обработки и выработки технологических инструкций для обработки заготовок с учетом материала деталей, исходной шероховатости и ограничений.

2 Материалы и методы

Основная задача исследований: определение основных особенностей удаления заусенцев и скругления острых кромок на ответственных деталях средних размеров из бронзы, выявление наиболее подходящих обрабатывающих сред и режимов обработки.

При постановке задачи по удалению заусенцев и скруглению острых кромок на деталях из бронзы, с учетом привязки к группе конкретных деталей, необходимо учитывать следующие основные особенности и ограничения:

- операция удаления заусенцев и скругления острых кромок – финишная, то есть все остальные геометрические, микрогеометрические и размерные характеристики готовой детали обеспечены предшествующими операциями;
- предельные отклонения размеров деталей, входящих в группу, соответствуют 7-8 квалитету точности, то есть съём материала с поверхности детали не должен приводить к выходу наиболее точных размеров детали за пределы допуска;
- минимальная шероховатость поверхностей деталей группы, равная Ra 0,63 мкм, достигается на предыдущих операциях;
- на ряде поверхностей деталей, работающих в условиях трения скольжения, не допускается шаржирование;
- радиус скругления кромок – не более 0,1 мм.

Таким образом, основной задачей вибрационной обработки деталей группы является удаление заусенцев с последующим скруглением острых кромок до радиуса 0,01 ... 0,1 мм на кромках детали за оптимальное время обработки с сохранением ранее достигнутого качества ответственных поверхностей и размерной точности детали. Это связано с тем, что наряду с процессом удаления заусенцев и скругления кромок происходит обработка всех остальных поверхностей, контактирующих с частицами обрабатывающей среды. Жесткие требования к шероховатости и точности размеров ответственных поверхностей требуют обеспечения в процессе обработки осуществления контроля на отсутствие выхода их параметров за пределы допуска.

Учитывая вышеуказанные особенности решения задачи, а также физико-механические характеристики материала деталей группы можно предварительно определить вид обрабатывающей среды. Используемые для экспериментов обрабатывающие среды были предварительно отобраны на основе результатов предварительных исследований [8-10]. Для исключения в соответствии с техническими требованиями возможности шаржирования поверхности обрабатываемых деталей при выкрашивании абразивных зерен, имеющих более высокую механическую прочность, чем связующий материал, а также исходя из требований максимально высокой стойкости частиц обрабатывающих сред для исследований было выбрано два вида обрабатывающей среды различной грануляции:

- «Байкалит» зеленый, грануляция 25...30 мм и 5...10 мм;
- формованный электротехнический фарфор, шары > 14 мм и >6 мм.

Грануляция определялась исходя из геометрической формы детали-представителя, которая имеет отверстие диаметром 18 мм (минимальный размер отверстия в деталях группы). Поэтому ее выбор осуществлялся с таким расчетом, чтобы не было заклинивания частиц обрабатывающей среды в отверстии. Технологическая жидкость – трехпроцентный раствор кальцинированной соды, эффективность которого была подтверждена ранее экспериментально [8, 9].

Для проведения экспериментальных исследований использовалась четырехкамерная вибрационная установка модели УВГ 4х10 (четыре камеры по 10 л). Рабочая камера заполнялась обрабатывающей средой, предварительно обгалтованной в течение 60 мин с промывкой трехпроцентным раствором кальцинированной соды. Объем загрузки – 75...85 % объема рабочей камеры. Режим работы виброустановки: амплитуда колебаний рабочей камеры – $A = 2,0$ мм; частота колебаний – $f = 24$ Гц.

В качестве образцов использовались типовые детали, сформированные из основных элементов, собранных в группу и предполагаемых для обработки по единой технологии деталей (рис. 2). Материал образцов – бронза, масса – 0,15 кг. Габаритные размеры образцов $\text{Ø}39 \times 22,5$ мм. Образцы предварительно обрабатывались по той же технологии, что и детали группы до этапа, на котором требовалось удаление заусенцев и скругление острых кромок. При этом различные поверхности имели различную шероховатость. Наиболее ответственные из них (торцы) предварительно обрабатывались с шероховатостью Ra 0,63, что требовало дополнительного контроля шероховатости этих поверхностей после обработки. Также в образцах имелось отверстие диаметром 18 мм, на входе и выходе которого также должны были быть удалены заусенцы и скруглены кромки. В каждом эксперименте обрабатывались по пять образцов.



Радиус в основании выступа образован за счет геометрии металлорежущего инструмента

Рисунок 2 – Внешний вид образцов с верхней и нижней частью

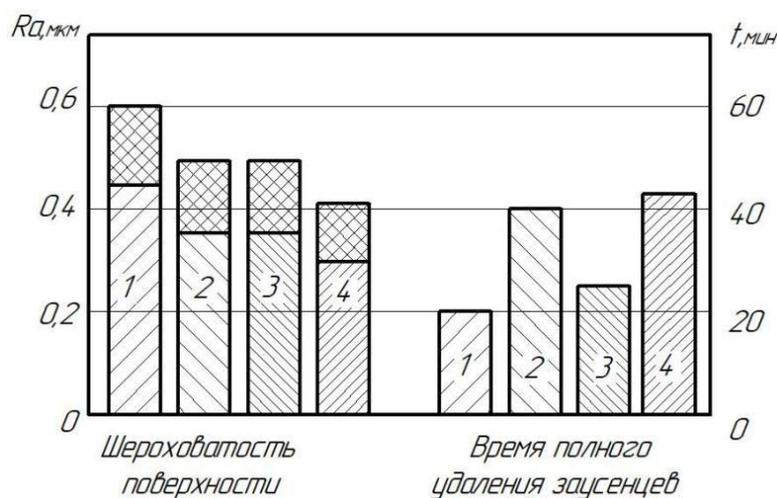
В процессе экспериментальных исследований контролировались отклонения наиболее точных линейных размеров (на образце это высота $22h8$ и диаметр $40h7$) и шероховатость наиболее чисто обработанных поверхностей – Ra 0,63 мкм. Шероховатость поверхности образцов измерялась на профилографе-профилометре в исходном состоянии и после полного удаления заусенцев. Степень удаления заусенцев определялась на микроскопе стереоскопическом МБС-2. Контроль удаления заусенцев производился через каждые 5 минут обработки с помощью микроскопа. Измерения линейных размеров производились на вертикальном оптиметре. Величина радиуса скругления кромки определялась с помощью двойного микроскопа акад. Линника МИС-11.

3 Результаты исследований

На основе результатов проведенных экспериментов были построены графические зависимости и проведен их анализ. На рис. 3 представлены результаты определения времени обработки, необходимого для полного удаления заусенцев при условии не превышения допустимого согласно техническому требованию радиуса скругления кромок 0,1 мм для четырех вариантов обрабатывающих сред. Также на рис. 3 представлена величина шероховатости на ответственных поверхностях (торцах образцов, предварительно обработанных с шероховатостью Ra 0,63), полученная за время обработки, необходимое для полного удаления заусенцев.

Все обрабатывающие среды обеспечивают после обработки шероховатость в пределах, заданных конструктором, то есть с этой точки все обрабатывающие среды пригодны для обработки. Минимальное время, необходимое для удаления заусенцев по контуру образцов было отмечено при обработке в «Байкалите» грануляцией 25...30 мм и фарфоровых шарах $\text{Ø}14$ мм. Однако, при обработке в «Байкалите» при визуальном контроле с помощью микроскопа на поверхностях образцов имеются забоины, и при обработке в указанных двух обрабатывающих средах заусенцы в канавках и в отверстиях $\text{Ø}18$ практически остались без изменений. Следовательно, данные обрабатывающие среды для обработки непригодны.

При обработке в «Байкалите» грануляцией 5...10 мм и фарфоровых шарах $\varnothing 6$ мм заусенцы в канавках и отверстиях были удалены практически полностью. При этом величина шероховатости поверхности после обработки в испытуемых средах соответствует требованиям чертежа, но равномерность обработки лучшая при использовании в качестве мелкогранулированной обрабатывающей среды шаров фарфоровых. При этом при обработке в «Байкалите» грануляцией 5...10 мм имеет место заклинивание двух и более частиц обрабатывающей среды в отверстиях образцов. Этого недостатка лишена обработка фарфоровыми шарами.

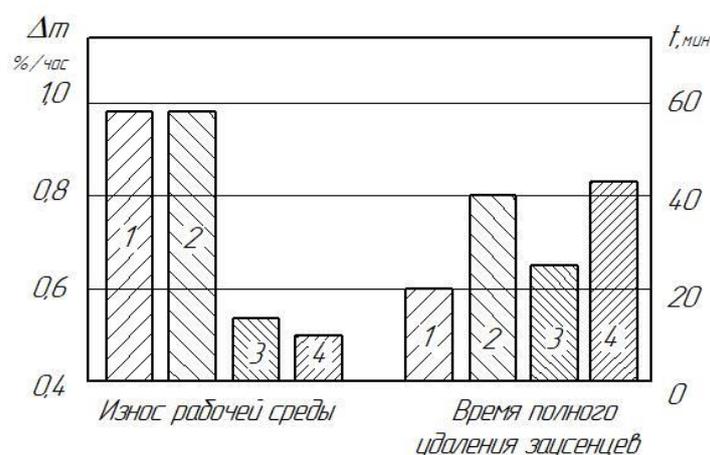


1, 2 – «Байкалит» зеленый, грануляция 25...30 мм и 5...10 мм соответственно,
3, 4 – формованный электротехнический фарфор, шары $\varnothing 14$ мм и $\varnothing 6$ мм соответственно

Рисунок 3 – Зависимость времени обработки до полного удаления заусенцев и шероховатости наиболее ответственных поверхностей детали от обрабатывающей среды

Также при определении оптимального вида обрабатывающей среды имеет большое значение ее надежность [11-14], которая, в частности, может оцениваться ее износом [15]. На рис. 4 представлена зависимость износа обрабатывающих сред от вида среды за время полного удаления заусенцев. Анализ данной зависимости показывает, что обрабатывающие среды имеют различную стойкость. Поэтому учитывая более высокую износостойкость шаров фарфоровых, а также результаты ранее приведенного анализа, целесообразно рекомендовать их в качестве обрабатывающей среды при обработке деталей из бронзы.

В целях изучения возможности сокращения трудоемкости обработки при использовании фарфоровых шаров $\varnothing 14$ мм были проведены испытания по обработке образцов в среде, состоящей из смеси шаров $\varnothing 14$ и $\varnothing 6$ мм в равной пропорции по объему. В результате использования такой обрабатывающей среды при сохранении ранее достигнутого качества поверхности детали время обработки сократилось до 35 мин. Обработка производилась при следующем режиме работы виброустановки: амплитуда колебаний рабочей камеры – $A = 1$ мм; частота колебаний – $f = 35$ Гц; непрерывная промывка загрузки трехпроцентным содовым раствором [16]. При этих условиях полностью удаляются заусенцы, средняя величина радиуса округления кромки 0,08 мм (максимальный радиус не превышает 0,1 мм), изменение линейных размеров составляет менее 0,1 допуска на изготовление детали, при этом изменений в размере отверстия не отмечено.



1, 2 – «Байкалит» зеленый, грануляция 25...30 мм и 5...10 мм соответственно,
3, 4 – формованный электротехнический фарфор, шары $\varnothing 14$ мм и $\varnothing 6$ мм соответственно

Рисунок 4 – Зависимость износа обрабатывающих сред от вида среды за время полного удаления заусенцев

4 Обсуждение и заключение

На основании результатов исследований можно сделать следующие выводы и сформулировать рекомендации:

1) Операция удаления заусенцев и скругления кромок на деталях из бронзы может выполняться методом виброабразивной обработки.

2) Оптимальные результаты операции по удалению заусенцев и скругления острых кромок на деталях из бронзы небольших размеров с отверстиями диаметром не менее 18 мм, имеющих поверхности с жесткими требованиями к качеству ответственных поверхностей могут быть получены при использовании шаров из электротехнического фарфора. Рекомендуемые размеры шаров – $\varnothing 6$ и $\varnothing 14$ мм в равной пропорции. Износ такой обрабатывающей среды около 0,5 % / час.

3) Для предотвращения повреждения ответственных поверхностей деталей от соударения их друг с другом рекомендуется использовать минимальную амплитуду, обеспечивающую циркуляционное перемещение загрузки $A = 1$ мм при частоте колебаний $f = 35$ Гц. Для практической реализации обработки рекомендуемая степень загрузки рабочей камеры составляет 75 ... 80 % ее объема. Рекомендуемая интенсивность промывки – 0,05...0,08 $\text{дм}^3/\text{мин}$ на 1 дм^3 объема рабочей камеры. При указанном режиме виброабразивная обработка может считаться безразмерной.

Список литературы

1 Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э. Современное состояние и перспективы развития методов обработки в гранулированных рабочих средах // Научно-технические вестники Южного федерального университета. – 2020. – № 9 (111). – С. 12–20.

2 Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии. – Ростов н/Д, 1999. – 620 с.

3 РТМ 23.4.47-73 Объемная вибрационная обработка деталей машин на операциях очистки, удаления заусенцев и шлифования. — Ростов н/Д: НИИТМ, 1973. – 100 с.

4 Бабичев, А. П. и др. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок): под ред. Бабичева А. П. – Ростов н/Д: издательский центр ДГТУ, 2010. – 287 с.

- 5 Шевцов, С. Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах: Ростов н/Д, изд. СКНЦ ВШ, 2001. – 193 с.
- 6 Babichev A.P. Mechanics of the micro cutting by abrasive particle at vibroabrasive processing. *Key Engineering Materials*. 2005. – Т. 291-292. С. – 309-314.
- 7 Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Рожненко О. А. Удаление металла при абразивной обработке сложных поверхностей / Российские инженерные исследования. – 2013. – Т. 33. – № 5. – С. 302-305.
- 8 Мельникова Е. П., Прокопец Г. А. Влияние концентрации абразивного наполнителя гранул на интенсивность процесса вибрационной обработки. // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий»: сб. тр. науч. семинара. (г. Ростов-на-Дону, 28 февраля 2020 г.). Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2020. – 124-135.
- 9 Ю. П. Анкудимов, А. П. Шипиль, М. Е. Свинтицкий. Исследование работоспособности естественных абразивных материалов типа «Байкалит» при вибрационной обработке. В сб. статей «Отделочно-упрочняющая механическая обработка, качество поверхности и эксплуатационные свойства». Ростов-на-Дону, РИО РИСХМ, 1978. С. 115-129.
- 10 Прокопец, А. А. Влияние наладки технологической системы на надежность технологического процесса вибрационной обработки. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2009. – № 89-1. – С. 105-109.
- 11 Прокопец Г. А., Прокопец А. А. Система показателей оценки надежности технологического процесса вибрационной обработки деталей. Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. - № 8. – С. 5-9.
- 12 Г.А. Прокопец и др. Анализ надежности инструмента при вибрационной обработке. В сб.: *Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий: сборник трудов международного научного симпозиума технологов-машиностроителей / под редакцией В.А. Лебедева; Донской государственный технический университет. – Текст: электронный. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2022. – С. 249-253*
- 13 Tamarkin M.A. The Optimization of Technological Processes of Details Processing by Free Abrasives. *International Symposium "Advances in Abrasive Technology-YIII" ISAAT2005. International Symposium "Progress in abrasive technology - YIII" ISAAT2005, St. Petersburg, 2005.*
- 14 Tamarkin M.A. The optimization of technological processes of details processing by free abrasives. *Key Engineering Materials*. 2005. Т. 291-292. С. 319-322.
- 15 Прокопец, А. А. Анализ механизмов износа рабочей среды при виброабразивной обработке. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2010. – Т. 10. – № 1 (44). – С. 64-69
- 16 Тамаркин М. А., Прокопец А.А., Прокопец Г.А. Обеспечение стабильности процесса вибрационной обработки путем управления амплитудой колебаний рабочей камеры. *Ж.: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012. – № 2-3. – С. 61-67.

References

- 1 Tamarkin M. A., Tishchenko E. E. Current state and prospects for the development of processing methods in granular working media // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. 2020. – No. 9 (111). – P. 12–20.
- 2 Babichev, A. P. *Fundamentals of vibration technology*. – Rostov n/d, 1999. – 620 p.
- 3 RTM 23.4.47-73 Volumetric vibration processing of machine parts during cleaning, deburring and grinding operations. - Rostov n/d: НИИТМ, 1973. – 100 p.
- 4 Babichev, A. P. et al. Application of vibration technologies in the operations of finishing and cleaning of parts (cleaning, washing, removal of flash and burrs, edge processing): ed. Babicheva A.P. – Rostov n/d: publishing center of DSTU, 2010. – 287 p.
- 5 Shevtsov, S. N. Computer modeling of the dynamics of granular media in vibration technological machines: Rostov n/D, ed. SKNTs VSh, 2001. – 193 p.

6 Babichev A.P. Mechanics of the micro cutting by abrasive particle at vibroabrasive processing. *Key Engineering Materials*. 2005. – Т. 291-292. S. – 309-314.

7 Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Rozhnenko O. A. Metal removal during abrasive processing of complex surfaces / *Russian engineering research*. – 2013. – Т. 33. – No. 5. – P. 302-305.

8 Melnikova E. P., Prokopets G. A. The influence of the concentration of abrasive granule filler on the intensity of the vibration processing process. // *Prospective directions for the development of finishing-hardening processing and vibration-wave technologies*": collection of articles. tr. scientific seminar. (Rostov-on-Don, February 28, 2020). Rostov-on-Don: DSTU, 2020. – 124-135.

9 Yu. P. Ankudimov, A. P. Shipil, M. E. Svintitsky. Study of the performance of natural abrasive materials such as “Baikalit” during vibration processing. On Sat. articles “Finishing and strengthening mechanical processing, surface quality and performance properties.” Rostov-on-Don, RIO RISHM, 1978. pp. 115-129.

10 Prokopets, A. A. The influence of setting up a technological system on the reliability of the technological process of vibration processing. *Scientific and technical bulletins of SPbSPU*. 2009. – No. 89-1. – pp. 105-109.

11 Prokopets G. A., Prokopets A. A. System of indicators for assessing the reliability of the technological process of vibration processing of parts. *Strengthening technologies and coatings*. – 2015. - No. 8. – P. 5-9.

12 G.A. Prokopets et al. Analysis of tool reliability during vibration processing. In: *Fundamental principles of physics, chemistry and mechanics of high-tech technological systems for shaping and assembling products: collection of proceedings of the international scientific symposium of mechanical engineering technologists* / edited by V.A. Lebedeva; Don State Technical University. – Text: electronic. – Rostov-on-Don: DSTU, 2022. – P. 249-253

13 Tamarkin M.A. The Optimization of Technological Processes of Details Processing by Free Abrasives. *International Symposium "Advances in Abrasive Technology-YIII" ISAAT2005*. International Symposium "Progress in abrasive technology - YIII" ISAAT2005, St. Petersburg, 2005.

14 Tamarkin M.A. The optimization of technological processes of details processing by free abrasives. *Key Engineering Materials*. 2005. Т. 291-292. pp. 319-322.

15 Prokopets, A. A. Analysis of wear mechanisms of the working medium during vibroabrasive processing. *Bulletin of the Don State Technical University*. 2010. – Т. 10. – No. 1 (44). – pp. 64-69

16 Tamarkin M.A., Prokopets A.A., Prokopets G.A. Ensuring stability of the vibration processing process by controlling the vibration amplitude of the working chamber. *Zh.: Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2012. – No. 2-3. – pp. 61-67.

© Прокопец Г.А., Мельникова Е.П., Прокопец А.А., 2024

DOI: [10.34220/2311-8873-2024-31-51](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2024-31-51)



УДК 629.1

UDC 629.1

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**АТОМНО-ДИСЛОКАЦИОННАЯ
МОДЕЛЬ УДАЛЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ
СТРУЙНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-
ПЛАЗМЕННЫМ ПОЛИРОВАНИЕМ**

**ATOMIC-DISLOCATION MODEL OF
SURFACE LAYER REMOVAL BY JET
ELECTROLYTE-PLASMA POLISHING**

✉ **Попов Александр Иннокентьевич**,
к.т.н., доцент Высшей школы машиностроения,
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, г. Санкт-Петербург, e-mail: popov_ai@spbstu.ru

✉ **Popov Alexander Innokentievich**,
candidate of technical sciences, associate professor of
the higher school of mechanical engineering, Peter
the Great St. Petersburg polytechnic university, St.
Petersburg, e-mail: popov_ai@spbstu.ru

Аннотация. Данная работа посвящена разработке модели удаления поверхностных слоев материала анода за счет струйного электролитно-плазменного разряда, сформированного полым катодом. Изложены результаты исследований основных видов разрядов, возникающих в процессе формирования струйной электролитно-плазменной обработки. Изучено влияние каждого вида разряда на морфологию поверхностного слоя анода-изделия. Оценена мощность, время существования и энергия единичных разрядов, проведена оценка влияния их на поверхность. Предложена теория удаления поверхностных слоев единичными разрядами на атомно-дислокационном уровне. Теоретические выкладки подтверждаются результатами экспериментальных исследований и мультифизическим моделированием, проведенным в программе COMSOL Multiphysics. Практические результаты исследований подтверждают возможность снижения параметра шероховатости Ra при струйной электролитно-плазменной обработке более 20 раз при получении чрезвычайно низкого параметра Ra 0,019 мкм. Областью применения результатов данных исследований может являться разработка технологических процессов для размерной и финишной обработки криволинейных поверхностей, таких как блиски, турбинные лопатки, различные изделия хозяйственного и медицинского назначения.

Annotation. This work is devoted to the development of a model for the removal of surface layers of anode material due to a jet electrolyte-plasma discharge formed by a hollow cathode. The results of studies of the main types of discharges that occur during the formation of jet electrolyte-plasma processing are presented. The influence of each type of discharge on the morphology of the surface layer of the anode-product was studied. The power, lifetime and energy of single discharges are estimated, and their influence on the surface is assessed. A theory has been proposed for the removal of surface layers by single discharges at the atomic dislocation level. Theoretical calculations are confirmed by the results of experimental studies and multiphysics simulations carried out in the COMSOL Multiphysics program. Practical research results confirm the possibility of reducing the roughness parameter Ra during jet electrolyte plasma by more than 20 times, while obtaining an extremely low parameter Ra of 0.019 μm . The area of application of the results of these studies may be the development of technological processes for dimensional and finishing processing of curved surfaces, such as blisks, turbine blades, and various products for household and medical purposes.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОЛИТ, ПЛАЗМА, СТРУЯ, АНОД, ДИАГНОСТИКА, ЕДИНИЧНЫЙ РАЗРЯД, МОРФОЛОГИЯ, ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ШЕРОХОВАТОСТЬ. **Keywords:** ELECTROLYTE, PLASMA, JET, ANODE, DIAGNOSTICS, SINGLE DIGIT, MORPHOLOGY, ELECTROSTATIC MODELING.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Условия ограничения доступа к инновационным технологическим решениям для отечественных промышленных предприятий со стороны ведущих западных компаний и исследовательских центров сдерживают их развитие при производстве продукции мирового уровня [1]. В этом случае государству и частным российским компаниям необходимо делать акцент на внутреннем развитии и расширенном научном финансировании групп российских ученых, ориентированных на получение инновационных технологических решений [2-6]. По нашему мнению, одной из таких областей исследований, позволяющей сегодня и в перспективе решать большой круг прикладных технологических задач, является область электрофизической и электрохимической обработки. Этими технологиями уже сейчас в электролитических ваннах промышленно обрабатываются изделия, подвергаемые растворению, травлению, термическому нагреву для закалки, легированию, полированию, микродуговому оксидированию, электроэрозионному прошиванию, вырезанию и др. [7-17]. В процессе дальнейших исследований находятся технологии обработки струей (струями), такие как легирование, закалка, прошивание отверстий, фигурная резка, размерная обработка, формирование покрытий и получение наноповерхностей [18-22]. Для реализации этих методов разработаны разные устройства для получения плазмы при атмосферном давлении и в условиях низкого вакуума [23-25]. Существуют примеры комбинированных методов с использованием электролитической ванны с направлением в нее электролитической струи (струй). Ряд исследователей дополнительно вводят в струю инертный газ [26, 27]. Другим видом комбинированной обработки поверхности является обработка в струйных течениях электролита или с применением локализованной области электролитной плазмы [28, 29]. В нашем представлении струйная электролитно-плазменная обработка имеет ряд преимуществ, связанных с точностью, скоростью, повышенным качеством обработанной поверхности и более широкими технологическими возможностями.

Анализ работ многих авторов показывает, что в настоящее время как для электролитно-плазменной обработки в ванне, так и для струйной обработки, в частности, нет единого понимания о характере, длительности, мощности и энергии единичных электрических разрядов, возникающих в процессе полирования, а следовательно, нет полного понимания самого механизма полирования поверхности [30-32]. Различные подходы авторов обусловлены во многом тем, что в процессе обработки используются различные источники питания, электролитические ванны, формы электрод-инструментов, составы и концентрации электролитов, сопротивлений и емкостей цепей. Это приводит к разной величине падений напряжений, плотностей токов, проводимости и частотных характеристик разрядов. Поэтому возникающие трудности сравнения и обобщения полученного материала сопряжены с отсутствием единого подхода к проведению исследований, недостаточным изучением морфологии поверхности после разных видов обработки и, как следствие, разной интерпретацией полученных материалов исследований.

Для эффективного внедрения процессов струйной электролитно-плазменной обработки в промышленность необходимо решить следующие вопросы: определить длитель-

ность, энергию и характер единичных разрядов, воздействующих на поверхность металлического анода, изучить механизмы удаления материала, оценить воздействие на поверхность единичного электрического разряда. Это позволит сформировать единую теоретическую основу для данного вида технологической обработки. Целью исследований является разработка модели удаления поверхностных слоев материала металлического анода за счет струйной электролитно-плазменной обработки. Задачами работы являются анализ существующих положений, классификация разрядов, возникающих при струйной электролитно-плазменной обработке, анализ результатов исследований и компьютерного моделирования, разработка теоретических основ струйной электролитно-плазменной обработки.

2 Материалы, оборудование и методы исследований

В процессе проведения исследований нами была использована установка струйной электролитно-плазменной обработки, разработанная в Высшей школе машиностроения Института машиностроения, материалов и транспорта, СПбПУ [18-22]. Основной принцип работы установки заключается в последовательной подаче струи электролита и выпрямленного напряжения на металлический анод. Диаметр струи электролита в нашем случае составил 3-5 мм. Диаметр электролитно-плазменного разряда составил 1-50 мм. Диапазон исследуемых напряжений – от 20 до 500 В. Объемный расход электролита устанавливали в интервале 2-120 л/ч и измеряли с помощью мерного химического стакана по ГОСТ 23932–90 при фиксации времени секундомером. В качестве электролита использовали водные растворы солей Na_2SO_4 , NaCl , NH_4NO_3 , K_2SO_4 , в сочетании с добавками кислот H_2SO_4 , $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ и без оных. При этом концентрация солей устанавливалась в диапазоне 3-360 г/л, а концентрация кислот – 3-5 г/л. Температуру электролита на поверхности измеряли инфракрасным пирометром модели TA601C. В качестве образцов использовали следующие материалы: медь М1, сталь ХВГ, нержавеющей сталь 08Х18Н9Т, хромоникелевый сплав Инконель 718, нержавеющей стали AISI301 и AISI 304, сталь L605, сталь 95Х18, теплостойкие стали 20Х13, 15ХМФШ, материалы, полученные методом лазерного селективного плавления. В работе использовали компьютерные программы твердотельного моделирования SOLIDWORKS и технических расчетов Wolfram Mathematica. Для оценки воздействия единичного электролитно-плазменного разряда на поверхность изделия были проведены электростатические расчеты в программе мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics. Оценка производилась как для регулярного микрорельефа высотой до 15 мкм, так и для условной единичной атомной решетки с размерами с размерами $5 \times 5 \text{ \AA}$. Зону электролитно-плазменной обработки сканировали лазерным сканером Steinbichler Comet V. Данные обрабатывали с помощью программы SOLIDWORKS. Построение модели выполняли с помощью программы Wolfram Mathematica. Диагностику частотных характеристик единичных электрических разрядов проводили с использованием осциллографа HANTEK с полосой пропускания 100 МГц. Морфологию поверхности изучали с помощью оптического микроскопа (МЕТАМ ЛВ 31 ЛОМО, Россия), электронного микроскопа Supra 55 VP–25–78. Оценку дефектов проводили с помощью оптики микротвердомера FM-300 (Япония). Сшивание изображений проводили с помощью программы Thixomet Pro (Россия). Измерение параметров шероховатости поверхности производили с помощью профилометров TR-200 и MarSurf M400. Последний имеет погрешность измерения 3 % от диапазона измерений.

3 Теоретический анализ

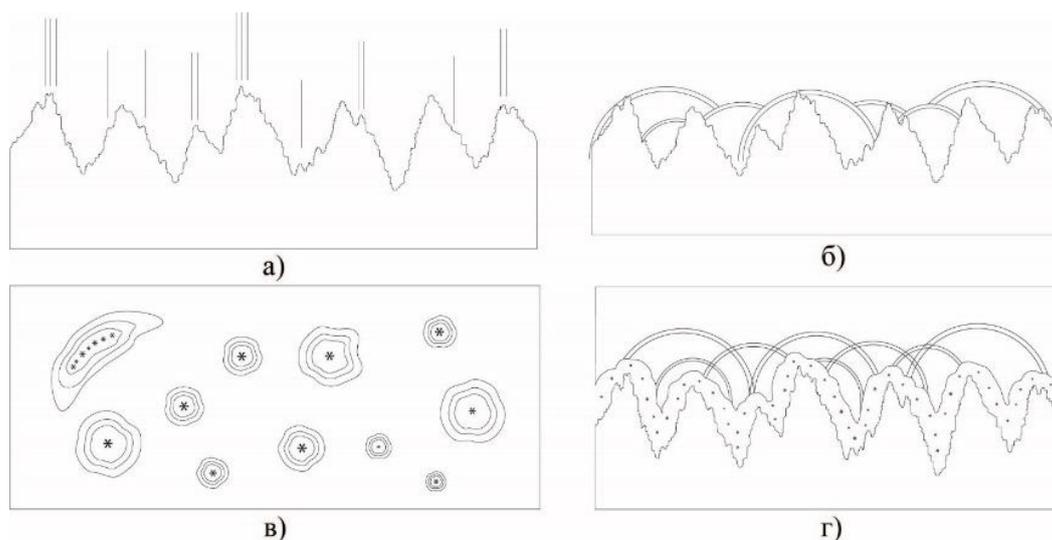
Различные подходы авторов в определении механизма электролитно-плазменного полирования связаны со значительным разбросом входных параметров процесса. Это приводит к тому, что при кажущемся однообразии входных данных возникают разные подходы при выборе мощности и энергии единичных разрядов, формирующих поверхность при том или ином виде электролитно-плазменной обработки. В связи с этим каждый из авторов выбирает свою

величину мощности, энергии и размер «единичной вершины микронеровности» поверхности для проведения расчетов. Анализ приведенных данных показывает, что расчетные значения «вершины микронеровности» различаются на несколько порядков. Так авторы [30, 31] рассматривают размеры «вершин микронеровностей» поверхности от 1,9-1,95 мкм.

Другими авторами рассматриваются пики микронеровностей до 800 мкм [32]. По нашему мнению, использование для расчетов струйной электролитно-плазменной полировки «вершин микронеровностей» с данными размерами является чрезвычайно завышенным. Это связано, прежде всего, с самим механизмом съема или удаления поверхностных слоев материала данным видом обработки. Очевидно, что для разных видов обработки авторы могут взять любой размер «вершины микронеровности». Важным в этом вопросе является то, какой тип разряда применяется и для какого вида технологической обработки. Принципиальным же вопросом является величина энергии единичного разряда (импульса). Многие авторы указывают только выделенную мощность на «вершине микронеровности» [30-32]. Это не отражает сути процесса электролитно-плазменной обработки. При одном и том же электролитно-плазменном процессе для струйной обработки и для обработки в ванне общая выделяемая мощность электролитно-плазменного разряда при этом отличается на несколько порядков. Главным элементом, по которому можно осуществлять сравнение, является длительность единичного разряда (импульса). В этом вопросе наиболее близко к сущности процесса подошли ряд авторов [33-35]. Однако в работе [33] предложенная ионизационная модель электролитно-плазменной обработки, очевидно очень близко затронувшая суть вопроса, не была надежно подкреплена результатами измерений. Показанные значения [33] величин основного диапазона частотных характеристик (17 МГц) электролитно-плазменного разряда не подтверждают величину энергии, прикладываемую к «вершине микронеровности» при воздействии единичного разряда. Данный диапазон длительности импульсов является непомерно большим. Известно, что электролитно-плазменный разряд имеет большой спектр частотных характеристик. В работах [34, 35] авторами измерены значения импульса в диапазоне (200–500 нс). Данный диапазон длительности импульса, по нашему мнению, очень близко соответствует расчетным энергиям разряда единичного импульса при электролитно-плазменной полировке. Нами были рассмотрены несколько аспектов при съеме материала струйной электролитно-плазменной обработкой: распределение напряженности электрического поля по поверхности, распределение зон ионизации при пузырьковом кипении, распределение зон проводимости в зоне разряда, конфигурация поверхности на атомно-дислокационном уровне.

Распределение напряженности электрического поля

При подаче струи электролита (2-8 л/ч) и напряжения (180-340 В) на металлический анод на поверхности возникает высокая напряженность электрического поля ($1 \cdot 10^4$ – $1 \cdot 10^5$ В/м), локальная ионизация и процесс пузырькового кипения электролита. Очевидно, что максимальная напряженность электрического поля формируется на самых острых пиках шероховатости поверхности (рис. 1, а). При этом высота пика не гарантирует максимальной напряженности электрического поля. Это подтверждается тем, что высокие пики микронеровностей после полировки остаются не полностью сглаженными, формируя волнистость поверхности. Это характерно для образцов, полученных методом лазерного селективного плавления (LSM). Даже при значительном увеличении времени в электролитно-плазменной обработке в ванне не происходит полного сглаживания поверхности микропрофиля. При этом поверхность, в том числе, и впадин имеет ярко выраженный блеск. Распределение напряженности электрического поля очень неравномерно по поверхности развитого профиля шероховатости и локализуется между самыми острыми вершинами или малоразмерными объектами (рис. 1, в).



- а) исходная шероховатость поверхности с различной напряженностью электрического поля; б) формирование пузырьковой фазы в процессе Джоулева нагрева; в) области максимальной напряженности электрического поля; г) области ионизации и распределение пузырьковой проводимости

Рисунок 1 – Построение модели процесса электролитно-плазменного полирования

В процессе обработки в каждый момент времени локализация максимальной напряженности электрического поля изменяется.

Распределение зон ионизации при пузырьковом кипении

Анализ возникновения и развития струйного электролитно-плазменного разряда показывает, что в процессе нагрева поверхности анода и в меньшей мере полого катода за счет выделения Джоулева тепла на поверхности начинается процесс кипения:

$$dQ = I^2 \cdot R \cdot dt \quad (1)$$

где: dQ – количество теплоты, выделяемое за промежуток времени, Дж/с; I – величина силы тока, А; R – сопротивление межэлектродного промежутка, Ом; t – время горения электрического разряда, мс.

При низких напряжениях это отчетливо видно для режима электролиза (3-60 В), а затем при возникновении электролитно-плазменного разряда 60-500 В (рис. 1, б, г). В виду того, что возникновение пузырьковой фазы в каждый момент времени носит случайный характер, их место контакта с поверхностью также случайно. Проведенные нами ранее исследования в работе [29] показывают, что процесс ионизации возникает не во всем объеме пузырька, но прежде всего в собственно пузырьковой оболочке (рис. 1, б). И только после увеличения напряжения происходит ионизация внутри собственно объема пузырька. Поэтому в начальный период место контакта оболочки пузырька является наиболее вероятным местом возникновения единичного разряда. Место контакта оболочки пузырька, как и возникновение места пробоя парогазовой фазы, носит случайный характер и может проходить и по впадинам, по вершинам и по боковым поверхностям микронеровностей.

В условиях формирования анодной электролитно-плазменной оболочки возникновение пузырьковой фазы уже играет меньшую роль, так как формирование «сплошного» ионизированного слоя на поверхности анода сглаживает этот фактор.

Распределение каналов проводимости в зоне электрического разряда

Возникновение каналов проводимости для возникновения единичного электролитно-плазменного разряда зависит от распределения напряженности электрического поля (рис. 1, а, в). Напряженность поля, в свою очередь, определяется величиной напряжения, макро- и микрогеометрией электрода-инструмента и собственно микро- (макро-) геометрией обрабатываемой поверхности. Наиболее характерный пример формирования каналов проводимости мы имеем при остром срезе трубки полого катода. Острый срез трубки приводит к высокой напряженности поля, ионизации атомов по линиям электромагнитного поля и стеканию электрического разряда с образованием эрозионных лунок в виде полусфер в окрестности полого катода [18]. Менее выраженный механизм возникновения электрических разрядов происходит при относительно ровной поверхности электрода-инструмента. При этом механизме одновременно за период времени t формируется множество каналов проводимости, перераспределяющих ток разряда по всей поверхности между точками максимальной напряженности и проводимости в данный момент.

Каналы проводимости формируются между хаотично расположенными локальными микродефектами поверхности в виде острых вершин микронеровностей и единичных атомов, выходящих на поверхность, в виде блоков атомов, краевых и винтовых дислокаций и границей ионизированного анодного слоя. Граница ионизированного слоя находится на высоте 10-15 мкм от поверхности металлического анода.

От поверхности анода до границы ионизированного слоя очевидно присутствует большое количество выделившихся из анода отрицательно заряженных ионов кислорода, образующих поляризованный слой для движущихся в сторону анода также отрицательных ионов из области электролитной плазмы. Данный процесс, по нашему мнению, начинается с завершения режима электролиза в ванне (30 В, 60 В, 80 В) и начала электролитно-плазменного процесса. Вследствие этого начинается рост толщины и сопротивления ионизированного анодного слоя и формируется коммутационный режим прерывания и возобновления цепи тока электрических зарядов. При относительно небольшом количестве кислорода процесс имеет достаточную мощность для срыва окисленного слоя. С увеличением напряжения толщина окисленного слоя растет и пропорционально растет сопротивление цепи, а следовательно, уменьшается ток разряда. Заряды не имеют возможности течь через открытые поверхности анода и накапливаются на уровне ионизированного анодного слоя. Однако отрицательно заряженный слой притягивает к себе стекающие с микродефектов положительно заряженные ионы. При этом происходит локальная нейтрализация и истончение окисленного слоя. При достижении пробойного напряжения происходит возобновление тока разряда через сквозное отверстие в окисленном слое и реализация электрического разряда. За счет того, что был накоплен потенциал, и присутствует высокая напряженность электрического поля, создается высокая степень ионизации на границе слоя и возникновение первичного стримера, который формирует и обрушивает лавину электронов с развитием разряда в локальную точку поверхности на вызвавший напряженность дефект.

Многими авторами выдвигались теории развития электрического разряда при электролитно-плазменной обработке [39]. Среди них существует прохождение разряда внутри отдельных пузырьков разряда, прохождение разряда в водной среде электролита (тлеющего разряда). Однако на наш взгляд обе теории имеют недостатки. Изучение развития струйного разряда показывает, что при прохождении через пузырьковую фазу наиболее вероятным является распространение единичного импульса через оболочку пузырька, так как она ионизируется в первую очередь и только потом происходит ионизация парогазовой среды внутри пузырька. Поэтому при прохождении разряда внутри парогазовой оболочки до границы ионизирован-

ного слоя он распространяется в местах контакта оболочек пузырьков, имеющих большее количество подвижных зарядов. При возникновении отдельных разрядов от границ анодного ионизированного слоя движение разряда идет в области наибольшей напряженности поля и по месту наибольшей плотности и проводимости среды.

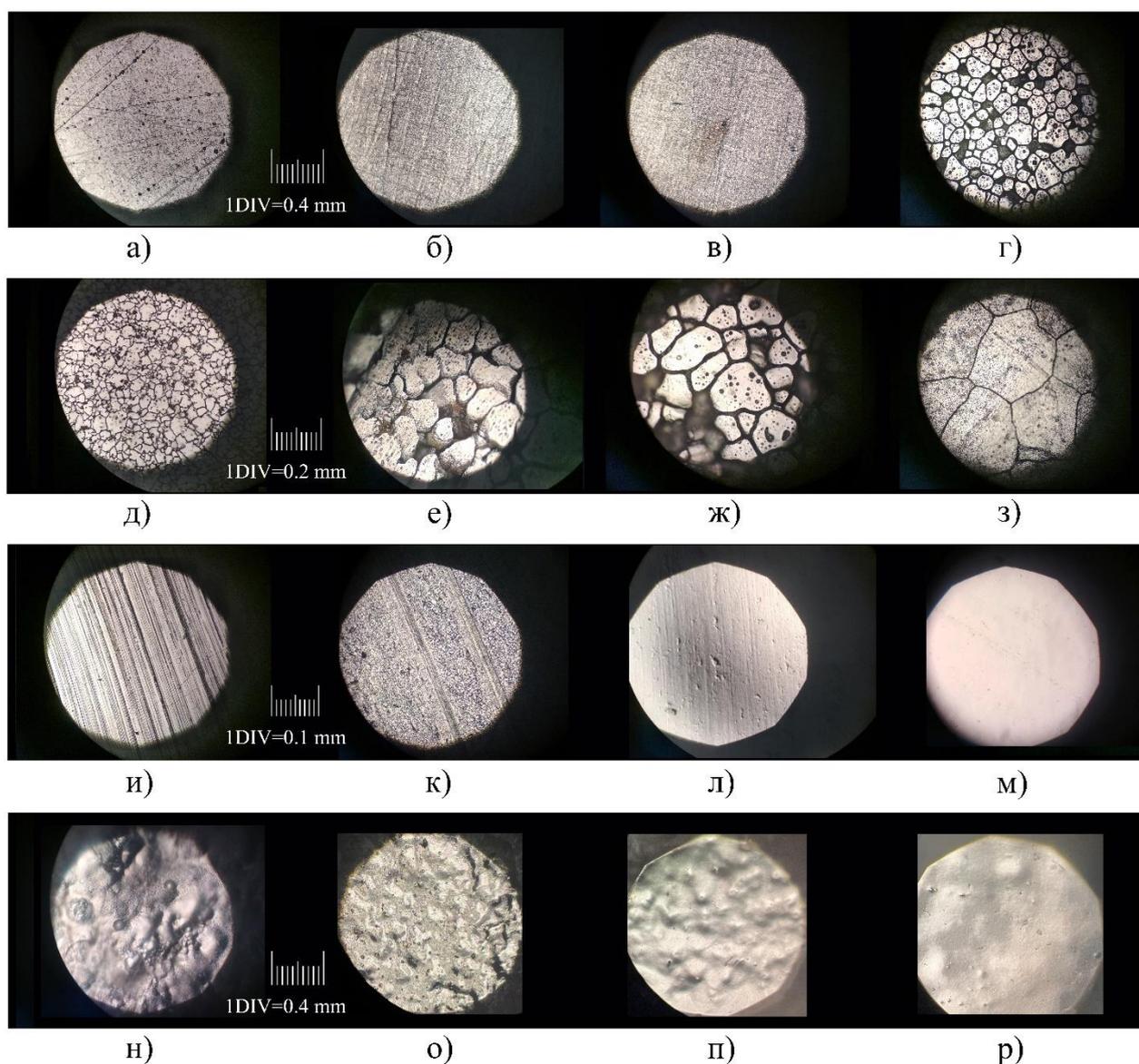
Оценка морфологии поверхности с точки зрения атомно-дислокационной теории удаления поверхностных слоев

Результаты многочисленных экспериментов, проведенных нами при струйной электролитно-плазменной обработке поверхности, показывают, что единичные электрические разряды имеют разброс энергий в широком диапазоне. Такой диапазон энергий обеспечивает развитие разряда в локальной области с различной степенью воздействия на морфологию поверхностного слоя. На рис. 2 представлены микрофотографии поверхностного слоя различных материалов после воздействия единичными электролитно-плазменными разрядами с разным уровнем энергий.

Показано, что поверхность в зависимости от механизма воздействия электрического разряда имеет различную морфологию. При этом в процессе электролитно-плазменной обработки подвергается четырем основным механизмам воздействия, химическому, электрохимическому, эрозионному и электролитно-плазменному. Каждый механизм воздействия, при определенных условиях, позволяет обеспечить полирование поверхности. Однако электролитно-плазменное воздействие имеет свои особенности. Они характеризуются в отличие других механизмов локальной областью контакта единичного разряда с поверхностью, импульсным характером воздействия (подобно электроэрозионному механизму), малой длительностью единичного импульса, малой энергией и случайным характером возникновения единичного импульса на поверхности.

Анализ морфологии поверхности показывает, что отдельные электрические разряды имеют диаметр лунки до 150 мкм, что относит их эрозионному механизму воздействия на поверхность [19]. Энергия единичного разряда в этом случае настолько велика, что характеризует область грубой размерной обработки материала. Режим такой обработки обеспечивает прошивание струей электролита Ø3 мм пластины из нержавеющей толщиной 1 мм менее чем за 1 мин. Разрушение поверхности в более «щадящем» виде может происходить при воздействии на поверхность разрядов меньших энергий, таких как (рис. 2, а, б, в, г). При этом диаметр эрозионной лунки после воздействия единичного разряда можно оценить в 20-30 мкм (рис. 2, а). Показано, что при этом происходит разрушение отдельных групп зерен металла. Значительно меньшее взаимодействие по характеру влияния на поверхность происходит при размере эрозионной лунки в 10 мкм. Поверхность при этом выглядит матовой.

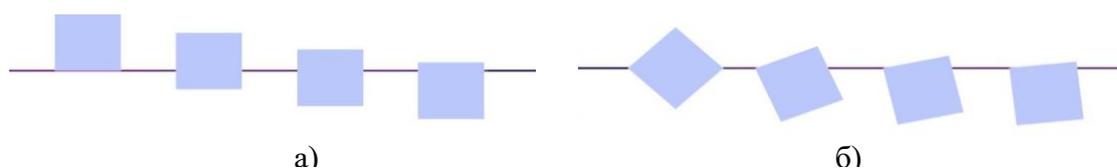
Полирование поверхности происходит при размере локального воздействия единичного разряда значительно меньше, чем 10 мкм. Оценка морфологии поверхности показывает, что размеры межфазного пространства между кристаллитами составляют от 2-20 нм. При этом величина ступеньки может составлять от 20-80 нм, и при воздействии единичных разрядов на поверхность кристаллитов на эту ступеньку не происходит ее разрушения. Этот факт может говорить о том, что электролитно-плазменное воздействие единичным разрядом подобным тлеющему [37-41] происходит на наноуровне.



а) сталь 08X18H9T, размер дефектов 20-30 мкм; *б)* сталь 08X18H9T, размер дефектов 20-30 мкм; *в)* сталь 08X18H9T, размер дефекта 50 мкм; *г)* сталь 95X18, размер дефектов 10-50 мкм; *д)* сталь 95X18, размер дефектов 10-40 мкм; *е)* сталь 95X18, размер дефектов 10-30 мкм; *ж)* сталь 95X18, размер дефектов 10-60 мкм; *з)* сталь 95X18, размер дефектов 10-20 мкм; *и)* сталь 08X18H9T, исходная поверхность; *к)* сталь 08X18H9T, полированная поверхность зерен вершины микрорельефа; *л)* сталь 08X18H9T, полированная поверхность с исходными дефектами поверхности; *м)* сталь 08X18H9T, полированная поверхность; *н)* сплав после LSM, дефекты 30 мкм; *о)* сплав после LSM, дефекты 30 мкм; *п)* сплав после LSM, полированная поверхность; *р)* сплав после LSM, полированная поверхность

Рисунок 2 – Оценка морфологии поверхностного слоя при воздействии зарядов разных энергий

Единичный разряд удаляет с поверхности объемы размером в несколько нанометров. При этом с поверхности происходит удаление единичных дефектов в виде отдельно стоящих атомов, их блоков, мест выхода дислокаций. Анализ возможного расположения единичных дефектов поверхности показывает ограниченное число вариантов взаимного расположения их на поверхности (рис. 3).



а) при наличии краевых дислокаций и дефектов атомной решетки;
б) при дефектах атомной решетки в виде винтовых дислокаций

Рисунок 3 – Возможное расположение единичных атомных решеток по отношению к поверхности

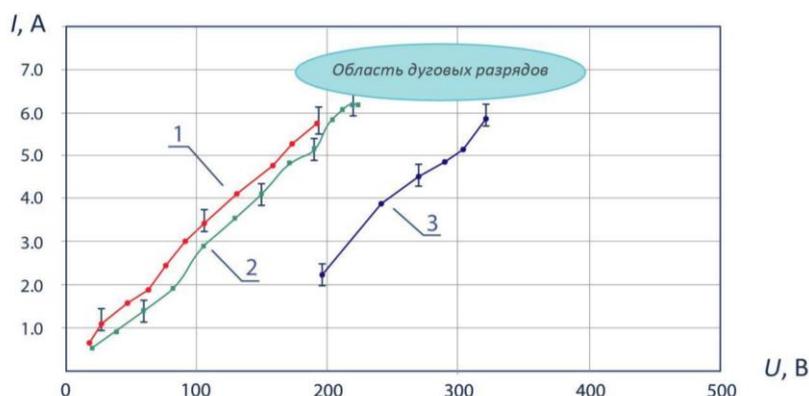
4 Результаты исследований

4.1 Виды разрядов, возникающих при струйной обработке

В процессе струйной электролитно-плазменной полировки нами были исследованы несколько видов электрических разрядов, возникающих при разных условиях. К таким видам разрядов можно отнести дуговой, искровой и разряд, подобный тлеющему

4.1.1 Дуговой разряд

При струйной электролитно-плазменной обработке наиболее характерно возникновение дуговых разрядов в следующих случаях: приближении острого среза трубки полого катода к поверхности анода на 2 мм и ближе, при напряжении между токоподводами в диапазоне 140-380 В, при локальном загрязнении поверхности анода жировыми пленками, при резком локальном повышении напряженности электрического поля между токоподводами, повышении температуры электролита выше 38 °С и др. (рис. 4).



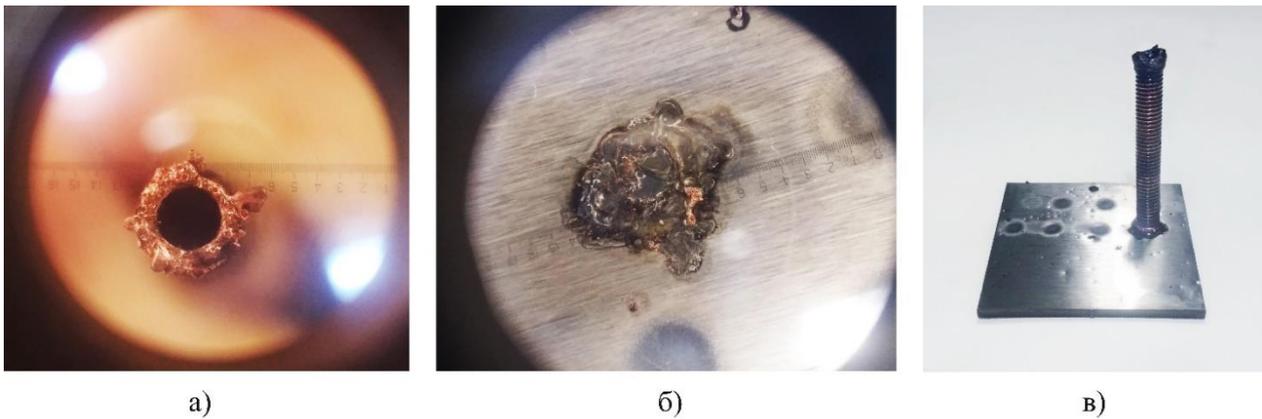
1 – 3 мм; 2 – 5 мм; 3 – 10 мм

Рисунок 4 – Вольт-амперная характеристика процесса в зависимости от высоты межэлектродного зазора

Данные причины приводят к тому, что между анодом и полым токоподводом возникает искровой разряд, переходящий в дуговой. За счет этого в месте контакта дуги с поверхностью анода возникает канал высокой проводимости. При интенсивной электронной бомбардировке поверхности анода в канале дугового разряда происходит мгновенный разогрев металла в пятне контакта и его локальное расплавление. В месте контакта дуги на катоде происходит его расплавление и перенос его материала (меди) на анод (рис. 5). В отдельных случаях происходит расплавление собственно трубки токоподвода и замыкание ее с поверхностью анода (рис. 5, г). Длительность горения дугового разряда в нашем случае составила более 0,63 мс, а энергия единичного разряда 159 Дж и выше.

4.1.2 Искровой разряд

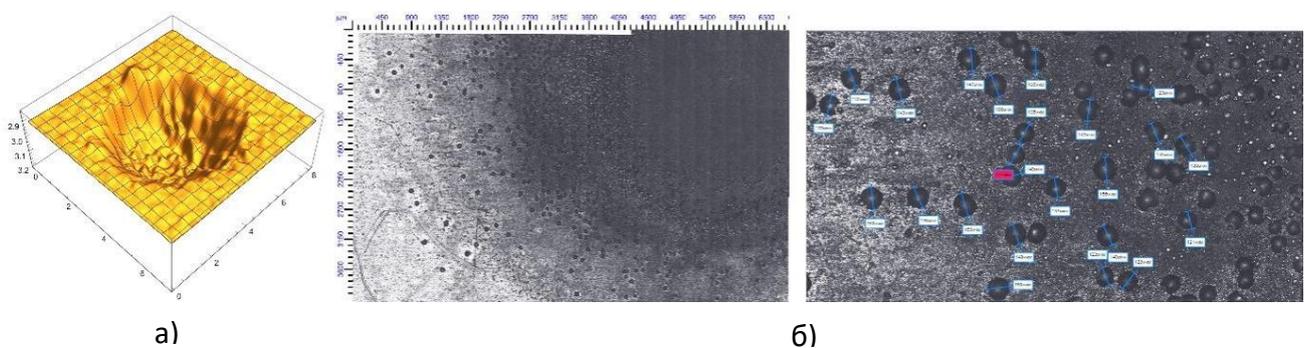
Значительную долю в струйной электролитно-плазменной обработке составляют искровые разряды. Образование плазменного канала в локальном месте при условии высокой напряженности поля от 10^4 до 10^7 В/м и недостаточной проводимости электролита (вследствие низкой температуры и концентрации) приводит к тому, что в зоне обработки формируются множественные электрические разряды значительно меньшей длительности, чем дуговые. Данный вид разряда представляет из себя искровой разряд, эффективно разрушающий поверхность металлического анода.



а) следы дуговых разрядов под срезом трубки полого катода; б) материал катода на поверхности анода; в) расплавленная поверхность среза трубки полого катода

Рисунок 5 – Внешний вид зоны обработки в окрестности полого катода

Искровые разряды имеют значительный разброс в энергиях. В связи с чем в процессе обработки в поверхности образуются локальные микрократеры почти идеальной формы в виде полусферы разных размеров до 150 мкм (рис. 6, а, б). Сравнение объемов кратеров и зон обработки позволило рассчитать объемы и значения энергии единичных искровых разрядов, формирующихся в струе электролитной плазмы. Это сравнение показывает, что их величина находится в диапазоне 0,009-2,306 Дж при частоте возникновения разрядов от $2,95 \cdot 10^{-5}$ до $5,4 \cdot 10^{-3}$ Гц. Данные для разных технологических случаев приведены в табл. 1. Приведенные значения хорошо согласуются со значениями, полученными для искровых разрядов при электроэрозионной обработке [7, 11].



а) модель зоны обработки, полученная лазерным сканированием;
б) кратеры искровых разрядов в окрестности полого катода

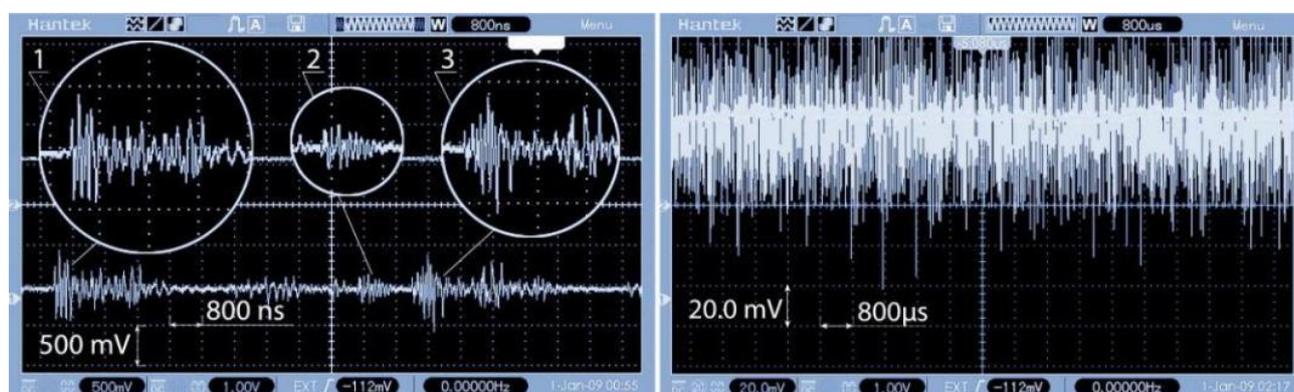
Рисунок 6 – Зона обработки искрового разряда

Таблица 1 – Расчет энергий искровых разрядов, сформированных в зоне обработки

Форма зоны обработки	Сфера	Сфера	Сфера	Цилиндр	Цилиндр
Диаметр, мм	3,0	5,0	3,0	5,0	5,0
Глубина, мкм	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Масса металла, мг	4,08	11,31	4,08	22,33	22,33
Объем, мм ³	0,532	1,474	0,532	2,912	2,912
Усредненный диаметр микрократера, мкм	10	30	50	70	100
Глубина микрократера, мкм	5	15	25	35	50
Масса металла микрократера, мг	0,00000201	5,422E-05	0,00003272	0,00068874	0,002008
Объем микрократера, мм ³	0,00000026	7,07E-06	0,000251	0,0008980	0,0002618
Общее число микрократеров в лунке ΣN , ед	2029850,75	208576,17	124694,38	32427,33	11122,51
Число микрократеров-разрядов/с	33830,85	3476,27	2078,24	540,46	185,38
Частота повторения импульсов T , 1/с	$2,95 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$
Общая энергия разряда, Q , Дж	18630	10670	20250	23085	25650
Энергия единичного разряда Q_n , Дж	0,009	0,051	0,162	0,712	2,306

4.1. 3 Разряд, подобный тлеющему

Развитие разряда, подобного тлеющему при электролитно-плазменном финишном полировании и нанобработке поверхности, является основным видом развития разряда. Данный вид разряда представляет из себя очень кратковременное воздействие на поверхность изделия в локальном месте, вершине микропрофиля в начальный момент, с последующим взаимодействием с границами кристаллитов, местами выхода дислокаций, отдельными атомами и блоками атомов. Энергия единичного разряда при этом составляет очень малую величину $1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ Дж при времени импульса, составляющем 9–80 нс (рис. 7).



а) наносекундный диапазон; б) микросекундный диапазон

Рисунок 7 – Исследование частотных характеристик электролитно-плазменного разряда

Данные величины для струйной электролитно-плазменной обработки на порядок меньше замеренных авторами статьи [34, 35] и на несколько порядков меньше предложенных авторами работ [33] для оценки энергий разряда при электролитно-плазменного полировании в ванне (табл. 2).

Таблица 2 – Исходные, замеренные и расчетные данные

Исходные данные		Замеренные данные		Рассчитанные данные		
Рабочее напряжение, В	Величина силы тока, А	Время импульса, нс	Напряжение импульса, В	Величина тока единичного импульса, А	Напряжение единичного импульса, Вг	Энергия единичного импульса, Дж
225	0,8-5,6	9-80	300-400	0,14-0,80	0,01-0,32	$1 \cdot 10^{-3}$ - $1 \cdot 10^{-4}$

4.3 Результаты моделирования

Нами рассмотрена напряженность электрического поля при разности потенциалов в 300 В, что соответствует режиму электролитно-плазменной обработки (рис. 9). Расчет производился по формуле:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad} U) = -\rho, \quad (2)$$

где U – потенциал электростатического поля, В; ε – диэлектрическая проницаемость, Ф/м; ρ – плотность объемных свободных зарядов, Кл/м.

В случае, если заряды расположены только на металлическом катоде и металлическом аноде, то плотность объемного заряда будет равна:

$$\rho = 0. \quad (3)$$

При использовании векторного дифференциального оператора Гамильтона ∇ потенциал можно записать:

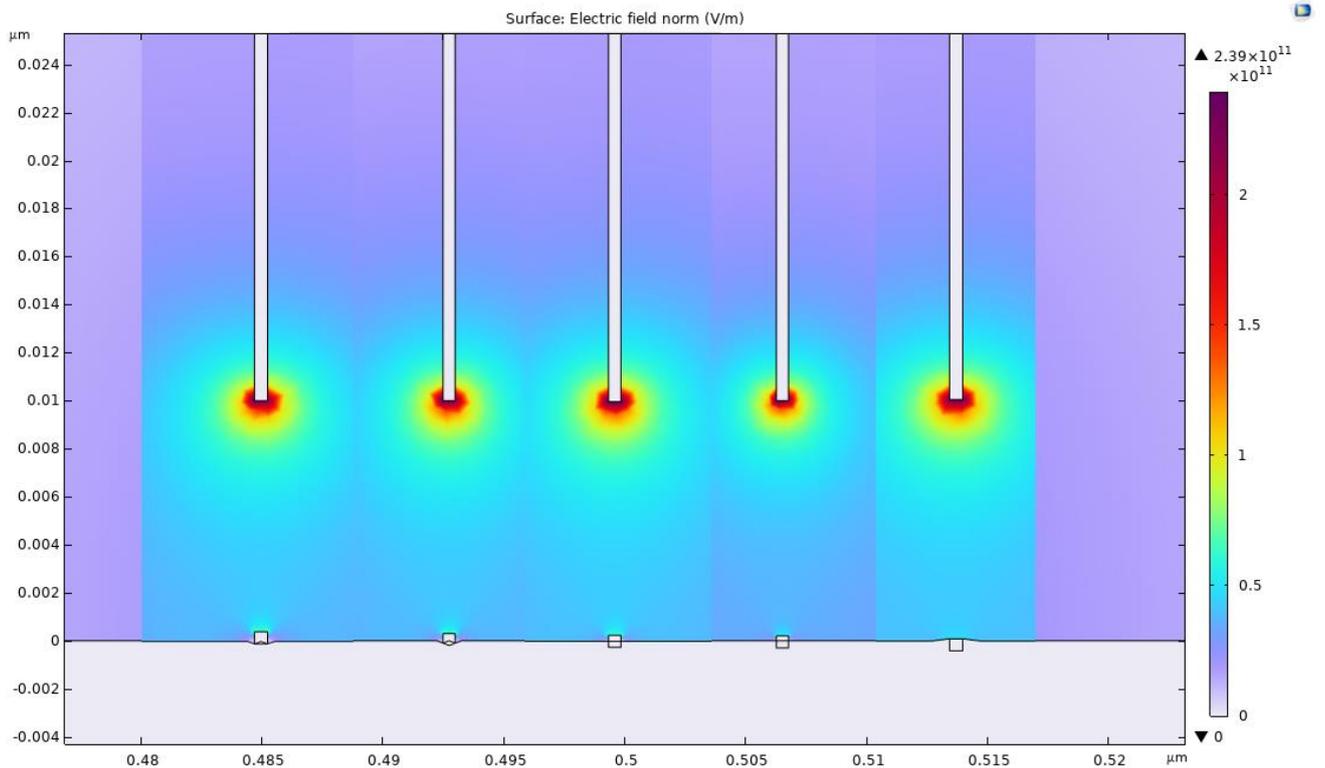
$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla U) = -\rho, \quad \mathbf{E} = -\nabla U, \quad (4)$$

где ∇ – векторный дифференциальный оператор набла (Гамильтона); \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля.

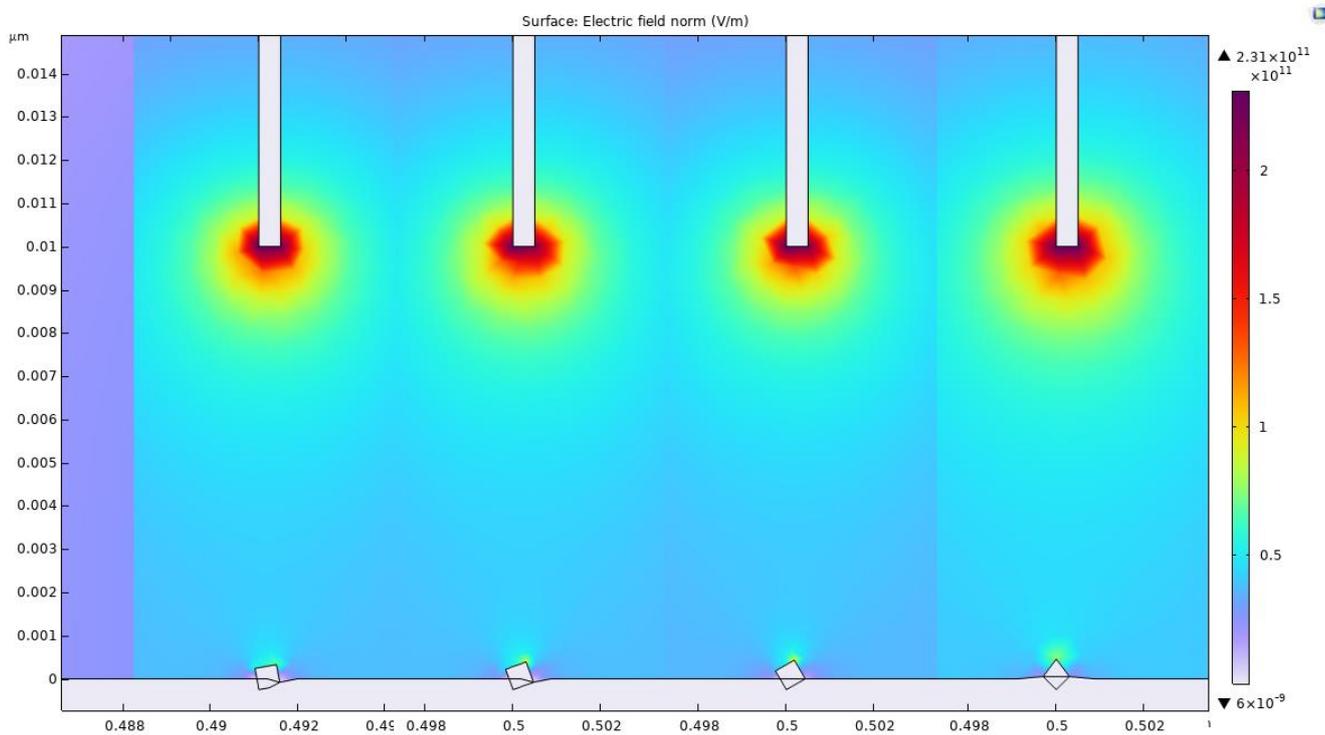
При использовании 2D модели, выражение (4) можно записать как:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, \quad E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}. \quad (5)$$

Для решения задачи была выбрана осесимметричная модель построения. Решение задачи было формализовано до рассмотрения единичного разряда, возникающего на границе ионизированного анодного слоя в момент ее электрического пробоя и микродефекта, представленного в виде единичной атомной решетки размером $5 \times 5 \text{ \AA}$. Расчет производился для решетки, расположенной параллельно плоскости анода, при превышении ее над поверхностью от 1 до 5 \AA и для единичной атомной решетки, расположенной по отношению к поверхности под углами $10-45^\circ$. Диаметр разряда был выбран равным размеру единичного дефекта. За материал канала разряда принят металлический медный проводник.



а)



б)

а) при приближении канала проводимости к вершинам единичной атомной решетки, расположенной параллельно поверхности; б) при приближении канала проводимости к вершинам единичной атомной решетки, расположенной под углом к поверхности

Рисунок 9 – Результаты моделирования напряженности электрического поля

Расчеты напряженности электрического поля показывают, что при приближении к поверхности анода на расстояние от нескольких мкм до нескольких нанометров напряженность поля для рассматриваемого единичного разряда и рассматриваемого единичного дефекта возрастают на несколько порядков. Если для расчета в электролитической ванне напряженность поля для межэлектродного расстояния в 1 метр составляет $4,76 \cdot 10^4$ В/м, то для расстояний для единичного канала проводимости, расположенного на расстоянии в 10 нм, напряженность уже составляет $1 \cdot 10^{12}$ В/м. За счет такой высокой напряженности электрического поля ионизируется вся близлежащая зона в области единичного канала проводимости. При рассмотрении парогазовой-газовой оболочки наблюдается свечение электролитной плазмы в близлежащей к аноду области. Для процессов, наблюдаемых в электролитической ванне разными исследователями, размеры этой зоны лежат в диапазоне 10-500 мкм. Для струйной обработки также наблюдается ионизированная прианодная зона. Ее размер, по нашему мнению, определяется проводимостью электролита, межэлектродным промежутком, шероховатостью поверхности и формой электрода инструмента. Ионизация и свечение ионизированного слоя и его высота сформированы прежде всего точкой развития единичного плазменного разряда. Поэтому свечение всей прианодной зоны определяется как сформировавшимися каналами единичных разрядов, которые формируются с частотой $1.25 \cdot 10^8$ 1/с, так и областями ионизации от близлежащих выступов, блоков, дислокаций и единичных атомных решеток. Поэтому в целом вся прианодная зона выглядит как единый сплошной ионизированный плазменный слой.

5 Обсуждение и заключение

В результате проведения исследований можно обобщить результаты. Струйный электролитно-плазменный разряд на поверхности металлического анода отличается большей долей неравномерности, обусловленной несколькими основными факторами: формой электрода-инструмента, морфологией поверхности, напряженностью электрического поля и проводимостью среды. Морфологию поверхности можно рассматривать на двух уровнях – макроуровне и микроуровне. Макроуровень представляет собой резкие перепады профиля, представляющие собой пики и впадины, или границ зерен металла. Микроуровень характеризуется расположением отдельных выступов элементарной атомной решетки, а также мест выхода дислокаций на поверхность пиков и впадин. Все неравномерности макрорельефа и микрорельефа имеют значительный перепад по напряженности электрического поля в каждой его точке. Очевидно, что не только макрорельеф оказывает влияние на напряжённость электрического поля, но и микронеровности поверхности, которые на атомарном уровне имеют высокую напряженность электрического поля. Эти выступающие элементы поверхности не могут не оказывать влияние на напряженность электрического поля. Напряжённость электрического поля в зоне струйной обработки также не находится на одном уровне. Геометрия собственно инструмента, его острые края и геометрия поверхности оказывают значительное влияние на напряженность электрического поля. Напряженность поля также имеет свои пики и спады. Другим важнейшим параметром является проводимость межэлектродного промежутка. Данный параметр имеет максимальное значение в случае пузырькового кипения по оболочке пузырька, так как именно в нем начинается и проявляется максимальная ионизация и свечение атомов. В случае поверхностного кипения проводимость среды выравнивается и сильно зависит от локальной напряженности промежутка, то есть от размеров, формы и расстояния между дефектами поверхности и острыми краями токоподвода. Удаление поверхностных объемов происходит сглаживанием наибольших вершин микронеровностей ввиду максимальной напряженности электрического поля именно в области пика. Однако при электролитно-плазменной обработке вершины микронеровностей округляются, но не сглаживаются до состояния плоскости. Причиной этого является очень малая мощность единичного заряда, не позволяющего разрушать большие объемы материала. Исследование морфологии поверхности показывает, что единичные разряды, подобные тлеющим обра-

бывают не только вершины поверхности, но и впадины. Это может говорить о том, что напряженность локальных дефектов на микроуровне сопоставима, а во многих случаях больше, нежели напряженность поля на округленных вершинах микронеровностей.

Возникновение электрических разрядов разных энергий говорит не только о разной напряженности электрического поля в локальном месте, но и о разной проводимости среды за счет более высокой ионизации межэлектродного промежутка в локальном месте, что увеличивает время горения единичного разряда и его более сильное влияние на поверхность.

Наличие искровых разрядов большой мощности способно разрушать микронеровности с образованием кратера в поверхности. Большая выделяемая энергия и большая напряженность электрического поля способны вырывать из поверхности расплавленный металл с образованием микрократеров до 150 мкм. Это может приводить к локальной поверхностной закалке сталей. Очевидно, что такие разряды не стоит рассматривать для финишной электролитно-плазменной полировки, требующей очень малые величины съема. Поэтому при выборе мощности разряда и времени его импульса при проведении расчетов необходимо очень скрупулезно подходить к величине его энергии. При струйной обработке при реализации электролитно-плазменного механизма мы имеем дело с очень малым диапазоном энергий единичных разрядов и интервалом их возникновения, соответствующего наносекундам. Очевидно, что данный вид разряда обеспечивает очень низкую скорость съема материала анода и обеспечивает низкий параметр шероховатости поверхности. Однако без предварительной подготовки поверхности за счет обработки разрядами с более высокой энергией, которые позволяют сгладить основные макронеровности, даже за счет увеличения времени обработки этого добиться достаточно сложно.

Выводы:

В соответствии с выполненными теоретическими и практическими исследованиями можно сделать следующие выводы.

1 В процессе струйной электролитно-плазменной обработки при разных начальных температурах электролита возникает несколько видов электрических разрядов: дуговой, искровой и разряд, подобный тлеющему.

2 Приложенная к поверхности мощность данных разрядов лежит в широком интервале энергий от 0,001 до 159 Дж.

3 Электрические разряды, реализуемые при струйной обработке, оказывают различный характер разрушающего воздействия на поверхность: в виде проплавления, эрозийного воздействия, распыления поверхности.

4 Механизм воздействия разрядов малых энергий, подобных тлеющему разряду, сводится к локализации напряженности электрического поля на выступах в виде единичной атомной решетки, мест выхода дислокаций на поверхность, границ зерен ионизации промежутка, формирования канала проводимости и дальнейшего развития единичного разряда.

5 Использование при моделировании энергий единичных разрядов значений более 0,009 Дж для процесса электролитно-плазменной полировки, на наш взгляд, является завышенным и не оптимальным с точки зрения реализации бездефектной поверхности.

Благодарность. Автор выражает благодарность графическому дизайнеру Диане Александровне Поповой за подготовку иллюстраций.

Список литературы

1 Степанова, Т. Д. Технологический суверенитет России как элемент экономической безопасности // Экономический журнал Экономика: вчера, сегодня, завтра. – Том 12.– № 9А. –2022. – С. 567–575.

2 Роль университета в интеграции образования, науки и бизнеса / С. И. Головкина, А. И. Попова, С. А. Черногорский, Н. В. Валебникова // Университет как фактор модернизации России:

история и перспективы (к 55-летию ЧГУ им. И.Н. Ульянова) : Материалы Международной научно-практической конференции , Чебоксары, 18 октября 2022 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022. – С. 138–140. – EDN NERYTD.

3 Попова, А. И. Государственное управление человеческими ресурсами / А. И. Попова, К. В. Швецов. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2021. – 109 с. – ISBN 978-5-7422-7534-3. – EDN EPRYTX.

4 Попова, А. И. Формирование современных площадок для поддержки молодежного предпринимательства / А. И. Попова // Право, экономика и управление: состояние, проблемы и перспективы: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Чебоксары, 11 февраля 2022 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022. – С. 151–154. – DOI 10.31483/r-101166. – EDN JEJDNQ.

5 Попова, А. И. Малое предпринимательство и миграция в северо-западном федеральном округе Российской Федерации / А. И. Попова, С. А. Черногорский, К. В. Швецов // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. – 2013. – № 6. – С. 12–20. – EDN ROVXGD.

6 Попова, А. И. Цифровая трансформация малого и среднего бизнеса / А. И. Попова // Управление развитием экономической систем. Managing development of economic systems: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14–15 декабря 2022 года. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. – С. 105–110. – EDN SEBPVR.

7 Исследование процесса электроэрозионной обработки высокопрочного гранулируемого никелевого сплава нового поколения / Т. Р. Абляз, Е. С. Шлыков, К. Р. Муратов, И. В. Осинников // СТИН. – 2023. – № 6. – С. 31–34. – EDN RHGLCF.

8 Получение пористого никеля из сплава Ni/Cu методом селективного электрохимического травления / М. Т. Артыкбаева, М. А. Елеуов, Г. Т. Смагулова, Р. Е. Бейсенов // Горение и плазмохимия. – 2018. – Т. 16, № 3–4. – С. 226–234. – EDN YQRRAU.

9 Ляхов, А. А. Использование электрохимической полировки для деталей из нержавеющей стали / А. А. Ляхов // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России. – 2018. – № 1. – С. 104–106. – EDN ZASXSX.

10 Захаркин, С. И. Электрохимическая размерная обработка при сверхмалых межэлектродных зазорах: специальность 05.03.01: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Захаркин Сергей Иванович. – Тула, 2002. – 154 с. – EDN QDREGN.

11 Попов, И. С. Электроэрозионная обработка как один из перспективнейших методов обработки металла / И. С. Попов, К. Г. Борисенко // Юность и Знания - Гарантия Успеха - 2018: Сборник научных трудов 5-й Международной молодежной научной конференции. В 2-х томах, Курск, 20–21 сентября 2018 года / Ответственный редактор А. А. Горохов. Том 2. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2018. – С. 259–267. – EDN YNESIP.

12 Плазменное электролитическое оксидирование магниевых сплавов (обзор) / И. А. Козлов, С. С. Виноградов, К. Г. Тарасова [и др.] // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 1(54). – С. 23–36. – DOI 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36. – EDN YZIGTJ.

13 Технологические особенности формирования пористых функциональных керамических покрытий на алюминии методом микродугового оксидирования в силикатных электролитах / М. А. Марков, А. В. Красилов, А. Д. Быкова [и др.] // Технология машиностроения. – 2020. – № 4. – С. 29–35. – EDN BSOXSY.

14 Закалка и легирование стали в результате электролитно-плазменной обработки / А. Д. Погребняк, В. В. Понарядов, Ш. М. Рузимов [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом : Материалы V Международной научной конференции, Минск, 06–09 октября 2003 года. – Минск: Белорусский государственный университет, 2003. – С. 76–78. – EDN PVDCJH.

15 Кургузов Сергей Анатольевич, Залетов Юрий Дмитриевич, Косматов Валерий Иванович, Гусева Ольга Сергеевна, Шевцова Ирина Николаевна Электролитно-плазменная очистка поверхности стального металлопроката // ЭС и К. 2016. №2 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektrolitno-plazmennaya-ochistka-poverhnosti-stalnogo-metalloprokata> (дата обращения: 13.12.2023).

16 Кылышканов, М. К. Влияние режимов электролитно-плазменной закалки на структуру и свойства стали бурового долота / М. К. Кылышканов, К. К. Комбаев // Труды университета. – 2009. – № 2(35). – С. 16–18. – EDN QZLZJN.

17 Белкин, П. Н. Электролитно-плазменное азотирование сталей / П. Н. Белкин, С. А. Кусманов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2017. – № 7. – С. 95–118. – DOI 10.7868/S0207352817030040. – EDN YTXASZ.

18 Popov, A.I., Fumin, A.S., Novikov, V.I., Teplukhin, V.G., Veselovsky, A.P. (2023). Peculiarities of Contact Interaction of an Electrolytic Plasma with a Surface in Jet Machining of Materials of Turbine Blades. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_71

19 Попов А. И., Москалец А. А., Беляков С. В., Мурашов Ю. В., Веселовский А. П., Попова Д. А., Иванова Г. В., Яковицкая М. В., Радкевич М. М. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУЙНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ // Воронежский научно-технический вестник. 2023. №. 1. С. 4–19. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-4-19> (дата обращения: 10.12.2023).

20 Попов А. И. Анализ морфологии при воздействии электролитической струи на поверхность нержавеющей стали // Воронежский научно-технический вестник. 2023. №.4(46). С. 35–48. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-35-48> (дата обращения: 12.12.2023).

21 Попов, А. И. Особенности электролитно-плазменного полирования стенов / А. И. Попов, М. М. Радкевич, М. В. Новоселов // Технология металлов. – 2019. – № 5. – С. 24–29. – DOI 10.31044/1684–2499-2019-5-0-24-29. – EDN UIJGJG.

22 Specific Features of Surface Morphology During Plasma Electrolytic Processing / A. Popov, A. Popova, V. Novikov [et al.] // Conference “INTERAGROMASH 2021”. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 2: Conference proceedings, Ростов-на-Дону, 24–26 февраля 2021 года. – Ростов-на-Дону: Springer, 2022. – P. 101–112. – DOI 10.1007/978-3-030-80946-1_11. – EDN CTZZES.

23 Разряд с жидким неметаллическим катодом (водопроводная вода) в потоке воздуха атмосферного давления. Баринов Ю. А., Школьник С.М. 2016, Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 11.

24 Баринов Ю. А., Школьник С.М. Зондовые измерения в разряде с жидкими неметаллическими электродами в воздухе при атмосферном давлении // ЖТФ. 2002. №3. Т.72.С.31-37

25 Электрический разряд переменного тока в однопроцентном растворе хлорида натрия в дистиллированной воде при пониженных давлениях / А. А. Хафизов, Р. И. Валиев, Л. Н. Багаутдинова [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60, № 4. – С. 625–628. – DOI 10.31857/S0040364422020065. – EDN FUWOTS.

26 Witzke M., Rumbach P., Go D. B., Sankaran R. M. Evidence for the electrolysis of water by atmospheric-pressure plasmas formed at the surface of aqueous solutions / J. Phys. D: Appl.Phys. 2012 V. 45 P. 5.

27 Патент № 2656318 С1 Российская Федерация, МПК С23С 14/35. Магнетронная распылительная головка: № 2017111428: заявл. 04.04.2017: опубл. 04.06.2018 / А. И. Попов, М. М. Радкевич, В. С. Медко [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (ФГАОУ ВО "СПбПУ"). – EDN UQSEXV.

28 Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С.Куликов, С. В. Ващенко, А.Я. Каменев. НАН Беларуси, Объединенный институт энергетических исследований. Сосны. Минск: Беларуская навука. 2010.

29 Попов, А. И. Особенности формирования электрического разряда между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении / А. И. Попов, В. И. Новиков, М. М. Радкевич // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57, № 4. – С. 483–495. – DOI 10.1134/S004036441903013X. – EDN SJQXBG.

30 Радкевич, М. М. Расчет тепловых полей при локальном принудительном электролитно-плазменном полировании / М. М. Радкевич, И. С. Кузьмичев // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: VI Международная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, Пермь, 15–16 декабря 2022 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2023. – С. 95–99. – EDN OQRECJ.

31 Новиков, В. И. Технологические возможности чистовой обработки турбинных лопаток электролитно-плазменным методом / В. И. Новиков, С. Л. Мурашкин, А. И. Фоломкин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2012. – № 1–2(147). – С. 105–108. – EDN PCNSBZ.

32 Беляков С. В., Семёнов М.Ю. Моделирование распределения температур в профиле шероховатости поверхностного слоя в процессе электролитно-плазменной обработки // Научные чтения им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов», Москва, 17-18 сентября 2020 г. Сборник материалов. М: ИМЕТ РАН, 2020. С. 99–101.

33 Захаров, С. В. Ионизационная модель электролитно-плазменного полирования / С. В. Захаров, М. Т. Коротких, Е. В. Гонибесова // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 255–258. – EDN PNORZK.

34 Алексеев Ю. Г., Королев А. Ю., Паршутто А.Э., Нисс В.С. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля. Наука и Техника. 2017;16(5):391-399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.

35 Алексеев Ю. Г., Королев А. Ю., Паршутто А.Э., Нисс В.С. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля. Наука и Техника. 2017;16(5):391-399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.

36 Danilov, I.; Hackert-Oschätzchen, M.; Schaarschmidt, I.; Zinecker, M.; Schubert, A. Transient Simulation of the Removal Process in Plasma Electrolytic Polishing of Stainless Steel. In Proceedings of the COMSOL Conference 2018, Lausanne, Switzerland, 22–24 October 2018; Available online: https://www.comsol.com/paper/download/573171/danilov_paper.pdf (accessed on 10 December 2018).

37 Д. И. Словецкий, С. Д. Терентьев, В. Г. Плеханов, “Механизм плазменно-электролитного нагрева металлов”, ТВТ, 24:2 (1986), 353–363; High Temperature, 24:2 (1986), 277–285.

38 Ал. Ф. Гайсин, “Нестационарный многоканальный разряд между струей электролита и металлическим электродом при атмосферном давлении”, ТВТ, 44:5 (2006), 796–797; High Temperature, 44:5 (2006), 792–794.

39 Попова, С. В. Электролитно-плазменная финишная обработка металлов и сплавов / С. В. Попова, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский // Письма о материалах. – 2015. – Т. 5, № 1(17). – С. 39-43. – EDN TOQZGT.

40 Danilov, Igor & Hackert-Oschätzchen, Matthias & Zinecker, Mike & Meichsner, Gunnar & Edelmann, Jan & Schubert, Andreas. (2019). Process Understanding of Plasma Electrolytic Polishing through Multiphysics Simulation and Inline Metrology. Micromachines. 10. 214. 10.3390/mi10030214.

41 Ю. В. Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский, Г. Я. Беляев, Электроимпульсное полирование сплавов на основе железа, хрома и никеля. Minsk: Белорусский национальный технический университет, 2014.

References

- 1 Stepanova T. D. Technological sovereignty of Russia as an element of economic security *Economic journal Economics: yesterday, today, tomorrow* Volume 12, No. 9A, 2022. p. 567–575.
- 2 The role of the university in the integration of education, science and business / S. I. Golovkina, A. I. Popova, S. A. Chernogorsky, N. V. Valebnikova // *University as a factor in the modernization of Russia: history and prospects (to the 55th anniversary of ChSU named after I.N. Ulyanov): Materials of the International Scientific and Practical Conference, Cheboksary, October 18, 2022.* – Cheboksary: Limited Liability Company “Publishing House “Sreda”, 2022. – P. 138–140. – EDN NERYTD.
- 3 Popova, A. I. State management of human resources / A. I. Popova, K. V. Shvetsov. – St. Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", 2021. – 109 p. – ISBN 978-5-7422-7534-3. – EDN EPRYTX.
- 4 Popova, A. I. Formation of modern platforms to support youth entrepreneurship / A. I. Popova // *Law, economics and management: status, problems and prospects: collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, Cheboksary, February 11, 2022.* – Cheboksary: Limited Liability Company “Publishing House “Sreda”, 2022. – P. 151–154. – DOI 10.31483/r-101166. – EDN JEJDNG.
- 5 Popova, A. I. Small business and migration in the northwestern federal district of the Russian Federation / A. I. Popova, S. A. Chernogorsky, K. V. Shvetsov // *Bulletin of UrFU. Series: Economics and management.* – 2013. – No. 6. – P. 12–20. – EDN ROVXGD.
- 6 Popova, A. I. Digital transformation of small and medium-sized businesses / A. I. Popova // *Management of the development of economic systems. Managing development of economic systems: Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, December 14–15, 2022.* – St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2022. – P. 105–110. – EDN SEBPVR.
- 7 Study of the process of electrical discharge machining of a high strength granulated nickel alloy of a new generation / T. R. Ablyaz, E. S. Shlykov, K. R. Muratov, I. V. Osinnikov // *STIN.* – 2023. – No. 6. – P. 31–34. – EDN RHGLCF.
- 8 Preparation of porous nickel from Ni/Cu alloy by selective electrochemical etching / M. T. Artykbaeva, M. A. Eleuov, G. T. Smagulova, R. E. Beisenov // *Combustion and plasma chemistry.* – 2018. – T. 16, No. 3–4. – pp. 226–234. – EDN YQRRAU.
- 9 Lyakhov, A. A. The use of electrochemical polishing for stainless steel parts / A. A. Lyakhov // *Engineering personnel - the future of the innovative economy of Russia.* – 2018. – No. 1. – P. 104–106. – EDN ZASXSX.
- 10 Zakharkin, S.I. Electrochemical dimensional processing with ultra-small interelectrode gaps: specialty 03/05/01: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Zakharkin Sergey Ivanovich. – Tula, 2002. – 154 p. – EDN QDREGN.
- 11 Popov, I. S. Electrical discharge machining as one of the most promising methods of metal processing / I. S. Popov, K. G. Borisenko // *Youth and Knowledge - Guarantee of Success - 2018: Collection of scientific papers of the 5th International Youth Scientific Conference. In 2 volumes, Kursk, September 20–21, 2018 / Executive editor A. A. Gorokhov. Volume 2.* – Kursk: Closed Joint Stock Company “University Book”, 2018. – P. 259–267. – EDN YNESIP.
- 12 Plasma electrolytic oxidation of magnesium alloys (review) / I. A. Kozlov, S. S. Vinogradov, K. G. Tarasova [etc.] // *Aviation materials and technologies.* – 2019. – No. 1(54). – pp. 23–36. – DOI 10.18577/2071–9140-2019-0-1-23-36. – EDN YZIGTJ.
- 13 Technological features of the formation of porous functional ceramic coatings on aluminum by microarc oxidation in silicate electrolytes / M. A. Markov, A. V. Krasikov, A. D. Bykova [etc.] // *Mechanical Engineering Technology.* – 2020. – No. 4. – P. 29–35. – EDN BSOXSY.
- 14 Hardening and alloying of steel as a result of electrolyte-plasma treatment / A. D. Pogrebyak, V. V. Ponaryadov, Sh. M. Ruzimov [etc.] // *Interaction of radiation with a solid body:*

Proceedings of the V International Scientific Conference, Minsk, 06 –October 09, 2003. – Minsk: Belarusian State University, 2003. – P. 76–78. – EDN PVDCJH.

15 Kurguzov Sergey Anatolyevich, Zaletov Yuriy Dmitrievich, Kosmatov Valery Ivanovich, Guseva Olga Sergeevna, Shevtsova Irina Nikolaevna Electrolytic-plasma cleaning of the surface of rolled steel // ES and K. 2016. No. 2 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektrolitno-plazmennaya-ochistka-poverhnosti-stalnogo-metalloprokata> (access date: 12/13/2023).

16 Kylyshkanov, M.K. Influence of electrolyte-plasma hardening modes on the structure and properties of drill bit steel / M.K. Kylyshkanov, K.K. Kombaev // Proceedings of the University. – 2009. – No. 2(35). – pp. 16–18. – EDN QZLZJN.

17 Belkin, P. N. Electrolyte-plasma nitriding of steels / P. N. Belkin, S. A. Kusmanov // Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies. – 2017. – No. 7. – P. 95–118. – DOI 10.7868/S0207352817030040. – EDN YTXASZ.

18 Popov, A.I., Fumin, A.S., Novikov, V.I., Teplukhin, V.G., Veselovsky, A.P. (2023). Peculiarities of Contact Interaction of an Electrolytic Plasma with a Surface in Jet Machining of Materials of Turbine Blades. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_71

19 Popov A. I., Moskalets A. A., Belyakov S. V., Murashov Yu. V., Veselovsky A. P., Popova D. A., Ivanova G. V., Yakovitskaya M. V., Radkevich M. M. ELECTROPHYSICAL REGULARITIES OF JET ELECTROLYTE-PLASMA PROCESSING // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2023. No. 1. pp. 4–19. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-4-19> (access date: 12/10/2023).

20 Popov A.I. Analysis of morphology under the influence of an electrolytic jet on the surface of stainless steels // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2023. No.4(46). pp. 35–48. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-35-48> (access date: 12.12.2023).

21 Popov, A. I. Features of electrolyte-plasma polishing of stents / A. I. Popov, M. M. Radkevich, M. V. Novoselov // Technology of metals. – 2019. – No. 5. – P. 24–29. – DOI 10.31044/1684-2499-2019-5-0-24-29. – EDN UIJGJG.

22 Specific Features of Surface Morphology During Plasma Electrolytic Processing / A. Popov, A. Popova, V. Novikov [et al.] // Conference “INTERAGROMASH 2021”. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 2: Conference proceedings, Rostov-on-Don, February 24–26, 2021. – Rostov-on-Don: Springer, 2022. – P. 101–112. – DOI 10.1007/978-3-030-80946-1_11. – EDN CTZZES.

23 Discharge with a liquid non-metallic cathode (tap water) in an air flow at atmospheric pressure. Barinov Yu. A., Shkolnik S. M. 2016, Journal of Technical Physics, 2016, volume 86, issue 11.

24 Barinov Yu. A., Shkolnik S. M. Probe measurements in a discharge with liquid non-metallic electrodes in air at atmospheric pressure // ZhETF. 2002. No. 3. T.72.S.31-37

25 Electric discharge of alternating current in a one percent solution of sodium chloride in distilled water at low pressures / A. A. Khafizov, R. I. Valiev, L. N. Bagautdinova [etc.] // Thermophysics of high temperatures. – 2022. – T. 60, No. 4. – P. 625–628. – DOI 10.31857/S0040364422020065. –EDN FUWOTS.

26 Witzke M., Rumbach P., Go D. B., Sankaran R. M. Evidence for the electrolysis of water byatmospheric-pressure plasmas formed at the surface of aqueous solutions //J. Phys. D: Appl.Phys. 2012 V. 45 R. 5.

27 Patent No. 2656318 C1 Russian Federation, IPC C23C 14/35. Magnetron sputtering head: No. 2017111428: appl. 04/04/2017: publ. 06/04/2018 / A. I. Popov, M. M. Radkevich, V. S. Medko [etc.]; applicant: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University" (SPbPU). – EDN UQSEXB.

28 Electrolytic-plasma processing of materials / I.S. Kulikov, S.V. Vashchenko, A.Ya. Kamelev. NAS of Belarus, Joint Institute for Energy Research. Pines. Minsk: Belarusian Science. 2010.

29 Popov, A. I. Features of the formation of an electric discharge between a jet electrolytic cathode and a metal anode at atmospheric pressure / A. I. Popov, V. I. Novikov, M. M. Radkevich // *Thermophysics of high temperatures*. – 2019. – Т. 57, No. 4. – P. 483–495. – DOI 10.1134/S004036441903013X. – EDN SJQXBG.

30 Radkevich, M. M. Calculation of thermal fields during local forced electrolyte-plasma polishing / M. M. Radkevich, I. S. Kuzmichev // *Electrophysical processing methods in modern industry: VI International scientific and practical conference of young scientists, graduate students and students*, Perm, December 15–16, 2022. – Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2023. – pp. 95–99. – EDN OQRECJ.

31 Novikov, V. I. Technological capabilities of finishing treatment of turbine blades using the electrolyte-plasma method / V. I. Novikov, S. L. Murashkin, A. I. Folomkin // *Scientific and Technical Journal of the St. Petersburg State Polytechnic University*. – 2012. – No. 1–2(147). – pp. 105–108. – EDN PCNSBZ.

32 Belyakov S.V., Semenov M.Yu. Modeling of temperature distribution in the surface layer roughness profile during electrolyte-plasma treatment // *Scientific readings named after. Corresponding member RAS I.A. Odinga “Mechanical properties of modern structural materials”*, Moscow, September 17–18, 2020. Collection of materials. M: IMET RAS, 2020. pp. 99–101.

33 Zakharov, S.V. Ionization model of electrolyte-plasma polishing / S.V. Zakharov, M.T. Korotkikh, E.V. Gonibesova // *SPbPU Science Week: Materials of a scientific conference with international participation*. In 2 parts, St. Petersburg, November 18–23, 2019. – St. Petersburg: Polytech-Press, 2020. – pp. 255–258. – EDN PNORZK.

34 Alekseev Yu.G., Korolev A.Yu., Parshuto A.E., Niss V.S. Electrolyte-plasma treatment in non-stationary modes under conditions of a high-gradient electric field. *Science and Technology*. 2017;16(5):391-399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.

35 Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Parshuto A.E., Niss V.S. Electrolyte-plasma treatment in non-stationary modes under conditions of a high-gradient electric field. *Science and Technology*. 2017;16(5):391-399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.

36 Danilov, I.; Hackert-Oschätzchen, M.; Schaarschmidt, I.; Zinecker, M.; Schubert, A. Transient Simulation of the Removal Process in Plasma Electrolytic Polishing of Stainless Steel. In *Proceedings of the COMSOL Conference 2018, Lausanne, Switzerland, 22–24 October 2018*; Available online: https://www.comsol.com/paper/download/573171/danilov_paper.pdf (accessed on 10 December 2018).

37 D. I. Slovetsky, S. D. Terentyev, V. G. Plekhanov, “Mechanism of plasma-electrolyte heating of metals”, *TVT*, 24:2 (1986), 353–363; *High Temperature*, 24:2 (1986), 277–285.

38 Al. F. Gaisin, “Non-stationary multichannel discharge between an electrolyte jet and a metal electrode at atmospheric pressure”, *TVT*, 44:5 (2006), 796–797; *High Temperature*, 44:5 (2006), 792–794.

39 Popova, S. V. Electrolytic-plasma finishing processing of metals and alloys / S. V. Popova, S. A. Muboyadzhyan, S. A. Budinovskiy // *Letters on materials*. – 2015. – Т. 5, No. 1(17). – pp. 39–43. – EDN TOQZGT.

40 Danilov, Igor & Hackert-Oschätzchen, Matthias & Zinecker, Mike & Meichsner, Gunnar & Edelmann, Jan & Schubert, Andreas. (2019). Process Understanding of Plasma Electrolytic Polishing through Multiphysics Simulation and Inline Metrology. *Micromachines*. 10.214.10.3390/mi10030214.

41 Yu. V. Sinkevich, V. K. Sheleg, I. N. Yankovsky, G. Ya. Belyaev, *Electric pulse polishing of alloys based on iron, chromium and nickel*. Minsk: Belarusian National Technical University, 2014.

DOI: [10.34220/2311-8873-2024-52-60](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2024-52-60)



УДК 621-03

UDC 621-03

2.5.6 – технология машиностроения

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ
РАЗМЕРНО-ТОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА**

**TECHNOLOGICAL JUSTIFICATION OF
THE RATIONAL DESIGN OF
ELECTROMECHANICAL
SENSORS BASED ON
DIMENSIONAL-PRECISION ANALYSIS**

✉¹ **Лебедев Валерий Александрович**,
профессор, к.т.н., профессор, Донской государствен-
ственный технический университет, г. Ростов-
На-Дону, e-mail: va.lebidev@yandex.ru

✉¹ **Lebedev Valery Alexandrovich**,
professor, candidate of technical sciences, professor,
Don state technical university, Rostov-On-Don, e-
mail: va.lebidev@yandex.ru

Коваль Николай Сергеевич,
к.т.н., доцент, Донской государственной
технической университет, г. Ростов-На-Дону,
e-mail: koval-nc@mail.ru

Koval Nikolay Sergeevich,
candidate of technical sciences, associate profes-
sor, Don state technical university, Rostov-On-
Don, e-mail: koval-nc@mail.ru

Котенко Олег Николаевич,
аспирант, Донской государственной техни-
ческой университет, г. Ростов-На-Дону,
e-mail: kotenko.on@yandex.ru

Kotenko Oleg Nikolaevich,
postgraduate student, Don state technical university,
Rostov-On-Don, e-mail: kotenko.on@yandex.ru

Аннотация. Показано применение размерно-
точностного анализа при разработке новых и
совершенствовании существующих кон-
струкций электромеханических датчиков,
который позволяет установить причины вы-
сокой трудоемкости пригоночных и регули-
ровочных работ в процессе их изготовления
и выявить пути её снижения. Представлены
наиболее рациональные решения обеспече-
нию точности конструкции электромехани-
ческого датчика давления.

Annotation. The application of dimensional-ac-
curacy analysis in the development of new and
improvement of existing designs of electro-
mechanical sensors is shown, which makes it possi-
ble to establish the reasons for the high labor in-
tensity of fitting and adjustment work during
their manufacture and to identify ways to reduce
it. The most rational solutions are presented to
ensure the accuracy of the design of an electro-
mechanical pressure sensor.

Ключевые слова: РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ,
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДАТЧИК,
ТОЧНОСТЬ, ТРУДОЕМКОСТЬ, РАБОТО-
СПОСОБНОСТЬ.

Keywords: DIMENSIONAL ANALYSIS, ELEC-
TROMECHANICAL SENSOR, ACCURACY,
LABOR INTENSITY, PERFORMANCE.

¹ Автор для ведения переписки

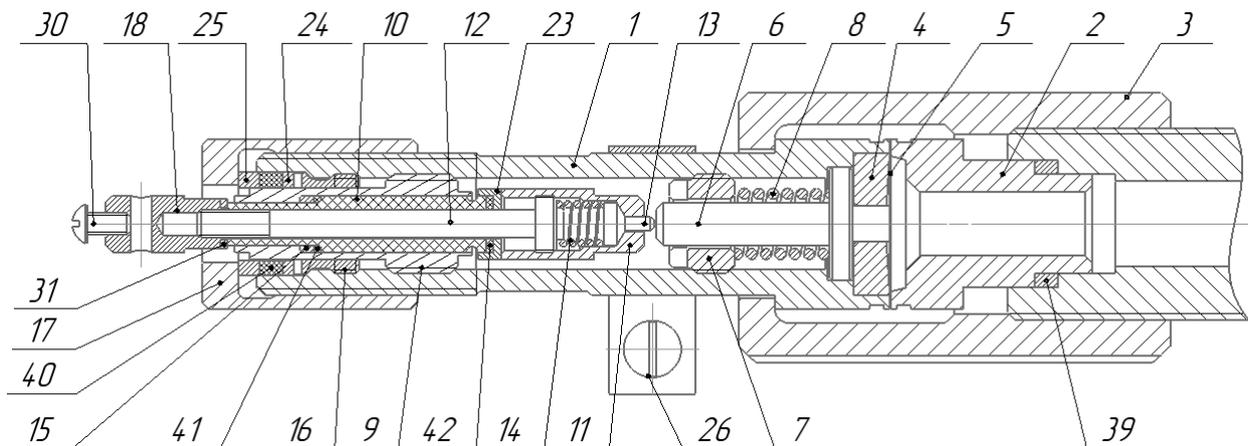
1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Одним из важнейших инструментов создания качественных изделий, способных с высокой надежностью функционировать в течение всего срока эксплуатации, является размерный анализ [1-20]. Он позволяет обеспечить требуемую точность функциональных параметров изделий и увязать между собой многие основные характеристики разных этапов жизненного цикла изделия. При этом размерный анализ также является связующим звеном между конструкторскими и технологическими этапами подготовки производства к выпуску новой продукции. Важным является и тот факт, что этот анализ является универсальным средством, пригодным для расчета любой конструкции или отдельного узла.

2 Материалы и методы

Предметом настоящего исследования является применение размерно-точностного анализа для оценки конструктивного исполнения электромеханического датчика с целью обоснования его наиболее рациональной конструкции, обеспечивающей с наименьшими технико-экономическими затратами выполнение его функционального назначения. В качестве примера для проведения такого анализа выбран электромеханический датчик давления, предназначенный для контроля величины давления жидкости, конструкция которого приведена на рис. 1.

Нижняя часть электромеханического датчика давления (ЭМД) включает в себя стакан 2, имеющий поверхности для установки по месту эксплуатации, и внутреннюю полость, в которую поступает жидкость.



- 1 – корпус; 2 – стакан; 3, 17 – гайка; 4 – вкладыш; 5 – мембрана; 6 – толкатель; 7 – пробка;
 8, 14 – пружина; 9 – корпус контакта; 10 – изолятор; 11, 24, 25 – втулка; 12, 28 – винт;
 13 – контакт; 15 – кольцо; 16 – пробка; 18 – наконечник; 23 – чашка; 26 – хомут;
 31 – шайба; 39, 40, 41, 42 – прокладка

Рисунок 1 – Конструкция электромеханического датчика давления

Стакан совместно с мембраной 5 и корпусом 1 соединены сваркой. При росте давления жидкости до 0,2 ... 0,5 МПа происходит прилегание мембраны к вкладышу 6, что вызывает перемещение толкателя 6 и соприкосновение его торца с контактом 13. В этот момент контакт перемещается относительно втулки 11, поджимая пружину 14. При значении давления ниже 0,2 МПа детали перемещаются в исходное положение, а между контактом и толкателем должен присутствовать зазор величиной 0,3_{-0,1} мм. В конструкции предусмотрена регулировка положения толкателя 6 в направлении вкладыша 4 с помощью пружины 8 и пробки 7.

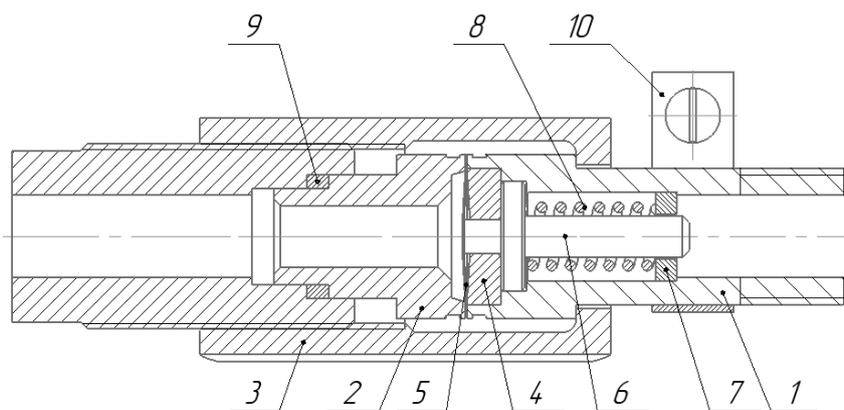
Детали и узлы в верхней части ЭМД предназначены для обеспечения требуемого положения контакта относительно корпуса *1* и толкателя *6* и возможности его регулирования. Корпус *11*, в котором находится контакт *13*, через винт *12* соединен с керамическим изолятором *10*, который, в свою очередь, жестко соединен с корпусом *9*. Корпус посредством резьбового соединения перемещается относительно корпуса *1*, за счет чего и реализуется регулировка. Остальные детали обеспечивают неподвижность достигнутого положения корпуса *9*. На винт *12* устанавливаются шайба и наконечник *18* с винтом *30*. Одновременно с этим в осевом направлении создается нагрузка, обеспечивающая поджатие деталей к изолятору.

В процессе испытаний ЭМД на срабатывание к наконечнику *18* подводится напряжение 24 В, а к хомуту *26* – щупы измерительного прибора. В случае соприкосновения поверхностей деталей *6*, *13*, на хомуте присутствует напряжение, а при наличии зазора между упомянутыми деталями напряжение отсутствует. Наличие токопроводящей цепи в конструкции возможно благодаря использованию керамического изолятора *10*.

В качестве основного недостатка существующей конструкции можно выделить высокую трудоемкость изготовления и сборки ЭМД ввиду наличия большого объема пригоночных и регулировочных работ. Дальнейший анализ позволит установить причины их проведения и выявить пути снижения трудоемкости изготовления ЭМД.

3 Результаты исследований

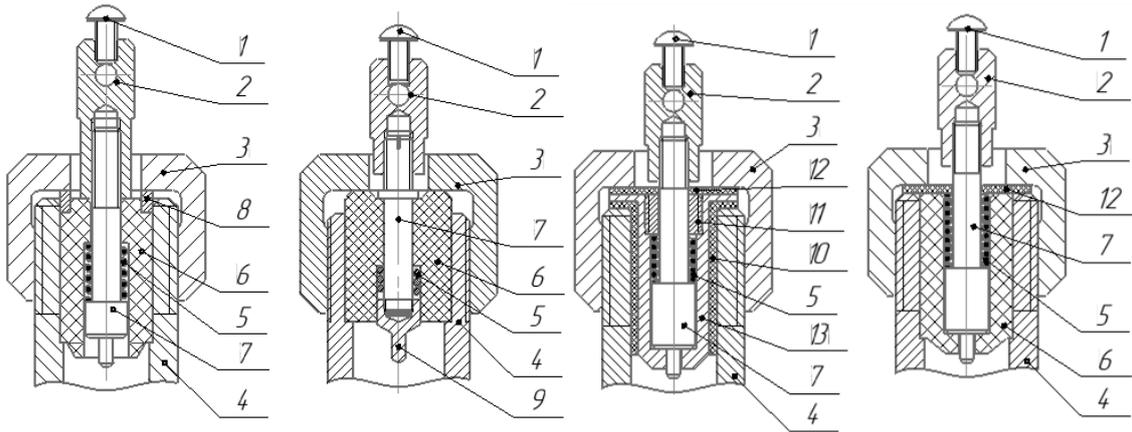
На рис. 2 представлено новое решение нижней части ЭМД. Она отличается от исходной отсутствием механизма регулировки положения толкателя, реализующегося за счет поджатия пружины резьбовой пробкой. Вместо нее предусмотрена шайба, которая устанавливается во внутреннюю проточку корпуса. Параметры пружины и величину ее поджатия приняты равными исходным.



1 – корпус; *2* – стакан; *3* – гайка; *4* – вкладыш; *5* – мембрана; *6* – толкатель;
7 – шайба; *8* – пружина; *9* – прокладка; *10* – хомут

Рисунок 2 – Конструкция нижней части ЭМД

Конструкция верхней части может быть выполнена в нескольких вариантах (рис. 3). Первый вариант предусматривает установку изолятора в корпус ЭМД и фиксацию его с помощью прокладки и гайки. В изоляторе предусмотрено отверстие для установки пружины с винтом. Винт имеет аналогичные с контактом поверхности для взаимодействия с толкателем. Для определения положения винта в осевом положении предусмотрена резьба, на которую накручивается наконечник. Он упирается в изолятор, ограничивая ход винта.



1 – винт; 2 – наконечник; 3 – гайка; 4 – корпус; 5 – пружина; 6 – изолятор; 7 – винт; 8 – втулка; 9 – контакт; 10, 13 – стакан; 11 – пробка резьбовая; 12 – прокладка

Рисунок 3 – Конструкция верхней части ЭМД

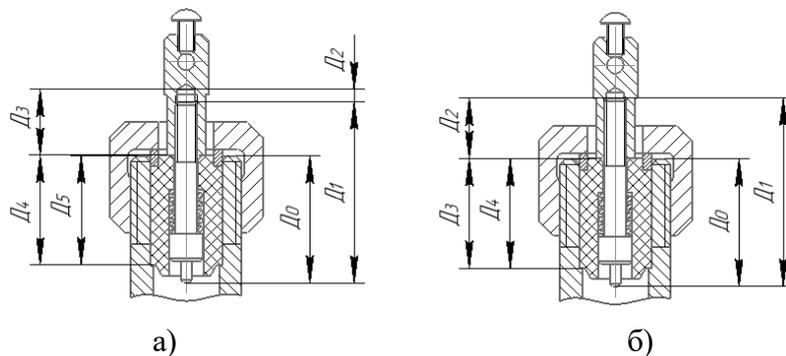
Второй вариант отличается от первого наличием контакта, который накручивается на винт. Винт имеет ограничитель осевого перемещения в виде ступени, расположенной в верхней части конструкции. Изолятор устанавливается в корпус без прокладки.

Следующий вариант предусматривает использование стального стакана для базирования винта. Для ограничения перемещения винта в осевом направлении предусмотрена резьбовая пробка, закручивание которой увеличивает усилие, создаваемое пружиной. Для обеспечения электрической изоляции корпуса относительно винта предусмотрен стакан и прокладка, изготовленные из диэлектрического материала.

Последняя конструкция предусматривает установку винта с пружиной в керамический изолятор. Изолятор помещен в корпус и закреплен через прокладку гайкой.

Ниже приведен размерный анализ вариантов конструкции с целью определения возможности достижения заданной точности положения толкателя относительно торца корпуса.

Размерная цепь для первого варианта конструкции ЭМД показана на рис. 4, в которой с целью реализации регулировки введено звено D_2 .



а – метод регулирования; б – метод неполной взаимозаменяемости

Рисунок 4 – Размерная цепь, описывающая достижение точности ЭМД первого варианта конструкции

Это позволяет, как показано в табл. 1, значительно расширить допуски деталей. Однако операция регулировки повлечет за собой дополнительные затраты в процессе сборки ЭМД.

Таблица 1 – Физическая сущность звеньев размерной цепи D (метод регулирования)

Звено	Физическая сущность звеньев	Размер, мм
D_0	Положение торца винта относительно торца корпуса	$23,5^{+0,1}$
D_1	Длина винта	$32,5h14(-0,62)$
D_2	Запас хода винта по резьбе наконечника	2^{+1}
D_3	Глубина нарезки резьбы в отверстии наконечника	$11^{+0,5}$
D_4	Размер изолятора	$20h14(-0,52)$
D_5	Размер проточки корпуса	$20H14(+0,52)$

Для достижения точности методом неполной взаимозаменяемости наконечник должен накручиваться на винт до упора (конца резьбы), что позволяет исключить звено D_2 . Результаты расчета допуска звена D_0 с учетом точности деталей в пределах 11 квалитета для этого случая представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Физическая сущность звеньев размерной цепи D (метод неполной взаимозаменяемости)

Звено	Физическая сущность звеньев	Размер, мм
D_0	Положение торца винта относительно торца корпуса	$21,5^{+0,367}_{-0,553}$
D_1	Длина винта	$32,5h11(-0,16)$
D_2	Глубина нарезки резьбы в отверстии наконечника	$11^{+0,5}$
D_3	Размер изолятора	$20h11(-0,13)$
D_4	Размер проточки корпуса	$20H11(+0,13)$

Как видно из табл. 2, величина допуска звена D_0 составляет 0,186 мм. Это значение больше половины (62 %) от общего допуска замыкающего звена (0,3 мм). Для снижения доли допуска необходимо сузить допуски на составляющие звенья до 9-11 квалитета.

Размерная цепь для второго варианта конструкции ЭМД показана на рис. 5, а физическая сущность звеньев сведена в табл. 3.

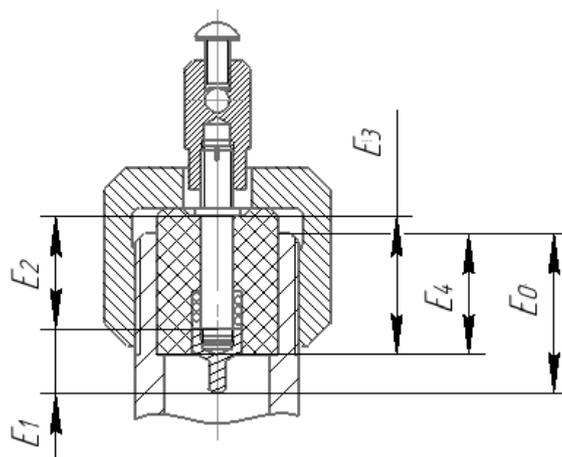


Рисунок 5 – Размерная цепь, описывающая достижение точности ЭМД второго варианта конструкции

Общее количество составляющих звеньев в рассматриваемой размерной цепи – 4. Заданную точность достичь будет проще, чем в первом варианте конструкции ЭМД по методу неполной взаимозаменяемости. Величина допуска звена E_0 составляет 0,07 мм. Это значение составляет менее трети (23 %) от общего допуска замыкающего звена (0,3 мм).

Таблица 3 – Физическая сущность звеньев размерной цепи E

Звено	Физическая сущность звеньев	Размер, мм
E_0	Положение торца винта относительно торца корпуса	$20^{+0.045}_{-0.025}$
E_1	Длина наконечника	$8h11(-0,09)$
E_2	Размер винта	$14h11(-0,11)$
E_3	Размер корпуса	$17h11(-0,11)$
E_4	Размер проточки корпуса	$15H11(+0,11)$

Размерная цепь для третьего варианта конструкции СП показана на рис. 6, а физическая сущность звеньев сведена в табл. 4.

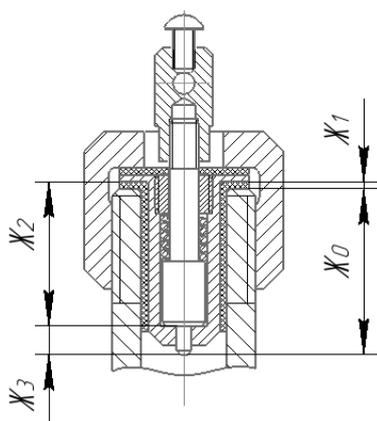


Рисунок 6 – Размерная цепь, описывающая достижение точности ЭМД третьего варианта конструкции

Таблица 4 – Физическая сущность звеньев размерной цепи J

Звено	Физическая сущность звеньев	Размер, мм
J_0	Положение торца винта относительно торца корпуса	$23^{+0.029}_{-0.044}$
J_1	Толщина фланца диэлектрического стакана	$1h11(-0,06)$
J_2	Размер стального стакана	$20 \pm 0,1$
J_3	Размер винта	$4h11(-0,075)$

Общее количество составляющих звеньев в рассматриваемой размерной цепи – 3. Заданную точность достичь будет проще, чем в предыдущих вариантах конструкции ЭМД. Величина допуска звена J_0 составляет 0,073 мм. Полученное значение несколько выше, чем в предыдущем варианте, не смотря на меньшее количество звеньев. Величина допуска составляет менее трети (24 %) от общего допуска замыкающего звена (0,3 мм).

Размерная цепь для четвертого варианта конструкции ЭМД показана на рис. 7, а физическая сущность звеньев сведена в табл. 5.

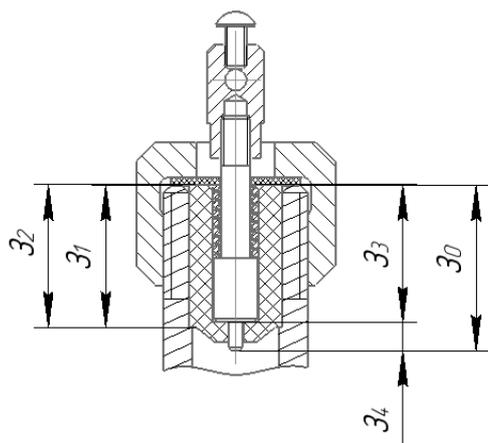


Рисунок 7 – Размерная цепь, описывающая достижение точности ЭМД четвертого варианта конструкции

Таблица 5 - Физическая сущность звеньев размерной цепи 3

Звено	Физическая сущность звеньев	Размер, мм
Z_0	Положение торца винта относительно торца корпуса	$23_{-0.142}^{-0.063}$
Z_1	Размер проточки корпуса	$20H11^{(+0,13)}$
Z_2	Размер изолятора	$20H11_{(-0,13)}$
Z_3	Размер изолятора	$19H11^{(+0,13)}$
Z_4	Размер винта	$4h11_{(-0,075)}$

Общее количество составляющих звеньев в рассматриваемой размерной цепи – 4. Величина допуска звена Z_0 составляет 0,079 мм. Величина допуска составляет менее трети (26 %) от общего допуска замыкающего звена (0,3 мм).

4 Обсуждение и заключение

Проведенный размерно-точностной анализ предложенных новых конструктивных решений верхней части ЭМД показал, что наиболее предпочтительными для дальнейшей проработки следует принять первый вариант конструкции с учетом использования регулировки и третий вариант, включающий в себя наименьшее число составляющих звеньев и достаточно малую величину допуска замыкающего звена. Окончательный выбор конструкции ЭМД можно произвести только после технико-экономической оценки и анализа результатов моделирования их работоспособности в условиях эксплуатации.

Список литературы

- 1 Безъязычный, В. Ф., Обеспечение качества изделий при сборке [Текст] / В. Ф., Безъязычный, В. В. Непомилуев, А. Н. Семенов. – Издательский дом «Спектр». – 2002. – 204 с.
- 2 Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин [Текст] / А. М. Дальский. – М., Машиностроение, 1975-223 с.
- 3 Польский, Е. А. Технологическое обеспечение точности наукоемких сборочных узлов на жизненного цикла [Текст] / Е. А. Польский, О. А. Никонов, Н. С. Митраков, Ф. Д. Звягинцев. – Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – Вып. 8. – Ч. 2. – С. 328-335.
- 4 Сулов, А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений [Текст] / А. Г. Сулов, В. П. Федоров, О. А. Горленко [и др.]; под общ. ред. А. Г. Сулова. – Москва : Машиностроение, 2006. – 447 с.
- 5 Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. – Том 1. Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – Москва, изд-во "Машиностроение", 1968.

- 6 Датчики тепловых физических и механических параметров: Справочник в трех томах / Под общ. ред. Ю. Н. Коптева. Под ред. Е. Е. Багдатьяева, А. В. Гориша, Я. В. Малкова. – М.: ИПРЖР, Т.1, 1998 – 548 с; Т. 1 (кн. 2) 1999 – 512 с.
- 7 Карпов, В. И. Оценка механической надежности элементов конструкции датчика. – Датчики систем измерения, контроля и управления.: Меж. вуз. сб. науч. тр. – Пенза: Пенз. политех. ин-т, 1981. – Вып.1. – С. 139-143.
- 8 Антонюк, В. Е. Динамическая стабилизация в производстве маложестких деталей / В. Е. Антонюк. – Минск: Беларуская навука. – 2017. – 190 с.
- 9 Хенкин, М. Л., Локшин И. Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении [Текст] / М. Л. Хенкин, И. Х. Локшин. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
- 10 Гаврюсов, В. И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций [Текст] / В. И. Гаврюсов. – Л.: ЦНИИ «Румб», 1990. – 113 с.
- 11 Яковлева, С. А. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций в приборостроении [Текст] / С. А. Яковлева, О. С. Юльметова. – Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 8. – С. 23-26.
- 12 Ильицкий, В. Б. Модель обеспечения качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей [Текст] / В. Б. Ильицкий, Е. А. Польский, Д. М. Филькин // Справочник. Инженерный журнал. – 2010. – №4. – С. 51-56.
- 13 Хромов, В. Н. Расчет размерной цепи с учетом эксплуатационных изменений звеньев [Текст] / В. Н. Хромов, М. Г. Дегтярев, З. П. Лисовская. – Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2004. – №9. – С. 19-21.
- 14 Справочник технолога-машиностроителя [Текст]: в 2 т. Т.2. / А. М. Дальский, А. Г. Косилова, [и др.]. – М.: Машиностроение, 2001. – 912 с.
- 15 Рыжов, Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин [Текст] / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. - М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
- 16 Оськин, Д. А. Совершенствование расчета технологических размеров на основе выявления обратных связей между допусками и условиями обработки [Текст] / Д. А. Оськин, В. Б. Масягин // Технология машиностроения. – 2007. – №8. – С. 18-23.
- 17 Непомилуев, В. В. Способы регулирования нежестких размерных цепей [Текст] / В. В. Непомилуев, В. Ю. Ерошков, М. Е. Ильина // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – №3. – С. 24-27.
- 18 Маталин, А. А. Технология машиностроения [Текст]: учеб, для вузов / А. А. Маталин. – Изд. 2 испр. – СПб: Лань, 2008. – 511 с.
- 19 Коганов, И. А. Основы размерного анализа технологических процессов: учеб пособие [Текст] / И. А. Коганов, Б. В. Морозов. – Тула: Тул. гос. тех. ун-т., 1994. – 67 с.
- 20 Горленко, О. А. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных показателей деталей машин [Текст] / О. А. Горленко // Трение и износ. – 1997. – Т.18. – №3. – С. 361-368.

References

- 1 Bezyazychny, V. F., Ensuring the quality of products during assembly [Text] / V. F., Bezyazychny, V. V Nепomiluev, A. N Semenov. – Spektr Publishing House. - 2002. - 204 p.
- 2 Dalsky, A. M. Technological support for the reliability of high-precision machine parts [Text] / A. M. Dalsky. – M., Mechanical Engineering, 1975-223 p.
- 3 Polsky, E. A. Technological support for the accuracy of high-tech assembly units during the life cycle [Text] / E. A. Polsky, O. A. Nikonov, N. S. Mitnikov, F. D. Zvyagintsev. – News of Tula State University. Technical science. – 2017. – Issue. 8. - Part 2. - pp. 328-335.
- 4 Suslov, A. G. Technological support and improvement of operational properties of parts and their connections [Text] / A. G. Suslov, V. P. Fedorov, O. A. Gorlenko [etc.]; under general ed. A. G. Suslova. – Moscow: Mechanical Engineering, 2006. – 447 p.

5 Strength, stability, vibrations. A reference book in three volumes. – Volume 1. Ed. I. A. Birger and Y. G. Panovko. – Moscow, publishing house "Machine Building", 1968.

6 Sensors of thermophysical and mechanical parameters: A reference book in three volumes / Under the general. ed. Yu. N. Kopteva. Ed. E. E. Bagdatyeva, A. V. Gorisha, Y. V. Malkova. – M.: IPRZHR, T.1, 1998 – 548 p.; T. 1 (book 2) 1999 – 512 p.

7 Karpov, V.I. Assessment of mechanical reliability of sensor design elements. – Sensors for measurement, monitoring and control systems: Inter. university collection of scientific tr. – Penza: Penz. Polytech. Institute, 1981. – Issue 1. – pp. 139-143.

8 Antonyuk, V. E. Dynamic stabilization in the production of low-rigid parts / V. E. Antonyuk. – Minsk: Belarusian science. - 2017. - 190 p.

9 Khenkin, M. L., Lokshin I. Kh. Dimensional stability of metals and alloys in precision engineering and instrument making [Text] / M. L. Khenkin, I. Kh. Lokshin. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 256 p.

10 Gavryusev, V. I. Dimensional stability of materials and structural elements [Text] / V. I. Gavryusev. – L.: Central Research Institute "Rumb", 1990. – 113 p.

11 Yakovleva, S. A. Dimensional stability of materials and structural elements in instrument engineering [Text] / S. A. Yakovleva, O. S. Yulmetova. – Izv. universities Instrumentation. – 2010. – T. 53. – No. 8. – P. 23-26.

12 Ilyitsky, V. B. Model for ensuring the quality of assembly units based on the analysis of dimensional relationships [Text] / V. B. Ilyitsky, E. A. Polsky, D. M. Filkin // Handbook. Engineering magazine. – 2010. – No. 4. – P. 51-56.

13 Khromov, V. N. Calculation of a dimensional chain taking into account operational changes in links [Text] / V. N. Khromov, M. G. Degtyarev, Z. P. Lisovskaya. – Assembly in mechanical engineering, instrument making. – 2004. – No. 9. – pp. 19-21.

14 Handbook of mechanical engineering technologist [Text]: in 2 volumes. T.2. / A. M. Dalsky, A. G. Kosilova, [etc.]. – M.: Mashinostroenie, 2001. – 912 p.

15 Ryzhov, E. V. Technological support of the operational properties of machine parts [Text] / E. V. Ryzhov, A. G. Suslov, V. P. Fedorov. - M.: Mechanical Engineering, 1979. – 176 p.

16 Oskin, D. A. Improving the calculation of technological dimensions based on identifying feedback between tolerances and processing conditions [Text] / D. A. Oskin, V. B. Masyagin // Mechanical Engineering Technology. – 2007. – No. 8. – pp. 18-23.

17 Nepomiluev, V.V. Methods for regulating non-rigid dimensional chains [Text] / V.V. Nepomiluev, V.Yu. Eroshkov, M.E. Ilyina // Assembly in mechanical engineering, instrument making. – 2005. – No. Z. – pp. 24-27.

18 Matalin, A. A. Mechanical engineering technology [Text]: textbook for universities / A. A. Matalin. – Ed. 2 rev. – St. Petersburg: Lan, 2008. – 511 p.

19 Koganov, I. A. Fundamentals of dimensional analysis of technological processes: textbook [Text] / I. A. Koganov, B. V. Morozov. – Tula: Tula State Technical University, 1994. – 67 p.

20 Gorlenko, O. A. Technological support and increasing the performance indicators of machine parts [Text] / O. A. Gorlenko // Friction and wear. - 1997. - T.18. - No. 3. – P.361-368.

© Лебедев В.А., Коваль Н.С., Котенко О.Н., 2024

DOI: [10.34220/2311-8873-2024-61-69](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2024-61-69)



УДК 621.923

UDC 621.923

2.5.6 – технология машиностроения

ГРУППИРОВАНИЕ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ ОПЕРАЦИЙ ПРОДОЛЬНОГО БЕСЦЕНТРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

GROUPING BY TECHNOLOGICAL FEATURES OF LONGITUDINAL CENTERLESS GRINDING OPERATIONS

✉¹ **Малинин Павел Витальевич**,
аспирант, Камышинский технологический
институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоград-
ский государственный технический универ-
ситет», г. Камышин, e-mail: mpv92@yandex.ru

✉¹ **Malinin Pavel Vitalievich**,
postgraduate student, Kamyshinsky institute of tech-
nology (branch), Volgograd state technical univer-
sity, Kamyshin, e-mail: mpv92@yandex.ru

Бочкарев Петр Юрьевич,
д.т.н., профессор, Камышинский технологи-
ческий институт (филиал) ФГБОУ ВО «Вол-
гоградский государственный технический
университет», г. Камышин; профессор,
Саратовский государственный университет
генетики, биотехнологии и инженерии
имени Н. И. Вавилова, г. Саратов,
e-mail: bpy@mail.ru

Bochkarev Peter Yurievich,
doctor of technical sciences, professor, Kamyshinsky
technological institute (branch) of the Volgograd
state technical university, Kamyshin; professor,
Saratov state university of genetics, biotechnology
and engineering named after N. I. Vavilov, Saratov,
e-mail: bpy@mail.ru

Аннотация. Продольный способ бесцентро-
вого шлифования, помимо высокой произво-
дительности, отличается высокой точностью
обработки. Тем не менее, в настоящих систе-
мах производства его применение достаточно
ограничено. Отсутствие окончательно утвер-
жденных этапов наладки оборудования и
управления реализацией технологической опе-
рации является одним из основных факторов,
влияющих на область применения. В данной
статье представлены предложения по струк-
турной классификации продольного бесцен-
тровоного шлифования. Эти предложения вклю-
чают группирование процедур отдельных эта-
пов технологического обеспечения на основе
критерия однородности проектных процедур.
Разработанные стандартизированные модели
позволяют последовательно формировать
группы схем обработки с учетом конкретных
условий производства. Представлены выводы
о классификации методов обработки для

Annotation. The longitudinal method of center-
less grinding, in addition to high productivity, is
characterized by high processing accuracy. How-
ever, its use is quite limited in current production
systems. The lack of definitively approved stages
of equipment commissioning and control of the
implementation of a technological operation is
one of the main factors affecting the scope of ap-
plication. This article presents proposals for the
structural classification of longitudinal centerless
grinding. These proposals include the grouping
of procedures for individual stages of technologi-
cal support based on the criterion of uniformity
of design procedures. The developed standard-
ized models allow the sequential formation of
groups of processing schemes taking into account
specific production conditions. Conclusions on
the classification of processing methods for de-
sign procedures for determining the optimal tech-
nological modes of longitudinal centerless grind-
ing operations are presented.

проектных процедур определения оптимальных технологических режимов продольных бесцентрово-шлифовальных операций.

Ключевые слова: БЕСЦЕНТРОВОЕ ШЛИФОВАНИЕ, МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИЕ ПРОИЗВОДСТВА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА, БЕСЦЕНТРОВО-ШЛИФОВАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА, ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Keywords: CENTERLESS GRINDING, MACHINING INDUSTRIES, TECHNOLOGICAL PREPARATION, CENTERLESS GRINDING, DESIGN OF TECHNOLOGICAL PROCESSES, DESIGN AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В отличие от других методов обработки поверхностей деталей бесцентровое шлифование, применяемое на различных высокоточных машиностроительных производствах, имеет ряд существенных преимуществ. Среди них наиболее значимыми преимуществами являются высокая производительность процесса обработки и возможность получения высокой размерной и геометрической точности поверхностей деталей за счет специфических особенностей схем обработки, снижающих влияние исходных погрешностей обрабатываемых поверхностей, являющихся в то же время и базовыми [1-3]. При этом, необходимо выделить высокую жесткость применяемого оборудования, большую режущую поверхность шлифовальных кругов, что напрямую связано с увеличением времени сохранения их режущих свойств. Несмотря на ряд преимуществ способа, область применения технологических операций бесцентрового шлифования показывает ограниченность и узкую специализацию их использования, что является текущей острой проблемной задачей развития методов бесцентрового шлифования. Реализация данных методов обработки в первую очередь сдерживается причиной сложности наладки и подналадки оборудования, связанной с отсутствием формализованных методик проведения работ [4]. Уровень подгонки технологической системы зависит от квалификации и опыта исполнителя, что вносит субъективный элемент не только в итоги выполнения операции, но и в организацию всего производственного цикла. Еще одной значимой задачей является проведение исследований с целью разработки способов определения силовых воздействий между компонентами технологической системы во время обработки на всех участках рабочей зоны, чтобы обеспечить равномерное вращение детали. Эти обстоятельства приводят к значительным затратам времени и труда при настройке и управлении процессами, ограничивая их эффективное использование до условий массового и крупносерийного производства. Учитывая, что возможности развития операций, проводимых на бесцентровом оборудовании, ограничены направлениями, связанными с автоматизацией производственного процесса, создание полных моделей, описывающих все его аспекты, является первостепенной задачей.

2 Материалы и методы

Несмотря на видимое единообразие, схемы бесцентрового шлифования предлагают многочисленные способы реализации, включая компоновку оборудования, характеристики конструк-

ции обрабатываемой поверхности, технологические решения по правке кругов, регулировке режимов или заданию режимов. Решение этих вопросов предложено осуществлять путем создания однородных методов бесцентрового шлифования по группам [5-7], определяемым по группам однородности их технологической подготовки и моделями, что способствует научной унификации для создания автоматизированных подсистем автоматизированного проектирования.

В работе рассмотрено применение данной методологии для операций продольного бесцентрового шлифования.

Ключевым преимуществом метода продольного бесцентрового шлифования является его способность изготавливать детали стабильного качества с высокой производительностью, поскольку он дает возможность шлифования всей поверхности или нескольких поверхностей одновременно. Благодаря принципиальной схеме обработки и использованию преимущественно только одного основного движения, которое реализуется перпендикулярно к шлифуемой поверхности, достигаются следующие преимущества по сравнению с другими видами технологических операций: обеспечивается стабильность размеров обработанных деталей в партии; возможно использование повышенных режимов резания благодаря схеме силового замыкания; уменьшаются припуски благодаря базированию по обрабатываемой поверхности; значительно сокращается вспомогательное время на установку.

При определении оптимального метода бесцентрового продольного шлифования для обработки наружных поверхностей типа тел вращения необходимо учитывать множество факторов. Это позволяет обеспечить не только требуемые качественные характеристики обрабатываемых деталей, но и учесть технико-экономические показатели реализации технологического процесса с учетом реальных производственных условий. Важно осуществлять анализ всех этих факторов при принятии рациональных проектных решений [8-10]. Рекомендуется классифицировать методы продольного шлифования на основе определения схожих процедур технологической подготовки производства.

Для осуществления группировки необходима классификация по областям, которые имеют условную независимость, с этой целью характеристики процесса разбивают на отдельные блоки. Методы бесцентрового шлифования группируются на возможные схемы обработки по близости характеристик, отражающих технологические особенности, исходя из их состояния (рис. 1).



Рисунок 1 – Конструкторско-технологические признаки способов бесцентровой шлифовальной обработки

Сформированные критерии позволяют в полной мере описать диапазоны возможностей и технологические параметры процесса обработки [6, 7] по следующим блокам характеристик процесса:

- конструктивные параметры объектов обработки с использованием способов бесцентрового шлифования (вид обрабатываемой поверхности, конструктивные особенности детали, размерные характеристики обрабатываемой поверхности, обрабатываемость материала детали и др.);

- компоновочная схема технологического оборудования (структурная схема обработки, применяемые приводы и др.);

- информация о шлифовальном (ых) круге (ах) (количество кругов, виды движения, направление движения, расположение оси круга относительно координат оборудования, форма профиля круга и др.);

- информация о ведущем(их) круге(ах) (количество кругов, виды движения, направление кругового движения, расположение оси круга относительно координат оборудования, форма профиля круга и др.);

- схема базирования заготовки (виды базовых поверхностей, взаимное расположение обрабатываемых и базовых поверхностей и др.);

- характеристики установочных (направляющих) элементов (конструкция элементов, относительное движение детали к установочным элементам, расположение оси направляющего элемента относительно координат станка и др.).

Так, например, при внесении данных в исходную таблицу к значению с порядковым номером относят способ продольного шлифования открытых поверхностей с подачей (перемещением) заготовки за счет кинематических схем обработки, при использовании подвижных направляющих, имеющих контакт заготовки со шлифовальным кругом в одном месте.

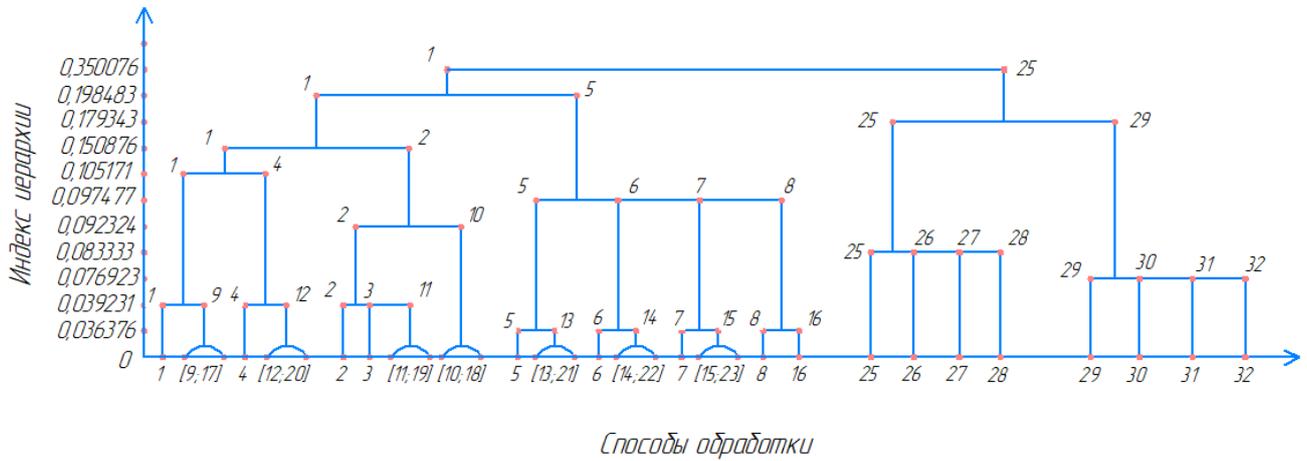
Описанные критерии позволили выполнить обоснование структуры исходной базы данных для всех вариантов схем бесцентрово-шлифовальной обработки как для существующего, так и перспективного оборудования. Заполнение базы данных осуществлялось в реляционной форме, что обеспечивает сокращение неоднозначности при определении ее элементов и ориентировано на использование кластерного анализа в качестве математического аппарата в дальнейших исследованиях.

3 Результаты исследований

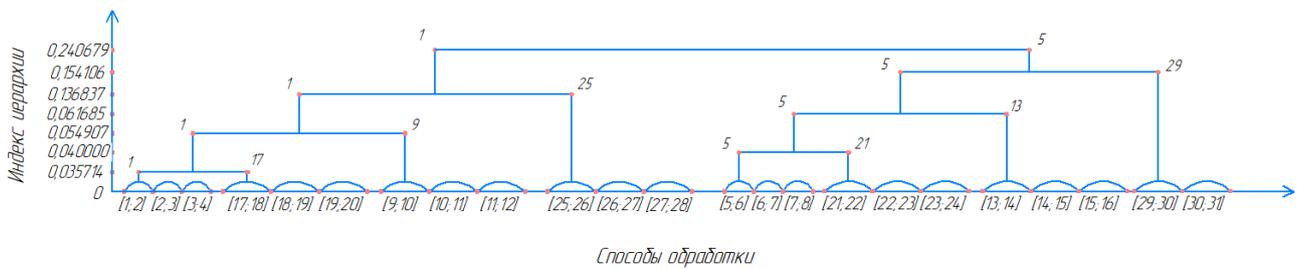
При выполнении структуризации бесцентрово-шлифовального оборудования для операций продольного шлифования в части конструктивных особенностей анализировались следующие параметры: виды компоновок; направления движения шлифовальной бабки; схема расположения опор шпинделей и расположение линии центров (вертикальные, горизонтальные, под наклоном) и др. По конструктивным признакам объектов обработки: вид обрабатываемой поверхности, размерные характеристики, обрабатываемость материала. Сведениям по применяемым шлифовальным и ведущим кругам: форма кругов и их количество, направления вращения, расположения оси кругов в системе координат станка. Особенности использования установочных (опорных) элементов, форма их поверхностей и ориентация.

Сформированные базы данных явились исходными данными для исследования методов продольного бесцентрового шлифования с использованием аппарата кластерного анализа.

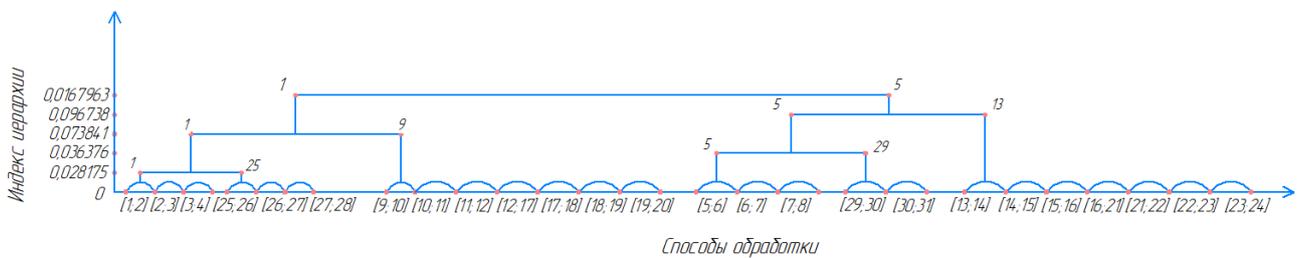
На рис. 2 представлены результаты автоматической классификации по таблице различий в виде дендограмм (для общей базы данных и ее составляющих блоков) [11].



а)



б)



в)

- а – возможности и технологические параметры процесса;
- б – информация по местам контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы;
- в – направления и величины составляющих сил

Рисунок 2 – Дендограммы результатов кластеризации методов продольного бесцентрового шлифования

Применительно к проектным процедурам назначения режимов резания с учетом реального состояния технологического оборудования [12] были сформированы дополнительные базы данных, отражающие информацию по местам контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы, направления и величины составляющих сил в этих местах (рис. 2). Алгоритм определения результатов кластерного анализа выполнялся на основе расчетного стан-

дартного индекса иерархии на каждом уровне дендрограмм с последующим обоснованием заключения об однородности сформированных групп на основе применения математического аппарата теории множеств (рис. 3).

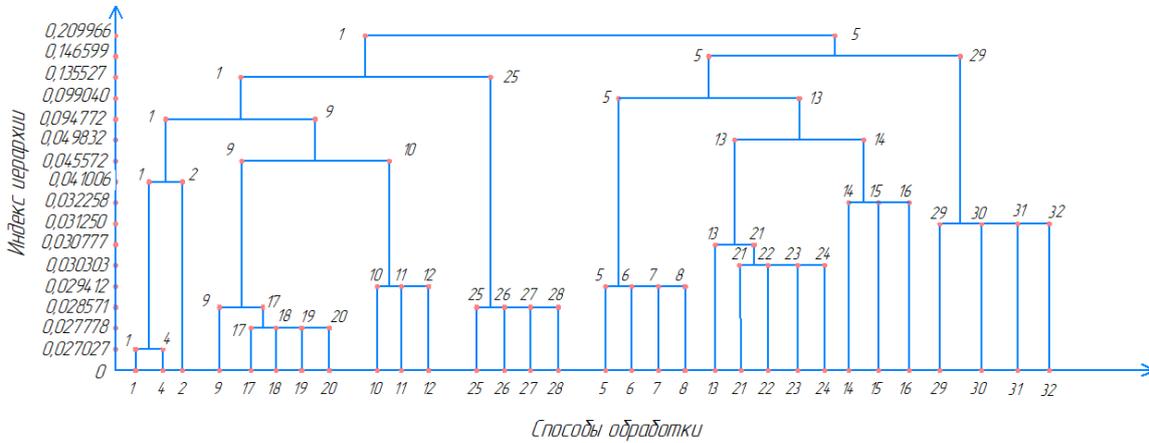


Рисунок 3 – Результат формирования кластеров способов продольного бесцентрового шлифования по однородности проектных процедур определения технологических режимов обработки

Практическим значением представленных результатов исследований является вариативность сформированных составов групп способов продольного бесцентрового шлифования применительно к этапам технологической подготовки производства, связанных с определением режимов резания, обеспечивающих заданные качественные показатели обрабатываемой поверхности.

По результатам кластерного анализа сгенерированы несколько вариантов объединений групп, имеющих сходство по проектным процедурам. В первом варианте, значение уровня иерархии определялось значением 0,135527. На рис. 4 представлено объединение, включающее сформированные три группы способов продольного бесцентрового шлифования. В первую сформированную группу X1 вошло множество способов обработки $X1 = \{1; 4; 2; 9; 17; 18; 19; 20; 10; 11; 12; 25; 26; 27; 28\}$. Вторая группа X2, сформированная на уровне иерархии 0,099040, состоит из следующего множества $X2 = \{5; 6; 7; 8; 13; 21; 22; 23; 24; 14; 15; 16\}$. Третья группа X3, сформированная на уровне иерархии 0,031250, представляет собой $X3 = \{29; 30; 31; 32\}$.

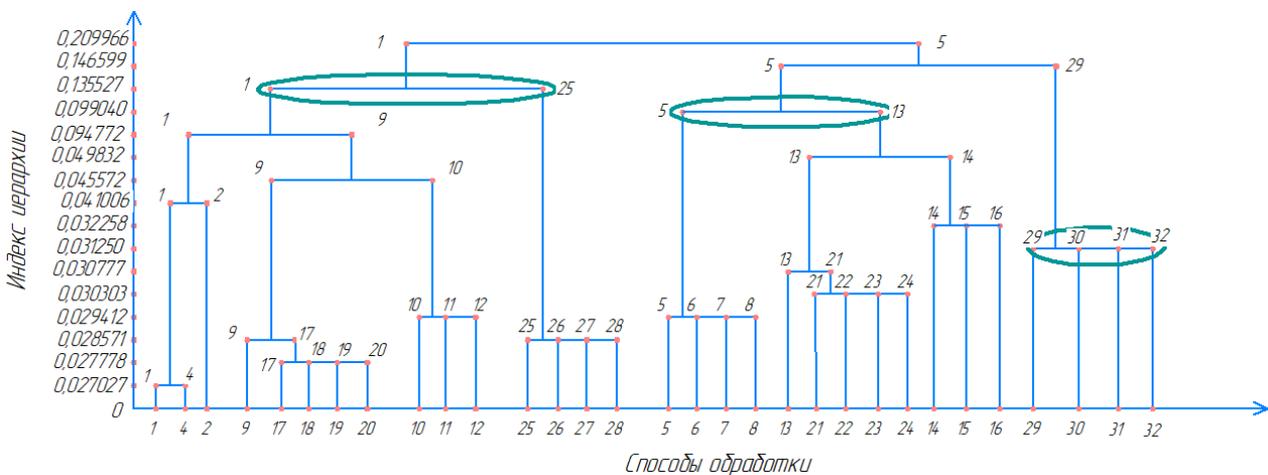


Рисунок 4 – Первый вариант объединения групп способов продольного бесцентрового шлифования по однородности проектных процедур определения технологических режимов обработки

После анализа значений набора X1 установлено, что приоритетные объединяющие характеристики проектных процедур расчета продольного бесцентрового шлифования присутствуют при обработке только открытых поверхностей, с опорой заготовки на подвижную направляющую. Путем исследования значений набора X2 установлено, что расчетные процедуры расчета продольного бесцентрового шлифования обладают приоритетными унифицирующими свойствами при обработке только открытых поверхностей, с опорой заготовки на неподвижную направляющую. Анализ состава набора X3 установил, что главные объединяющие характеристики проектных процедур расчета продольного бесцентрового шлифования присущи обработке только открытых поверхностей, с подачей (перемещением) заготовки за счет формы кругов, с ее опорой на неподвижную направляющую.

Во втором варианте, значение уровня иерархии определялось значением 0,135527. На рис. 5 представлено объединение, включающее сформированные пять групп продольного бесцентрового шлифования. В первую сформированную группу Y1 вошло множество способов обработки $Y1 = \{1; 4; 2; 9; 17; 18; 19; 20; 10; 11; 12\}$. Вторая группа Y2, сформированная на уровне иерархии 0,028571, состоит из следующего множества $Y2 = \{25; 26; 27; 28\}$. Третья группа Y3, сформированная на уровне иерархии 0,029412, представляет собой $Y3 = \{5; 6; 7; 8\}$. Четвертая группа Y4, сформированная на уровне иерархии 0,049832, представляет собой $Y4 = \{13; 21; 22; 23; 24; 14; 15; 16\}$. Пятая группа Y5, сформированная на уровне иерархии 0,031250, представляет собой $Y5 = \{29; 30; 31; 32\}$.

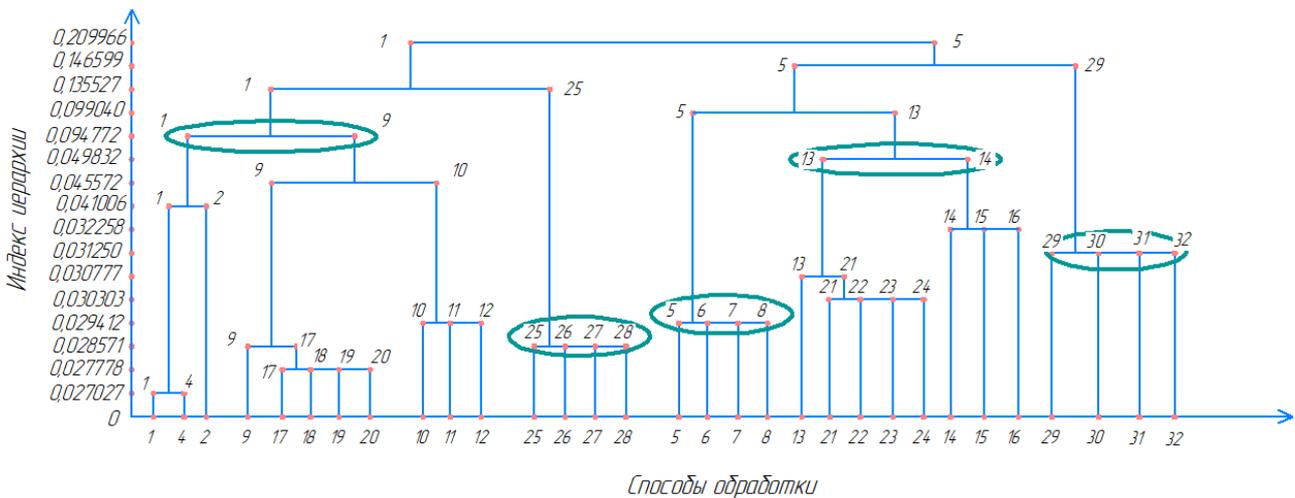


Рисунок 5 – Второй вариант объединения групп способов продольного бесцентрового шлифования по однородности проектных процедур определения технологических режимов обработки

4 Обсуждение и заключение

Проанализировав набор значений Y1 было выявлено, что при обработке проектных процедур расчета продольного бесцентрового шлифования, имеются важные объединяющие характеристики только открытых поверхностей, с опорой заготовки на подвижную направляющую. Проведя исследования характеристик проектных процедур расчета продольного бесцентрового шлифования группы Y2 было обнаружено, что при их использовании присутствуют главные факторы, способствующие объединению при обработке только открытых поверхностей, с подачей (перемещением) заготовки за счет формы кругов, с ее опорой на подвижную направляющую. Изучив значения набора Y3, можно сделать вывод о том, что приоритетные объединяющие характеристики проектных процедур расчета продольного бесцентрового шлифования присутствуют при обработке только открытых поверхностей, с подачей

(перемещением) заготовки за счет кинематических схем обработки, с ее опорой на неподвижную направляющую. В ходе исследования значений группы У4 установлено, что процесс проектных процедур расчета продольного бесцентрового шлифования присутствует при обработке только открытых поверхностей, с опорой заготовки на неподвижную направляющую. При обзоре значений набора У5 было определено, что приоритетные объединяющие характеристики проектных процедур расчета продольного бесцентрового шлифования присутствуют при обработке только открытых поверхностей, с подачей (перемещением) заготовки за счет формы кругов, с ее опорой на неподвижную направляющую.

При сравнении двух вариантов объединений групп, имеющих сходство по проектным процедурам очевидно, что второй вариант, наиболее полно отражает набор исходных данных, характерные особенности процесса и структуру алгоритма методики объединений, что является принципиальным отличительным подходом известных направлений исследований в данной области. Научно обоснованно формализованное формирование пяти множеств способов обработки заготовок при продольном бесцентровом шлифовании, которые дают более точное решение поставленной задачи и позволяют осуществить объективное последовательное формирование групп схем обработки с учетом конкретных условий производства.

На основе данного исследования открывается возможность системного подхода к проведению работ по совершенствованию технологической подготовки операций продольного бесцентрового шлифования для наружных поверхностей типа тел вращения. Для каждой из сформированных групп научно обоснованы граничные зоны по конструкторско-технологическим характеристикам с последующей формализацией методик определения режимов обработки, наладки и управления станками продольного бесцентрового шлифования. Наряду с созданием унифицированного подхода к разработке методического и алгоритмического обеспечения автоматизированной подсистемы проектирования технологических операций бесцентрового шлифования обеспечивается значительное сокращение подготовительно-заготовительного времени, повышение качества и сокращение себестоимости изготовления деталей.

Список литературы

- 1 Справочник технолога / под общей ред. А. Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
- 2 Безъязычный, В. Ф. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 2013. — 568 с.: ил.
- 3 Сулов, А. Г., Дальский А. М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с. с илл.
- 4 Ашкиназий, Я. М., Бесцентровые шлифовальные станки. Конструкции, обработка и правка. М.: Машиностроение, 2003. 352 с.: ил.
- 5 Бочкарев, П. Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П. Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. – 2002. – №1. – С.10–14.
- 6 Малинин, П. В. Структуризация способов бесцентрового шлифования с использованием кластерного анализа / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2022. – № 8. – С. 36-39.
- 7 Малинин, П. В. Совершенствование технологической подготовки операций бесцентрового шлифования / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, Л. Д. Ульянова, В. В. Шалунов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2022. – № 4 (64). – С. 147-160.
- 8 Бочкарев, П. Ю. Структуризация базы данных в САПР ТП с использованием аппарата кластерного анализа // Вестник машиностроения, №3. – 1999. – С.51-55.
- 9 Митин С. Г., Бочкарев П. Ю., Шалунов В. В., Разманов И. А. Определение рациональных уровней отсева вариантов проектных решений в системе автоматизированного планирования технологических процессов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. – № 3 (57). – С. 48-56.

10 Митин, С. Г. Разработка моделей и методик автоматизации проектных процедур для проектирования технологических операций со сложной структурой / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев // Автоматизация в промышленности. 2018. – № 2. – С. 45-51.

11 Бочкарев П. Ю., Шалунов В. В., Малинин П. В. Программа для расчета уровней иерархии при кластерном анализе способов бесцентрового шлифования // свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. (Номер свидетельства: RU 2023610672)

12 Малинин, П. В., Бочкарев П. Ю. Определения наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 144–153.

References

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

2 Bezyazychny, V. F. Fundamentals of mechanical engineering technology: a textbook for universities. - M.: Mechanical Engineering, 2013. - 568 p.: ill.

3 Suslov, A. G., Dalsky A. M. Scientific foundations of mechanical engineering technology. – M.: Mashinostroenie, 2002. – 684 p. from illus.

4 Ashkinaziy, Ya. M., Centerless grinding machines. Designs, processing and editing. M.: Mechanical Engineering, 2003. 352 p.: ill.

5 Bochkarev, P. Yu. System representation of planning technological processes of machining / P. Yu. Bochkarev // Mechanical engineering technology. – 2002. – No. 1. – P.10–14.

6 Malinin, P.V. Structuring methods of centerless grinding using cluster analysis / P.V. Malinin, P.Yu. Bochkarev // News of the Volgograd State Technical University. – 2022. – No. 8. – P. 36-39.

7 Malinin, P.V. Improvement of technological preparation of centerless grinding operations / P.V. Malinin, P.Yu. Bochkarev, L.D. Ulyanova, V.V. Shalunov // News of higher educational institutions. Volga region. Technical science. – 2022. – No. 4(64). – pp. 147-160.

8 Bochkarev, P. Yu. Database structuring in CAD TP using cluster analysis // Bulletin of Mechanical Engineering, No. 3. – 1999. – P.51-55.

9 Mitin S. G., Bochkarev P. Yu., Shalunov V. V., Razmanov I. A. Determination of rational levels of screening options for design solutions in the system of automated planning of technological processes // Vector of Science of Tolyatti State University. 2021. – No. 3 (57). – pp. 48-56.

10 Mitin, S.G. Development of models and methods for automating design procedures for the design of technological operations with a complex structure / S.G. Mitin, P.Yu. Bochkarev // Automation in industry. 2018. – No. 2. – P. 45-51.

11 Bochkarev, P. Yu., Shalunov V. V., Malinin P. V. Program for calculating hierarchy levels in cluster analysis of centerless grinding methods // certificate of state registration of a computer program. (Certificate number: RU 2023610672)

12 Malinin, P.V., Bochkarev P. Yu. Determination of adjustment parameters for continuous centerless grinding operations // News of higher educational institutions. Volga region. Technical science. – 2023. – No. 3. – P. 144–153.

© Малинин П.В., Бочкарев П.Ю., 2024

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-70-76



УДК 656.072

UDC 656.072

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ
СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ
РИСКАМИ ПРИ ПРИОБРЕТЕНИИ
ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ
АВТОТРАНСПОРТНЫМИ
ПРЕДПРИЯТИЯМИ
В СОВРЕМЕННЫХ РЫНОЧНЫХ
УСЛОВИЯХ**

**ON THE ISSUE OF DEVELOPING A RISK
MANAGEMENT STRATEGY FOR THE
PURCHASE OF SPARE PARTS BY
MOTOR TRANSPORT ENTERPRISES
IN MODERN MARKET CONDITIONS**

✉¹ Булатов Сергей Владимирович,
к.т.н., ассистент кафедры технической эксплуата-
ции и ремонта автомобилей, Оренбургский
государственный университет, г. Оренбург,
e-mail: bul.sergey2015@yandex.ru

✉¹ Bulatov Sergey Vladimirovich,
candidate of technical sciences, assistant of the
department of technical operation and repair of
cars, Orenburg state university, Orenburg,
e-mail: bul.sergey2015@yandex.ru

Горбачёв Сергей Викторович,
к.т.н., доцент кафедры технической эксплуата-
ции и ремонта автомобилей, Оренбургский
государственный университет, г. Оренбург.

Gorbachev Sergey Viktorovich,
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of technical operation and repair
of cars, Orenburg state university, Orenburg.

Кеян Ерванд Грантович,
к.т.н., доцент кафедры технической эксплуата-
ции и ремонта автомобилей, Оренбургский
государственный университет, г. Оренбург.

Keyan Ervand Grantovich,
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of technical operation and repair
of cars, Orenburg state university, Orenburg.

Фаскиев Риф Сагитович,
к.т.н., доцент кафедры технической эксплуата-
ции и ремонта автомобилей, Оренбургский
государственный университет, г. Оренбург.

Faskiev Rif Sagitovich,
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of technical operation and repair
of cars, Orenburg state university, Orenburg.

Хасанов Ильгиз Халилович,
к.т.н., доцент кафедры автомобильного
транспорта, Оренбургский государственный
университет, г. Оренбург.

Khasanov Ilgiz Khalilovich,
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of motor transport, Orenburg
state university, Orenburg.

Аннотация. Работа автотранспортных пред-
приятий, в частности материально-техниче-
ского обеспечения зависит от поставщиков. В
настоящее время проблема приобретения за-
пасных частей и материалов связана с рядом
проблем, которые необходимо если не устра-
нить, то минимизировать для эффективной ра-
боты предприятий в целом. Проблемы связаны

Annotation. The high dependence of motor
transport enterprises on suppliers, the need for re-
search and development, the long life cycle of
motor vehicles and their warranty service, the
need for individual work with a large number of
fleets, etc., make the automotive industry suscep-
tible to a significant number of objective and sub-
jective risk factors, therefore, research aimed at

как со сроками поставок запасных частей, их стоимостью, качеством, так и со значительным количеством факторов риска (объективных, субъективных). Поэтому исследования, направленные на разработку стратегии управления рисками при приобретении запасных частей автотранспортными предприятиями являются актуальными в современных рыночных условиях. Приведенные в работе теоретические и экспериментальные исследования будут совершенствоваться с учетом ситуации, как с персоналом, так и на рынке запасных частей, что позволит минимизировать влияние многих факторов на качество выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту, а также на экономическое положение автотранспортных предприятий.

Ключевые слова: УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ, ЗАПАСНЫЕ ЧАСТИ, АВТОТРАНСПОРТНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ, ФУНКЦИЯ ПОЛЕЗНОСТИ, БРАК, ПОСТАВЩИК.

developing a risk management strategy for the purchase of spare parts by motor transport enterprises are relevant in modern market conditions. The theoretical and experimental studies presented in the work will be improved taking into account the situation, both with personnel and in the spare parts market, which will minimize the impact of many factors on the quality of maintenance and repair work, as well as on the economic situation of motor transport enterprises.

Keywords: RISK MANAGEMENT, SPARE PARTS, MOTOR TRANSPORT COMPANY, UTILITY FUNCTION, MARRIAGE, SUPPLIER.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Деятельность предприятий, в том числе автотранспортных, связана с различными видами неопределенностей и рисков. Большинство рисков на автотранспортных предприятиях (АТП) учитываются и подвергаются управлению, но риски, связанные с потерей времени и финансовых ресурсов из-за бракованных запасных частей (ЗЧ), не учитываются вовсе или учитываются, но недостаточно эффективно. Поскольку современный рынок за последние два года значительно изменился (доля бракованных ЗЧ достигает 30 % от общей партии, стоимость на ЗЧ увеличилась вдвое-втрое, большинство поставщиков прекратили деятельность на территории РФ), то задача разработки стратегии управления рисками становится более актуальной.

Достичь необходимого и желаемого эффекта от стратегии управления рисками – большая задача, при решении которой приходится сталкиваться с различными вопросами:

- нехватка финансовых ресурсов;
- несоответствие квалификации (низкой) персонала АТП решаемым задачам;
- разногласия между сотрудничающими сторонами;
- менталитет;
- недоверие к страховым компаниям (особенно после «полученного» опыта в решении спорных ситуаций, связанных с выплатами);
- отсутствие необходимой документации;
- экономически нестабильная обстановка.

Анализ отечественных и зарубежных работ, связанных с организацией управления рисками таких авторов, как Абрамов С.И., Балабанов И.Т., Беляков А.В., Бирман Г., Грачева М.В., Качалов Р. М., Клейнер Г. Б., Лобанов А. А., Рогов М. А., Скамай Л. В., Токаренко Г. С., Хохлов Н.В. и др. показал, что риски, связанные с бракованными запасными частями, не учитываются [1-4, 7-9, 11-14, 17-19].

Работы Волгина В. В., Гнилищковой Е. В., Могилевкина И. М., Урманова И. И. и др. посвящены проблемам, связанным с работой предприятий автомобильного транспорта в целом, т.е. управлением предприятиями и обеспечением необходимыми ресурсами [5, 6, 10, 15, 20].

Долговечность – один из главных показателей качества деталей. Наличие в партии бракованных запасных частей влияет не только на безопасность эксплуатации автотранспортных средств (АТС), но и на технико-эксплуатационные показатели, такие как коэффициент технической готовности парка, время нахождения АТС на линии и время их простоя в ремонте.

Анализ причин отказов на примере тормозной системы на одном из предприятий автомобильного транспорта показал, что фактический ресурс тридцати процентов тормозных колодок ниже заявленного заводом-изготовителем [8].

Анализ вышеуказанных работ показал как достоинства, так и представляющие интерес недостатки известных подходов решения задачи, появление которых связано с течением времени и которые требуют их устранения или модернизации:

- стандартный подход (в настоящее время необходимо, чтобы методы решения проблем были разносторонние и имели способность трансформироваться в течение определенного периода и видоизменяться с учётом влияния внешних факторов);
- мало учитывают особенности предприятий (изменение финансовых и материальных ресурсов, изменение стратегии работы);
- большинство предприятий руководствуются не результатами анализа рисков, а статистикой предыдущих лет, что также говорит о невозможности подстраиваться к внешним факторам и изменениям, происходящими как в структуре предприятия, так и в стране в целом.

Многие методики, которые широко используются на предприятиях топливно-энергетического комплекса, в банках и других финансовых структурах, можно применить к предприятиям автомобильного транспорта с учётом некоторых особенностей. Поэтому необходимость в научных разработках говорит об актуальности решения данной проблемы.

2 Материалы и методы

Как указывалось выше, в исследуемых работах и применяемых на практике методах управления рисками отсутствует учет ущерба, понесенного предприятиями по причине бракованных запасных частей. При работе с поставщиками ЗЧ руководство АТП сталкивается с определенными уровнями риска от минимальных значений до максимальных в зависимости от возможных потерь (временных, финансовых).

Для учета ущерба предприятий при поставке бракованных запасных частей предлагается разработка и использование шкал риска, которые позволят классифицировать возможных поставщиков ЗЧ, что также поможет прогнозировать возможные затраты (доставка, контроль, возврат) на определенный период времени (табл. 1).

Таблица 1 – Шкала риска для АТП при приобретении ЗЧ

№	Уровень риска	Зона риска (коэффициент риска)
1	Минимальный (слабый)	до 0,1
2	Умеренный (средний)	0,1 ... 0,2
3	Критический (высокий)	0,2 ... 0,3
4	Катастрофический (недопустимый)	свыше 0,3

Из табл. 1 следует, что оптимальный коэффициент риска составляет 0,1, а недопустимый на АТП – 0,3 и выше. Принятие решений в зоне умеренного и критического уровней риска зависит от типа ЗЧ и их влияния на безопасность, а также от срочности установки ЗЧ на автотранспортное средство (АТС) при условии, что отказ узлов и агрегатов не приведет к последствиям в виде аварийных ситуаций, гибели и др.

Используя функцию полезности при анализе исследуемых рисков наметим подходы к сопоставлению полезности случайных и детерминированных величин.

Пусть C – затраты на ЗЧ, $X(C)$ – функция затрат на ЗЧ, которая показывает долю затрат на ЗЧ без дефектов из общей партии.

На рис. 1 показана теоретическая функция затрат АТП $X_{АТП}(C)$ в условиях минимальных значений рисков и уменьшающейся отдаче от C .

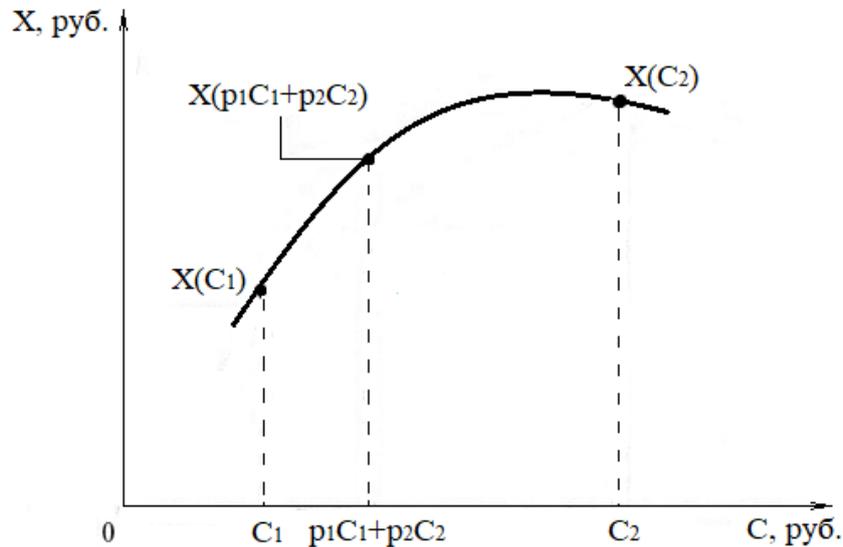


Рисунок 1 – Теоретическая функция затрат АТП

АТП избегает риска, если его функция $X_{АТП}$ отражает предпочтение детерминированной величине полезности по отношению к случайной величине с тем же математическим ожиданием:

$$X_{АТП} \left(\sum_{i=1}^n p_i C^{(i)} \right) > \sum_{i=1}^n p_i X_{АТП} (C^{(i)}), \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^n p_i = 1$; $p_i \geq 0$; $i = 1, \dots, n$; p_i – вероятность присутствия в партии бракованной ЗЧ $C^{(i)}$.

Полезность детерминированной величины определяется равенством:

$$M(X_{АТП}(C)) = \sum_{i=1}^n p_i X_{АТП}(C^{(i)}). \quad (2)$$

Из формулы (1) следует неравенство

$$X_{АТП}(M(C)) > M(X_{АТП}(C)), \quad (3)$$

т.е. детерминированная величина $M(C)$ предпочтительнее случайной величины C . Более того, затраты на контроль ЗЧ определяются разностью:

$$C_K = X_{АТП}(M(C)) - M(X_{АТП}(C)) \quad (4)$$

или

$$C_K = X_{ATT} \left(\sum_{i=1}^n p_i C^{(i)} \right) - \sum_{i=1}^n p_i X_{ATT} (C^{(i)}). \quad (5)$$

Затраты на приобретение ЗЧ и их дальнейший контроль будут значительно меньше ущерба, понесенного АТП по причине установки на АТС бракованных деталей узлов и агрегатов и дальнейших возможных последствий.

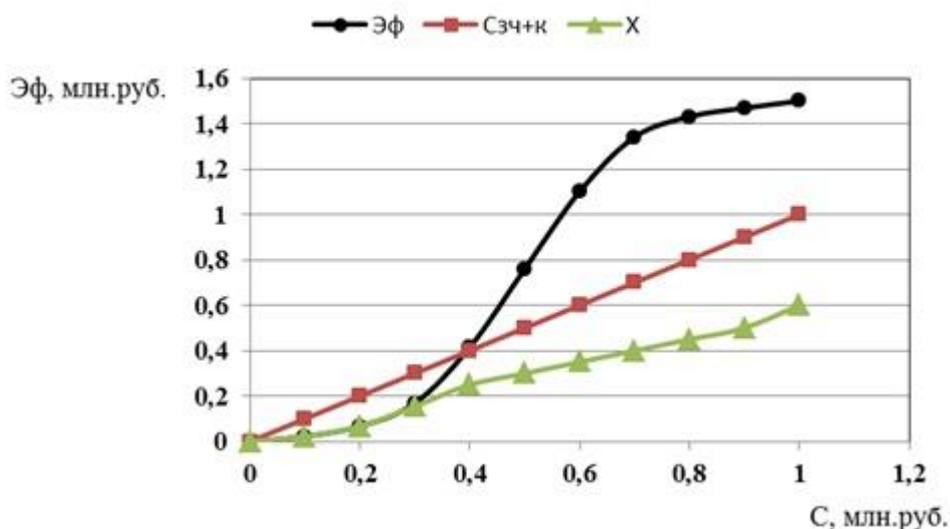
3 Результаты исследований

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на одном из АТП г. Оренбурга с 01.01.2023 г. по 01.12.2023 г., приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований на АТП г. Оренбурга

Затраты на приобретение и контроль ЗЧ, млн. руб.	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Экономический эффект, млн. руб.	0,023	0,067	0,169	0,415	0,760	1,101	1,341	1,431	1,469	1,500

Исследование показало, что после приобретения ЗЧ и дальнейшего их контроля на сумму свыше 0,4 млн. руб., экономический эффект начинает превышать вышеприведенные затраты, поскольку влияние бракованных ЗЧ на ущерб тем больше, чем больше партия приобретенных ЗЧ (рис. 2).



Эф - экономический эффект, млн. руб.;

$S_{зч+к}$ - затраты на приобретение ЗЧ и их контроль качества, млн. руб.;

X - доля затрат на ЗЧ без дефектов из общей партии, млн. руб.

Рисунок 2 – Экспериментальная зависимость, полученная после проведенных исследований на АТП г. Оренбурга

Установлено, что экономический эффект достигается за счет минимизации рисков, связанных с приобретением ЗЧ и их качеством, а также рисков, связанных с возможными последствиями при установке бракованных ЗЧ на АТС, соответственно, организация входного контроля качества ЗЧ в отношении на АТП позволяет повысить безопасность транспортного обслуживания населения при снижении эксплуатационных затрат.

4 Обсуждение и заключение

Анализ современного рынка ЗЧ показывает необходимость усиления внимания к возможным рискам, особенно после начала кризисов в различных сферах, когда объемы годового спроса на ЗЧ АТС растут на 20-30 % при низком уровне их качества. К этому добавляются проблемы на предприятиях в сфере управления. Решение этих проблем требует разработки усовершенствованных или новых методик по управлению рисками на предприятиях автомобильного транспорта с учётом влияния внешних и внутренних факторов и их дальнейших изменений.

Представленное теоретическое и практическое решение актуальной задачи по стратегии управления рисками на автотранспортном предприятии в современных условиях на рынке запасных частей дает возможность использования предлагаемых подходов разработки шкал риска и позволяет прогнозировать возможные затраты АТП за определенный период времени.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований на нескольких предприятиях автомобильного транспорта, что позволит повысить достоверность результатов, их обоснованность, точность и выработать рекомендации по их применению.

Список литературы

- 1 Абрамов, С.И. Оценка риска инвестирования // Экономика строительства. – 1996. – №12. – С. 2-12.
- 2 Балабанов, И. Т. Риск-менеджмент / И.Т. Балабанов. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 192 с.
- 3 Беляков, А.В. Банковские риски: проблемы учета, управления и регулирования. – М.: БДЦ-пресс, 2003. – 256 с.
- 4 Бирман, Г. Капиталовложения: экономический анализ инвестиционных проектов : пер. с англ. / Г. Бирман, С. Шмидт ; под ред. Л. П. Бельх. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 631 с.
- 5 Волгин, В. В. Автобизнес. Техника, сервис, запчасти. – М.: ИД "Маркетинг", 2003. – 848 с.
- 6 Гнилицкая, Е. В. Приоритетные стратегии развития ведущих автомобилестроительных компаний в условиях глобализации мирового хозяйства // Бюл. трансп. информ. – 2001. – № 12. – С. 5-15.
- 7 Грачева, М.В. Риск-менеджмент инвестиционного проекта: Учебник / Под ред. Грачевой М. В. – М.: Юнити, 2018. – 576 с.
- 8 Качалов, Р. М. Управление экономическим риском. Теоретические основы и приложения / Р.М. Качалов // М.: Нестор-История, 2012. – 248 с.
- 9 Клейнер, Г.Б. Производственные функции: Теория, методы, применение / Г.Б. Клейнер // М: СПб. [и др.] : Питер, 2017. – 240 с.
- 10 Могилевкин, И. М. Транспорт и коммуникации: прошлое, настоящее, будущее. – М. – Наука, 2005. – 357 с.
- 11 Лобанов, А.А. Механизмы регулирования банковских рисков в переходной экономике / А.А. Лобанов // М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 284 с.
- 12 Рогов, М.А. Риск – менеджмент / М.А. Рогов // М. : Финансы и статистика, 2001. – 118 с.
- 13 Скамай, Л. Г. Страхование: Учебное пособие / Л.Г. Скамай // М.: ИНФРА-М, 2003. – 160 с.
- 14 Токаренко, Г. С. Технология управления финансовыми рисками // Финансовый менеджмент. – 2006. – № 5. – С. 139-143.
- 15 Урманов, И. И. Международные инвестиционные проекты в отечественном машиностроении // Российский экономический журнал. – 2005. – №8. – С.72-76.

- 16 Фалин, Г. И. Математический анализ рисков в страховании. М.: Рос.юрид. изд. дом, 1994. – 130 с.
- 17 Хохлов, Н. В. Управление рисками: учеб. пособие для вузов / Н.В. Хохлов // Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 1999. – 239 с.
- 18 Шинкаренко, И. Э. Риск-менеджмент. Философия управления рисками в корпорации. Управление рисками. – 2004. – №2. – С. 57-59.
- 19 Белверд, Э. Финансовый учет / Э. Белверд // Юго-Западное гендерное обучение. – 2015. – 705 с.
- 20 Ричард, А. Основы корпоративных финансов / А. Ричард // Университет Феникса. – 2014. – 639 с.

References

- 1 Abramov, S.I. Investment risk assessment // The economics of construction. – 1996. – No. 12. – pp. 2-12.
- 2 Balabanov, I. T. Rice management / I.T. Balabanov. - M.: Finance and Statistics, 1996. – 192 p.
- 3 Belyakov A.V. Banking risks: problems of accounting, management and regulation. – M.: BDC-press, 2003. – 256 p.
- 4 Burman, G. Investments: economic analysis of investment projects: translated from English / G. Burman, S. Schmidt; edited by L. P. Belykh. — M.: UNITY- DANA, 2003. - 631 p.
- 5 Volgin V.V. Avtobusiness. Equipment, service, spare parts.-M.: Publishing house "Marketing", 2003. -848s.
- 6 Gnilitkaya E. B. Priority strategies for the development of leading automotive companies in the context of globalization of the world economy // Byul. transp. inform. 2001. - No. 12. pp. 5-15.
- 7 Gracheva M.V. Risk management of an investment project: Textbook / Ed. Gracheva M.V. - M.: Finance, 2018. - 576 p.
- 8 Kachalov, R. M. Economic risk management. Theoretical foundations and applications / R.M. Kachalov. - M.: Nestor-Istoriya, 2012. - 248 p.
- 9 Kleiner, G.B. Production functions: Theory, methods, application / G.B. Kleiner. - M.: St. Petersburg. [et al.] : St. Petersburg, 2017. - 240 p.
- 10 Mogilevkin I.M. Transport and communications: past, present, future.-M.-Nauka, 2005, 357 p.
- 11 Lobanov, A.A. Mechanisms of regulation of banking risks in the modern economy: monograph / Alexey Lobanov. - M.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. - 284 p.
- 12 Rogov, M.A. Risk management / M.A. Rogov. – M. : Finance and Statistics, 2001. – 118 p.
- 13 Skamai, L.G. Insurance: A textbook/ L.G. Skamai. – M.: INFRA-M, 2003. – 160 p.
- 14 Tokarenko G.S. Technology of financial risk management //Financial management. 2006. - No. 5. - pp. 139-143.
- 15 Urmanov, I.I. International investment projects in domestic engineering // Russian Economic Journal. -2005. -8. pp.72-76.
- 16 Falin G. I. Mathematical analysis of risks in insurance. Moscow: Russian Legal Publishing House, 1994. - 130 p.
- 17 Khokhlov, N. V. Risk management : textbook. handbook for universities / N.V. Khokhlov. - Moscow : UNITY-DANA, 1999. - 239.
- 18 Shinkarenko I.E., Khramov V.N. Risk management. The philosophy of risk management in a corporation. Risk management.2004."2, p. 57.
- 19 Financial accounting. Belverd E. Needles, Marian Powers. Southwestern gender education. 2015. – 705 p.
- 20 Fundamentals of corporate finance. Richard A. Briley, Stuart K. Myers, Alan J. Marcus. University of Phoenix. 2014. – 639 p.

DOI: [10.34220/2311-8873-2024-77-88](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2024-77-88)



УДК 656.09

UDC 656.09

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ
ИССЛЕДОВАНИЯ НАЕЗДА
НА ПЕШЕХОДА ИЛИ ДИКОЕ
ЖИВОТНОЕ, ВЫШЕДШЕГО ПОД
ПРОИЗВОЛЬНЫМ УГЛОМ ИЗ-ЗА
ДВИЖУЩЕГОСЯ ВСТРЕЧНОГО
ПРЕПЯТСТВИЯ**

**ANALYSIS OF RESEARCH OPTIONS FOR
A COLLISION WITH A PEDESTRIAN
OR WILD ANIMAL ENTERED AT AN
ARBITRARY ANGLE DUE TO A MOVING
ONWARD OBSTACLE**

✉¹ **Зеликов Владимир Анатольевич**,
д.т.н., доцент, заведующий кафедрой органи-
зации перевозок и безопасности движения,
Воронежский государственный лесотехниче-
ский университет имени Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru

✉¹ **Zelikov Vladimir Anatolyevich**,
doctor of technical sciences, associate professor,
head of the department of transportation organiza-
tion and traffic safety, Voronezh state forestry uni-
versity named after G.F. Morozov, Voronezh,
mail: zelikov-vrn@mail.ru

Денисов Геннадий Александрович,
к.т.н., доцент, доцент кафедры организации
перевозок и безопасности движения,
Воронежский государственный лесотехни-
ческий университет имени Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж.

Denisov Gennady Alexandrovich,
candidate of technical sciences, associate profes-
sor, associate professor of the department of trans-
portation organization and traffic safety, Voronezh
state forestry university named after G.F. Morozov,
Voronezh.

Феофилова Анастасия Александровна,
к.т.н., доцент кафедры организации перево-
зок и дорожного движения, Донской госу-
дарственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону.

Feofilova Anastasia Alexandrovna,
candidate of technical sciences, associate professor,
department of transportation and traffic management,
Don state technical university, Rostov-On-Don.

Струков Юрий Вячеславович,
к.т.н., доцент, доцент кафедры организации
перевозок и безопасности движения,
Воронежский государственный лесотехни-
ческий университет имени Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж.

Strukov Yuri Vyacheslavovich,
candidate of technical sciences, associate profes-
sor, associate professor of the department of trans-
portation organization and traffic safety, Voronezh
state forestry university named after G.F. Morozov,
Voronezh.

Стородубцева Тамара Никаноровна,
д.т.н., профессор кафедры промышленного
транспорта, строительства и геодезии, Воро-
нежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Storodubtseva Tamara Nikanorovna,
doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of industrial transport, construction and
geodesy, Voronezh state forestry university named
after G.F. Morozov, Voronezh.

Струкова Ирина Юрьевна,

студент автомобильного факультета, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Strukova Irina Yurievna,

student of the automotive faculty, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. Рассматриваются схемы наезда на участника движения. Представлены схемы с выходом участника движения из-за движущегося встречного препятствия под углом попутно и навстречу транспортному средству. Приведены схемы наезда на участника движения транспортным средством в случае бокового удара и торцевого наезда. Для всех случаев представлена методика определения остановочного пути автомобиля.

Annotation. Schemes of collision with a traffic participant are considered. Schemes are presented with a traffic participant exiting from a moving oncoming obstacle at an angle in the same direction and towards the vehicle. Diagrams of a collision with a traffic participant by a vehicle in the event of a side impact and a frontal collision are given. For all cases, a method for determining the stopping distance of a car is presented.

Ключевые слова: СХЕМА НАЕЗДА, УЧАСТНИК ДВИЖЕНИЯ, ДВИЖУЩЕЕСЯ ВСТРЕЧНОЕ ПРЕПЯТСТВИЕ, РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ, БОКОВОЙ УДАР, ТОРЦЕВОЙ НАЕЗД, УДАЛЕНИЕ АВТОМОБИЛЯ, ОСТАНОВОЧНЫЙ ПУТЬ.

Keywords: COLLISION PATTERN, TRAFFIC PARTICIPANT, MOVING COUNTER OBSTACLE, UNIFORM MOTION, SIDE IMPACT, END COLLISION, CAR REMOVAL, STOPING PATH.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Транспортные компании активно участвуют в перевозке пассажиров и грузов по территории России и стран СНГ. В настоящее время рынок перевозочных услуг обеспечивается собственным и наемным качественным автотранспортом высокого европейского уровня, управляемым профессиональными водителями. Автомобильные перевозки сопровождаются дополнительными услугами по экспедированию, страхованию и сопровождению грузов. Одним из основных показателей качества транспортного процесса является обеспечение безопасности движения, т.е. бесперебойного функционирования системы «водитель – автомобиль – дорога – среда движения» (ВАДС), при этом надежность водителя оценивается его безаварийной работой [1]. Нарушение бесперебойного функционирования системы ВАДС может быть вызвано дорожно-транспортным происшествием (ДТП), повлекшим ранение или смерть участников движения (водителя, пассажира, пешехода или животного), а также повреждением автомобиля, элементов дороги или нарушением экологического состояния окружающей среды.

ДТП подлежат расследованию, а в некоторых случаях и экспертизе происшествия. Одним из наиболее опасных видов ДТП продолжает оставаться наезд автомобиля на пешехода или дикое животное, поскольку пешеход или животное, как наименее защищенные участники движения, получают тяжкие повреждения или погибают на месте ДТП. По большей части наездов следователем или судом назначается экспертиза ДТП, особенно, когда наезд совершен на ребенка или участник наезда погиб в результате происшествия. В этой связи тема работы является весьма актуальной.

Важная роль в разработке и развитии методов экспертизы ДТП принадлежит исследователям и ученым из институтов и лабораторий Министерства юстиции (МЮ) СССР, высших учебных заведений СССР, Всесоюзного научно-исследовательского института судебных экспертиз

(ВНИИСЭ), Московского государственного технического университета (МАДИ) и др. В настоящее время методы экспертизы ДТП совершенствуются в институтах и лабораториях (МЮ) РФ и Министерства внутренних дел (МВД) РФ, высших учебных заведениях РФ. Эти методы должны быть доступны и простым автомобилистам, и специалистам, профессионально занимающимся вопросами расследования и экспертизы ДТП, безопасности дорожного движения [2].

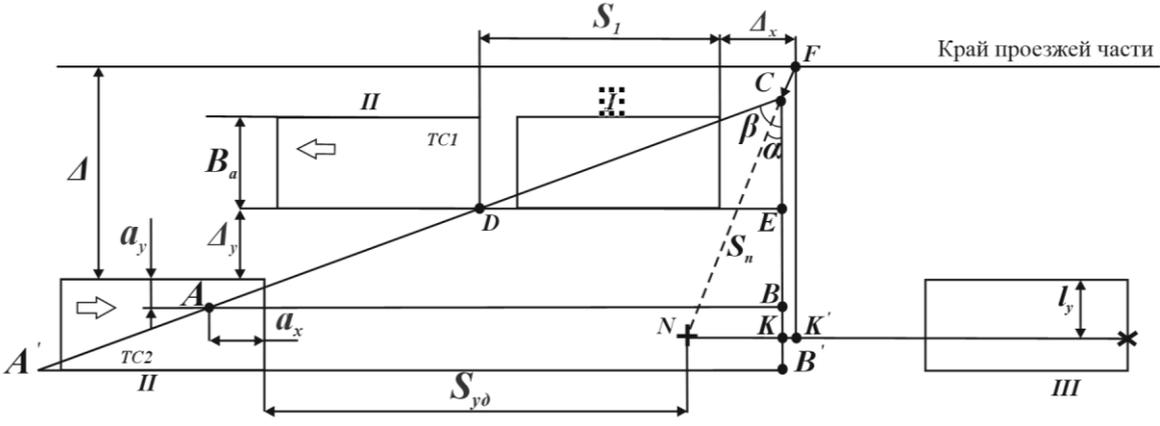
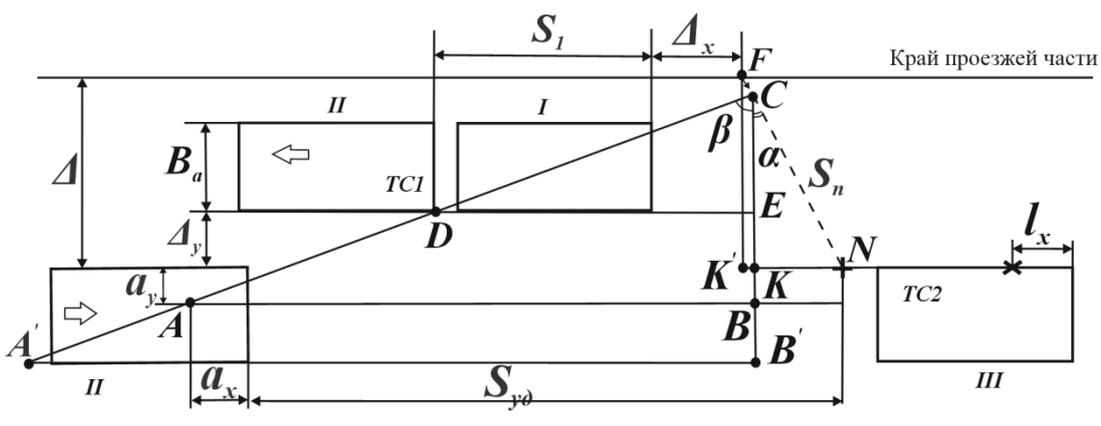
2 Материалы и методы

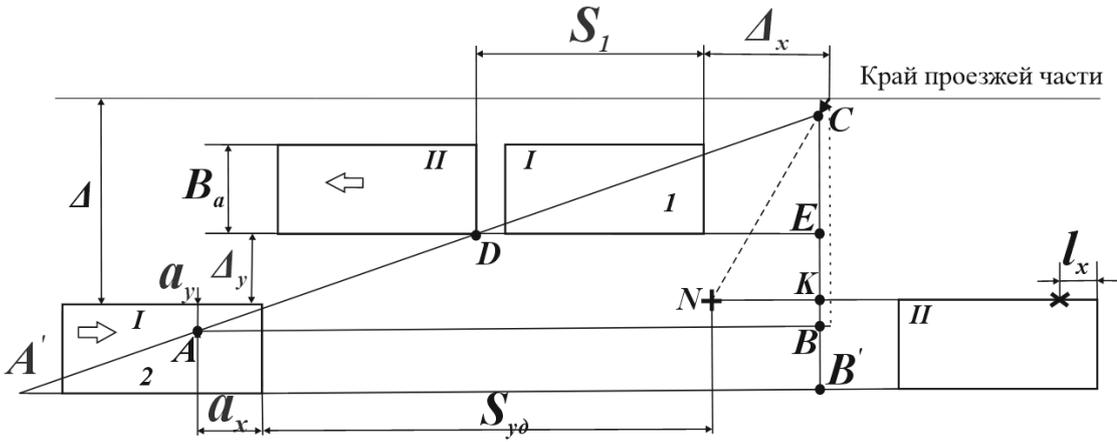
При написании статьи анализировали материалы методических руководств с рекомендованными методиками исследования ДТП для экспертов-автотехников, литературу по исследованию ДТП, имеющуюся в свободном пользовании, статьи в научных журналах, отчеты годовой аварийности, представленные Росстатом и МВД РФ, личные научные разработки по исследованию ДТП, ГОСТы, СНИПы, требования нормативных документов и ПДД РФ. Использовали данные визуальных наблюдений за участниками движения, заключения по ДТП, методики исследования наезда на пешехода, возникшего при осуществлении транспортного процесса.

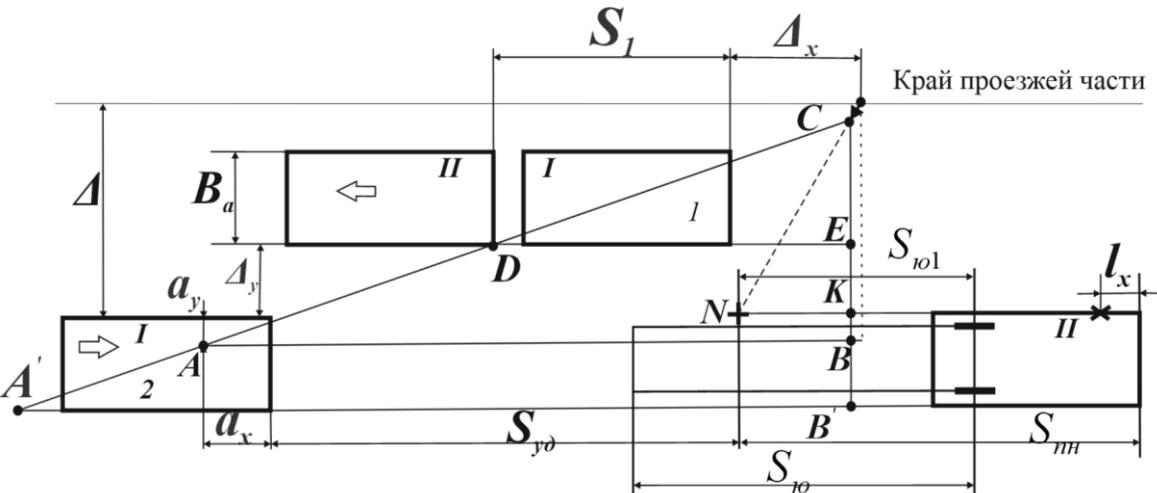
3 Результаты исследований

Рассматривая классификацию наездов транспортного средства (ТС) на пешехода или дикое животное (далее участника движения), отметили, что только в редких случаях можно предотвратить наезд на участника движения, появившегося перед водителем ТС из-за движущегося встречного препятствия слева. Участник движения, перебегая линию следования ТС-препятствия, внезапно появляется на полосе движения ТС, оставляя водителю движущегося перед ним по полосе автомобиля секунды на принятие решения об остановке своего ТС для предотвращения наезда [3-8]. Особенно опасен для участника движения такой маневр вне пределов населенного пункта и вне зоны разметки 1.14.1, 1.14.2, или действия знаков 5.19.1-5.19.2 – "Пешеходный переход" (ПДД 2022 России. Режим доступа: <https://www.pdd24.com/?ysclid=lbqhdpr7tcy972161927>). Тем более, что и пешеход и, особенно, дикое животное могут бежать от края проезжей части под углом в любом направлении к ТС. При проведении экспертизы по таким наездам у экспертов возникают трудности в определении места расположения участников в момент возникновения опасности для движения, вычерчивании дополнительных построений, а также нахождении удаления ТС от места наезда [9-12].

Для повышения производительности и качества работы автотехнического (судебного) и служебного (назначенного руководителем автотранспортного предприятия) экспертов, а также для эффективности работы экспертного учреждения в целом, мы систематизировали все возможные варианты таких наездов [6] и свели их в таблицу (табл. 1). Геометрическое условие положения участников наезда, записали из подобных треугольников $A'B'C$ и DEC , тангенс угла β выразили из треугольника $A'B'C$. Совместное решение геометрического и кинематического условий позволит рассчитать удаление автомобиля от места наезда. Для принятия решения о возможности предотвращения наезда водителем, необходимо рассчитать остановочный путь автомобиля S_0 и сравнить его с удалением от места наезда S_{y0} . Удаление автомобиля от места наезда находится путем совместного решения уравнений (1)-(3), представленных в табл. 1, остановочный путь автомобиля рассчитывается по формуле (4) или (5) в зависимости от условий движения ТС перед наездом.

№ п/п	Схема наезда и формулы расчета
2	<p>Схема наезда на участника движения, вышедшего из-за движущегося встречного препятствия под углом навстречу ТС. Равномерное движение ТС. Торцевой наезд.</p> <p style="text-align: center;">$K_1 = +1, K_2 = -1.$</p>  <p style="text-align: center;">$\frac{A'B'}{B'C} = \frac{DE}{EC}.$</p> <p>Для исследования использовать формулы (1), (2), (3), (4).</p>
3	<p>Схема наезда на участника движения, вышедшего из-за движущегося встречного препятствия под углом попутно ТС. Равномерное движение ТС. Боковой удар.</p> <p style="text-align: center;">$K_1 = -1, K_2 = +1.$</p>  <p style="text-align: center;">$\frac{A'B'}{B'C} = \frac{DE}{EC}.$</p>

№ п/п	Схема наезда и формулы расчета
3	<p>Использовать формулы</p> $\frac{S_{y\partial} + a_x + (B_{a2} - a_y) \cdot \operatorname{tg} \beta \pm K_1 \cdot S_n \sin \alpha}{S_n \cos \alpha + B_{a2}} = \frac{S_1 + \Delta_x \pm K_2 (\Delta \operatorname{tg} \alpha - S_n \sin \alpha)}{S_n \cos \alpha - \Delta_y} \quad (5)$ $\operatorname{tg} \beta = \frac{S_{y\partial} + a_x + (B_{a2} - a_y) \cdot \operatorname{tg} \beta \pm K_1 \cdot S_n \sin \alpha}{S_n \cos \alpha + B_{a2}} \quad (6)$ <p>Далее</p> $S_n = \frac{S_{y\partial} \cdot V_n}{V_a} + l_x \quad (7)$ <p>Далее (4).</p>
4	<p>Схема наезда на участника движения, вышедшего из-за движущегося встречного препятствия под углом навстречу ТС. Равномерное движение ТС. Боковой удар.</p> <p style="text-align: center;">$K_1 = +1, K_2 = -1.$</p>  $\frac{A'B'}{B'C} = \frac{DE}{EC}.$ <p>Для исследования использовать формулы (5), (6), (7), (4).</p>

№ п/п	Схема наезда и формулы расчета
7	<p style="text-align: center;">$\frac{A'B'}{B'C} = \frac{DE}{EC}$</p> <p>Использовать формулы (5), (6). Далее</p> $S_n = \frac{V_n}{V_a} \cdot \left[S_{y\partial} + \frac{(V_a - V_n)^2}{2j} + l_x \right]. \quad (12)$ <p>Далее использовать формулы (9), (10), (11).</p>
8	<p style="text-align: center;">Схема наезда на участника движения, вышедшего из-за движущегося встречного препятствия под углом навстречу ТС. Равномерное движение ТС. Боковой удар.</p> <p style="text-align: center;">$K_1 = +1, K_2 = -1.$</p>  <p style="text-align: center;">$\frac{A'B'}{B'C} = \frac{DE}{EC}$</p> <p>Использовать формулы (5), (6), (12), (9), (10), (11).</p>
<p>Обозначения: K_1, K_2 – коэффициенты, учитывающие направление движения участника ДТП (под углом навстречу или попутно ТС-препятствия); $S_{y\partial}$ – удаление ТС от места наезда в момент возникновения опасности для движения, м; a_x – расстояние от места водителя до передней части ТС, м; a_y – расстояние от места водителя до левой боковой части ТС, м;</p>	

<p> B_a, B_{np} – соответственно габаритная ширина ТС и ТС-препятствия, м; α – угол направления движения участника ДТП, град; β – угол одной из вершин дополнительно построенного треугольника обзорности, град; S_n – путь, пройденный участником ДТП с момента опасности для движения до наезда, м; l_x – расстояние от передней части ТС до места наезда на боковой его части, м; l_y – расстояние от левой боковой части ТС до места наезда на передней его части, м; S_1 – расстояние, на которое переместилось ТС1-препятствие с момента выхода участника ДТП на проезжую часть до момента опасности для движения, м; Δ_x – расстояние, на котором находилось ТС1-препятствие от участника ДТП в момент появления его на проезжей части в зоне видимости водителя, м; Δ_y – расстояние между ТС2, совершившим наезд и ТС1-препятствием, м; V_a, V_n – соответственно скорости движения до наезда ТС2 совершившего наезд и участника движения, м/с; V_n – скорость ТС2 в момент наезда на участника движения, м/с; t_1, t_2, t_3 – соответственно время реакции водителя, запаздывания тормозного привода и нарастания замедления ТС, с; j – установившееся замедление ТС, м/с²; $S_{ю}$ – общая длина следа юза ТС2 на поверхности проезжей части, м. $S_{ю1}$ – длина следа юза ТС2 после наезда, м; S_{nn} – расстояние от места наезда на проезжей части до передней части ТС2, м. </p>

4 Обсуждение и заключение

Все схемы вычерчены в соответствии с известной классификацией наезда автомобиля на пешехода [13]. В основу методик исследования дорожного происшествия положены разработанные ранее способы получения геометрических условий положения и кинематических условий движения автомобиля и пешехода [13-15].

По представленным в статье рисункам судебный эксперт может выбрать вариант исследования наезда на участника движения, который соответствует его схеме и исходным данным, представленным ему на рассмотрение следователем или судом. Служебный же эксперт выберет вариант исследования в соответствии с вычерченной им самой схемой наезда при выезде его на место ДТП и зафиксированными им исходными данными.

Обобщенные варианты исследования наезда на участника движения сократят время, предупредят возможные ошибки в расчетах, повысят качество проведенных экспертиз [16]. Полученные результаты статьи могут быть использованы при написании программы для ЭВМ, что еще более ускорит время проведения экспертизы наезда.

Работу экспертов и экспертного учреждения при исследовании наезда можно будет классифицировать как бережливое управление процессом проведения экспертизы ДТП.

Список литературы

- 1 Дятлов, М. Н. Профессиональная надежность водителя автомобильного транспорта / М. Н. Дятлов, К. О. Долгов, А. Н. Тодоров // Молодой ученый. – 2013. – № 10 (57). – С. 134-138. – URL: <https://moluch.ru/archive/57/7867/> (дата обращения: 30.11.2022).
- 2 Тишаков, М. П. Информационные технологии в сфере обеспечения безопасности дорожного движения / М.П. Тишаков // В сборнике: Правопонимание в цифровую эпоху: искусственный интеллект в реализации права и правоприменительной деятельности. Сборник статей по итогам Всероссийского круглого стола. Южный федеральный университет, Юридический факультет. – Москва, 2019. – С. 157-165.
- 3 Анапольская А. И., Гололобова О.С. Первоначальный этап расследования дорожно-транспортных преступлений / А.И. Анапольская, О.С. Гололобова // В сборнике: Управление и общество: трансформация институциональной архитектуры социально - экономической системы. Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 97-102.
- 4 Антонова, Л. Б. Современные проблемы административно-правового регулирования деятельности Государственной инспекции безопасности дорожного движения / Л. Б. Антонова // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. – 2018. – № 4-3 (4). – EDN: VQNKTM.
- 5 Сараев, А. В. Общие вопросы экспертизы дорожно-транспортных происшествий: монография / А.В. Сараев, Е.А. Новописный, С.В. Дорохин, И.А. Новиков // Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. – 102 с. – ISBN 978-5-361-00315-0.
- 6 Систематизация вариантов и совершенствование методики исследования наезда автомобиля на пешехода, вышедшего из-за встречного препятствия / Г. А. Денисов, В. А. Зеликов, Н. И. Злобина // Мир транспорта и технологических машин. – 2017. – № 3 (58). – С. 115-122.
- 7 Экспертное исследование обзорности с места водителя транспортных средствах категории М1 /В. Ф. Гольчевский // Сибирские уголовно-процессуальные и криминалистические чтения. 2021. – № 4 (34). – С. 104-115.
- 8 Суворов, Ю. Б. Судебная дорожно-транспортная экспертиза. Судебно-экспертная оценка действий водителей и других лиц, ответственных за обеспечение безопасности дорожного движения, на участках ДТП: Учеб. Пособие для вузов / Ю. Б. Суворов // М.: Издательство «Экзамен», издательство «Право и закон», 2004. – 208 с. – ISBN: 5-94692-404-4, 5-7858-0117-5.
- 9 Spatiotemporal analysis of road crashes with animals in Poland. Krukowicz T., Firlag K., Chrobot P. Sustainability. 2022. Т. 14. № 3.
- 10 Drapalyuk, M. Research of Automobile and Emergency Road Situations / M. Drapalyuk, V. Zelikov, G. Denisov, N. Zlobina, V. Kliavin, N. Zelikova // 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA2020). – 2020. – С. 777-781.
- 11 Расследование и анализ аварийных ситуаций на автомобильных дорогах постоянного действия / М. В. Драпалюк, В. А. Зеликов, Г. А. Денисов, Н. И. Злобина, Н.В. Зеликова // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 2 (42). – С. 108-120.
- 12 Денисов Г. А., Мамаев А. В. Совершенствование методики нахождения удаления автомобиля от места наезда на пешехода, вышедшего из-за неподвижного препятствия / Г.А. Денисов, А. В. Мамаев // Бюллетень транспортной информации. – 2011. – № 6 (192). – С. 27-29.
- 13 Иларионов, В. А. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий / В. А. Иларионов // М.: Транспорт, 1989. – 255 с.
- 14 Домке, Э. Р. Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий / Э.Р. Домке // М.: Издат. центр «Академия», 2009. – 288 с.
- 15 Евтюков, С. А. Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий / С. А. Евтюков, Я. В. Васильев // СПб.: ДНК, 2004. – 280 с. – ISBN 5-901562-47-Х.
- 16 Значение автотехнической экспертизы при проведении административного расследования ДТП /Т.А. Схаплок // Вестник науки. – 2022. – Т. 5. – № 5 (50). – С. 182-187.

References

- 1 Dyatlov M.N. Professional reliability of a motor vehicle driver / M. N. Dyatlov, K. O. Dolgov, A. N. Todorev // *Young scientist*. – 2013. – No. 10 (57). – pp. 134-138. – URL: <https://moluch.ru/archive/57/7867/> (access date: 11/30/2022).
- 2 Tishakov M.P. Information technologies in the field of ensuring road safety / M.P. Tishakov // In the collection: *Legal understanding in the digital era: artificial intelligence in the implementation of law and law enforcement activities*. Collection of articles based on the results of the All-Russian round table. Southern Federal University, Faculty of Law. Moscow, 2019. pp. 157-165
- 3 Anapolskaya A.I., Gololobova O.S. The initial stage of the investigation of road traffic crimes / A.I. Anapolskaya, O.S. Gololobova // In the collection: *Management and society: transformation of the institutional architecture of the socio-economic system*. Materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference. 2018. pp. 97-102.
- 4 Antonova L.B. Modern problems of administrative and legal regulation of the activities of the State Road Traffic Safety Inspectorate / L.B. Antonov // *Public safety, legality and order in the 3rd millennium*. 2018. No. 4-3 (4). EDN: VQNKTM.
- 5 Saraev A.V. General issues of examination of road traffic accidents: monograph / A.V. Saraev, E.A. Novopisny, S.V. Dorokhin, I.A. Novikov // Belgorod: BSTU Publishing House, 2015. – 102 p. – ISBN 978-5-361-00315-0.
- 6 Systematization of options and improvement of methods for studying the collision of a car with a pedestrian who left because of an oncoming obstacle / G.A. Denisov, V.A. Zelikov, N.I. Zlobina // *World of transport and technological machines*. 2017. No. 3 (58). pp. 115-122.
- 7 Expert study of visibility from the driver's seat in vehicles of category M1 / V.F. Golchevsky // *Siberian criminal procedural and forensic readings*. 2021. No. 4 (34). pp. 104-115.
- 8 Suvorov Yu.B. Forensic road transport examination. Forensic expert assessment of the actions of drivers and other persons responsible for ensuring road safety at accident sites: Textbook. Manual for universities / Yu.B. Suvorov // M.: Publishing house "Exam", publishing house "Pravo and Zakon", 2004. – 208 p. – ISBN: 5-94692-404-4, 5-7858-0117-5
- 9 Spatiotemporal analysis of road crashes with animals in Poland. Krukowicz T., Firlag K., Chrobot P. *Sustainability*. 2022. T. 14. No. 3.
- 10 Drapalyuk, M. Research of Automobile and Emergency Road Situations / M. Drapalyuk, V. Zelikov, G. Denisov, N. Zlobina, V. Kliavin, N. Zelikova // *2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA2020)*. – 2020. – pp. 777-781.
- 11 Investigation and analysis of emergency situations on permanent roads / M.V. Drapalyuk, V.A. Zelikov, G.A. Denisov, N.I. Zlobina, N.V. Zelikova // *Forestry Journal*. 2021. T. 11. No. 2 (42). pp. 108-120.
- 12 Denisov G.A., Mamaev A.V. Improving the methodology for finding the distance of a car from the site of a collision with a pedestrian who left due to a stationary obstacle / G.A. Denisov, A.V. Mamaev // *Transport Information Bulletin*. - 2011. - No. 6 (192). - pp. 27-29.
- 13 Ilarionov V.A. Examination of road traffic accidents / V.A. Ilarionov // M.: Transport, 1989. 255 p.
- 14 Domke E.R. Investigation and examination of road traffic accidents / E.R. Domke // M.: Publishing house. Center "Academy", 2009. 288 p.
- 15 Evtyukov S.A. Investigation and examination of road traffic accidents / S. A. Evtyukov, Ya. V. Vasiliev // St. Petersburg: DNA, 2004. – 280 p. – ISBN 5-901562-47-X.
- 16 The importance of automotive technical expertise when conducting an administrative investigation of an accident / T.A. Shaplok // *Bulletin of Science*. 2022. T. 5. No. 5 (50). pp. 182-187.

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-89-102



УДК 629.3.083:[629.4.023.14+629.341]

UDC 629.3.083:[629.4.023.14+629.341]

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ХРАНЕНИЯ АВТОБУСОВ В КРЫТЫХ ОТАПЛИВАЕМЫХ СТОЯНКАХ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ КОРРОЗИОННОГО ИЗНАШИВАНИЯ КУЗОВОВ

IMPACT OF BUS STORAGE CONDITIONS IN COVERED HEATED PARKING LOTS ON BODY CORROSION

✉¹ **Дрючин Дмитрий Алексеевич**, к.т.н, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации и ремонта автомобилей, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, e-mail: dmi-dryuchin@yandex.ru

✉¹ **Dryuchin Dmitry Alekseyevich**, candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of technical operation and repair of cars, Orenburg state university, Orenburg, e-mail: dmi-dryuchin@yandex.ru

Горбачёв Сергей Викторович, к.т.н, доцент кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург.

Gorbachev Sergey Viktorovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of technical operation and repair of cars, Orenburg state university, Orenburg.

Мельников Алексей Николаевич, к.т.н, доцент кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург.

Melnikov Aleksey Nikolayevich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of technical operation and repair of cars, Orenburg state university, Orenburg.

Фаскиев Риф Сагитович, к.т.н, доцент кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург.

Faskiev Rif Sagitovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of technical operation and repair of cars, Orenburg state university, Orenburg.

Аннотация. Эффективность работы подвижного состава автомобильного транспорта определяется как эффективностью организации транспортной работы, так и затратами на обеспечение работоспособности транспортных средств. Одной из актуальных проблем эксплуатации автобусов является коррозионное разрушение их несущей конструкции. Это приводит как к сокращению времени работы транспортных средств, так и к увеличению затрат на эксплуатацию, связанных с капитальным ремонтом кузовов. В процессе работы было выявлено, что

Annotation. The efficiency of the rolling stock of road transport is determined by both the efficiency of organizing transport work and the cost of ensuring the operability of vehicles. One of the current problems with the operation of buses is the corrosive destruction of their bearing structure, which leads to both a reduction in the operating time of vehicles and an increase in the operating costs associated with the overhaul of bodies. During the work, it was revealed that the main reasons for the intensive corrosion destruction of bus bodies are insufficient corrosion resistance of metals that are

основными причинами интенсивного коррозионного разрушения кузовов автобусов являются недостаточно высокая антикоррозионная стойкость металлов, которые используются при изготовлении каркаса кузова. Основными местами возникновения очагов коррозии кузова являются: колесные арки; задняя и нижняя части автобуса, в большей степени подверженные влиянию неблагоприятных дорожных условий; верхние и нижние части оконных проёмов при нарушении герметичности уплотнения. Были проведены исследования температуры и относительной влажности воздуха в помещении крытой отапливаемой стоянки автобусов в зимнее время. По результатам исследования получены зависимости: температуры воздуха в помещении крытой стоянки от температуры окружающей среды, относительной влажности воздуха в помещении крытой стоянки от относительной влажности воздуха окружающей среды, относительной влажности воздуха в помещении крытой стоянки и температуры окружающей среды. Установлен характер воздухообмена между помещением стоянки и окружающей средой. По результатам исследования установлены факторы, способствующие интенсивному коррозионному разрушению кузовов автобусов.

Ключевые слова: КОРРОЗИЯ, КУЗОВ АВТОБУСА, ПРИЧИНЫ КОРРОЗИИ, ЗАЩИТА КУЗОВА АВТОБУСА, ПРОЦЕССЫ КОРРОЗИИ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ КУЗОВА АВТОБУСА, РЕМОНТ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОРРОЗИЙНЫХ ДЕФЕКТОВ КУЗОВОВ АВТОБУСОВ, ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УЩЕРБ ОТ КОРРОЗИИ КУЗОВОВ.

used in the manufacture of the body frame. The main places of occurrence of body corrosion foci are: wheel arches; rear and lower parts of the bus, which are more affected by adverse road conditions; upper and lower parts of window openings in case of seal leakage. Studies were conducted on the temperature and relative humidity of the indoor heated bus parking area in winter. Based on the results of the study, dependencies were obtained: air temperature in the indoor parking room from ambient temperature, relative air humidity in the indoor parking room from relative ambient air humidity, relative air humidity in the indoor parking room and ambient temperature. The nature of air exchange between the parking room and the environment has been established. According to the results of the study, factors contributing to the intensive corrosive destruction of bus bodies were established.

Keywords: CORROSION, BUS BODY, CAUSES OF CORROSION, PROTECTION OF THE BUS BODY, CORROSION PROCESSES AND THEIR CONSEQUENCES FOR THE BUS BODY, REPAIR AND RESTORATION OF CORROSIVE BUS BODIES, ECONOMIC DAMAGE FROM CORROSION OF BODIES.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Эксплуатация подвижного состава автомобильного транспорта связана с изменением технического состояния транспортных средств, которое отражается на технико-экономических показателях деятельности предприятий. Несущие конструкции автобусов помимо эксплуатационных нагрузок подвержены влиянию факторов окружающей среды, которые проявляются в виде коррозионных повреждений. Наличие таких повреждений часто становится причиной достижения кузовами автобусов предельного состояния, что приводит либо к списанию автобуса, либо к необходимости проведения капитального ремонта.

Исследование проводилось на базе АО «Автоколонна №1825» города Оренбурга. Парк предприятия насчитывает 220 автобусов марок ПАЗ, ГАЗ, НЕФАЗ, КАВЗ. При проведении анализа работоспособности автобусов предприятия было установлено, что основной причиной выхода из строя кузовов является сквозная коррозия несущих элементов конструкции.

На рис. 1 представлен внешний вид коррозионных повреждений.



Рисунок 1 – Внешний вид коррозионных повреждений кузовов автобусов

В результате проведенного исследования установлено:

– основными причинами интенсивного коррозионного разрушения кузовов автобусов является недостаточно высокая антикоррозионная стойкость металлов, которые используются при изготовлении каркаса кузова, а также недостаточно эффективные дополнительные мероприятия по их антикоррозионной защите при производстве автобусов:

– коррозия возникает в зазорах и узких щелях кузовов автобусов, образующихся в соединениях деталей, заполняемых влагой. В узких щелях при попадании влаги возникают гальванические элементы, работающие за счет неравномерного доступа кислорода к различным участкам поверхности металла. В процессе эксплуатации автобусов количество щелей и зазоров резко возрастает в результате деформации кузова, неудовлетворительной сборки и старения прокладочных материалов. Коррозия в узких щелях протекает более интенсивно по сравнению с коррозией на открытых поверхностях вследствие большего времени действия на металл агрессивной среды;

– основными местами возникновения очагов коррозии кузова являются: колесные арки; задняя и нижняя части автобуса, в большей степени подверженные влиянию неблагоприятных дорожных условий; верхние и нижние части оконных проёмов при нарушении герметичности уплотнения.

В связи с выявленными проблемами сформулирована цель исследования – установление причин коррозионного разрушения кузовов автобусов предприятия. Предмет исследования – влияние условий хранения подвижного состава на интенсивность коррозионных повреждений автобусных кузовов.

Для достижения поставленной цели необходимо решение ряда задач:

- провести литературный обзор в области, определяемой тематикой исследования;
- исследовать условия эксплуатации, способствующие интенсивному образованию коррозии;
- разработать практические рекомендации по вопросам технической эксплуатации автобусов.

Вопросам исследования коррозионной стойкости кузовов автобусов посвящен ряд исследований. В работах [1-4] рассмотрены вопросы обеспечения надежности кузовов автобусов на этапах проектирования и производства. В трудах [4-18] представлены результаты исследований процессов коррозии автомобильных кузовов. В данных исследованиях установлены факторы, влияющие на процессы образования коррозии при эксплуатации автомобилей, дана характеристика методам защиты от коррозии на различных этапах жизненного цикла автотранспортных средств.

Труды [19-28] рассматривают влияние уровня организации технической эксплуатации автомобиля, в частности организации хранения автомобилей, на показатели надежности кузовов автобусов.

Содержание результатов представленных исследований позволило сформулировать требования к системе обеспечения ресурса кузовов автобусов, учитывающей влияние конструктивных, производственных и эксплуатационных факторов. Решение поставленной задачи основано на применении уже известных подходов к обеспечению надежности кузовов автобусов, а также на основе установления дополнительных параметров, оказывающих существенное влияние на технико-экономические показатели эксплуатации автобусов.

Анализ содержания рассмотренных научных работ позволил выявить факторы, не нашедшие достаточного отражения при формировании системы технического обслуживания и ремонта кузовов автобусов. Большинство исследователей отмечены вопросы предотвращения коррозии конструктивными методами – использованием коррозионностойких материалов кузова, а также разнообразных защитных покрытий на этапе изготовления автомобиля. Ряд исследований посвящен дополнительным мерам по обработке автомобилей антикоррозионными составами перед началом или в процессе эксплуатации. При этом не нашли достаточного отражения вопросы обеспечения надежности кузовов автобусов, учитывающие взаимосвязь конструктивных, технологически, эксплуатационных и организационных факторов. Реализация обозначенного подхода требует разработки соответствующего методического обеспечения.

2 Материалы и методы

В качестве рабочей гипотезы выдвинуто предположение, что одним из факторов, оказывающих решающее влияние на интенсивность коррозионных разрушений кузовов автобусов, являются условия хранения подвижного состава в зимнее время года, а также условия и режимы выполнения уборочно-моечных работ.

Ежедневное обслуживание предусматривает осмотр кузова с целью выявления неисправностей его элементов, уборку салона, мойку кузова, протирку, сушка промытых поверхностей не производится. Уборка кузова заключается в удалении из салона пыли, грязи и мусора, в мойке или протирке пола. Мойка автобуса выполняется по потребности для обеспечения надлежащего внешнего вида автобуса. Обязательна мойка перед выполнением ТО и ремонта. Осуществляется чистой холодной водой. При этом используют как ручную, так и механизированную мойку. Мойка низа автобуса с помощью струйных установок в виде трубопроводов с соплами не производится. Сушка кузова автобуса после мойки также не производится.

Хранение подвижного состава АО «Автоколонна №1825» в холодное время года осуществляется в четырёх отапливаемых крытых стоянках общей вместимостью 432 единицы подвижного состава. Для установления факторов, способствующих образованию коррозии при хранении подвижного состава исследованы параметры микроклимата в зоне хранения – температуры, влажности воздуха, определены условия образования конденсата на элементах несущей конструкции кузовов автобусов.

Исследования проведены в отапливаемой стоянке № 3. В стоянках № 1 и № 2 хранение автобусов осуществляется в идентичных условиях.

Каждая стоянка оснащена системами отопления и приточно-вытяжной вентиляции. Въездные ворота крытых стоянок оснащены тепловыми завесами. Вследствие наличия указанных систем, в помещениях крытых стоянок формируется микроклимат, параметры которого в значительной степени отличаются от параметров окружающей среды.

Ежедневно в помещения стоянок осуществляется въезд и выезд значительного количества автотранспортных средств (автобусов малого и среднего классов, около 200 единиц), кузова которых имеют температуру, в значительной степени отличающуюся от температуры воздуха при въезде и от температуры наружного воздуха при выезде. В результате перемещения транспортных средств, а также вследствие работы систем вентиляции и отопления, в помещении стоянки протекают термодинамические и массообменные процессы, связанные с испарением и конденсацией влаги, что формирует условия, благоприятные для развития коррозионных процессов, развивающихся на поверхностях металлоконструкций автотранспортных средств.

Значительное влияние на параметры описанных выше физических и физико-химических процессов оказывают такие факторы, температура и влажность воздуха в помещении стоянки, температура и влажность наружного воздуха, режим работы вентиляционных и отопительных систем, график выезда и въезда автотранспортных средств, проведение операций мойки транспортных средств перед заездом в стоянку.

Комплексная оценка влияния описанных выше факторов проведена на основе данных, полученных в ходе экспериментальных исследований.

В качестве ключевых параметров, определяемых в ходе экспериментальных исследований, приняты температура и влажность воздуха в помещении крытой стоянки (по предложению инженерно-технического персонала предприятия, исследования проведены в помещении стоянки № 3). Выбор данных параметров обоснован их преобладающим влиянием на развитие коррозионных процессов автобусных кузовов.

Исследован характер влияния на указанные параметры температуры и влажности окружающей среды и режима работы вентиляционных систем. Измерения температуры и влажности воздуха произведены при помощи термогигрометра RGK TH-30. Внешний вид прибора представлен на рис. 2.



Рисунок 2 – Внешний вид термогигрометра RGK TH-30

При заезде и выезде транспортных средств из помещения крытой стоянки происходят теплообменные процессы, обусловленные разностью температур между поверхностями кузовов въезжающих и выезжающих транспортных средств, а также разностью температуры воздуха окружающей среды и воздуха в помещении стоянки.

При въезде в помещение стоянки в холодное время года наружные поверхности кузова и других элементов транспортного средства имеют температуру близкую температуре окру-

жающей среды (наружного воздуха). В воздухе помещения крытой стоянки, имеющем достаточно стабильную температуру, растворено определённое количество влаги, определяемое параметром относительной влажности воздуха.

С понижением температуры растворимость паров воды в воздушной среде уменьшается, что характеризуется такими параметрами, как давление и плотность насыщенных паров воды.

В холодное время года при заезде транспортного средства в помещение отапливаемой крытой стоянки формируются условия для образования конденсата на поверхностях. Образование конденсата на поверхности происходит при условии, что температура поверхности ниже температуры окружающей среды, что приводит к охлаждению воздуха в контакте с данной поверхностью до точки росы. При достижении данной точки влажный воздух не может удерживать водяной пар в газовом состоянии, и в результате на поверхности начинают образовываться капли конденсата.

Для определения условий, определяющих возникновение конденсата в помещении крытой стоянки на поверхностях въезжающих транспортных средств, использованы уравнения расчёта «точки росы» (T_p):

$$T_p = \frac{237,7 \cdot f(T, RH)}{17,27 - f(T, RH)}, \quad (1)$$

$$f(T, RH) = \frac{17,27 \cdot T}{(237,7 + T)} + \ln\left(\frac{RH}{100}\right), \quad (2)$$

где T – температура в помещении стоянки, °С;

RH – относительная влажность воздуха в помещении стоянки, %.

Условие образования конденсата описывается неравенством:

$$T_{II} < T_p, \quad (3)$$

где T_{II} – температура поверхностей транспортного средства, °С.

Расчёт температуры «точки росы» и проверка условия образования конденсата выполнено для каждого дня в период с 23 января по 15 марта 2023 г. (период мониторинга). В ходе мониторинга дополнительно определялась температура наружных поверхностей транспортных средств, въезжающих в помещение крытой стоянки. Для определения температуры поверхностей использован тепловизор модели Testo-883 (рис. 3).



Рисунок 3 – Тепловизор Testo-883

Пример изображения тепловых полей, определённых при помощи тепловизора, приведён на рис. 4.



Рисунок 4 – Распределение тепловых полей на поверхности деталей автотранспортного средства

Таким образом, экспериментальное исследование включало в себя следующие этапы:

- 1) измерение температуры и относительной влажности воздуха окружающей среды;
- 2) измерение температуры и относительной влажности воздуха в помещении стоянки;
- 3) измерение температуры транспортного средства;
- 4) расчёт температуры «точки росы» и проверка условия образования конденсата.

3 Результаты исследований

Для оценки влияния температуры и влажности воздуха окружающей среды, в период с 23 января по 15 марта 2023 г. проведён мониторинг параметров микроклимата в помещении крытой стоянки.

В ходе выполнения мониторинга пять раз в день производились замеры в четырёх точках крытой стоянки № 3. Время замера: 5:30, 10:00, 17:00; 20:00 и 20:00. Одновременно фиксировалась температура и влажность воздуха вне помещения стоянки.

Сравнительный анализ, отражающий зависимость температуры в помещении стоянки от температуры окружающей среды представлен на рис. 5.

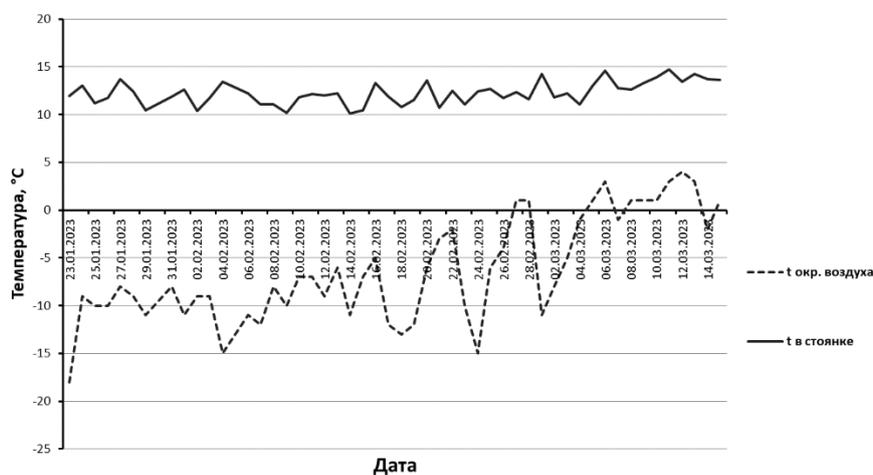


Рисунок 5 – Сравнительный анализ зависимости температуры воздуха в помещении крытой стоянки в зависимости от температуры окружающей среды

По результатам анализа можно сделать предварительный вывод о том, что в помещении стоянки в холодное время года поддерживается стабильная температура, изменяющаяся в пределах от 10 до 15 °С и в незначительной степени зависящая от температуры окружающей среды. Анализ изменения средней температуры в помещении стоянки по времени суток позволяет сделать заключение о том, что процесс въезда и выезда транспортных средств с территории стоянки практически не оказывает влияние на изменение температуры, несмотря на достаточно длительные периоды открытия въездных ворот.

Сравнительный анализ, отражающий зависимость относительной влажности воздуха в помещении стоянки от влажности воздуха окружающей среды представлен на рис. 6.

Из графиков, представленных на рис. 6 видно, что относительная влажность воздуха в помещении крытой стоянки на протяжении всего периода измерений была значительно ниже относительной влажности воздуха окружающей среды. Исходя из этого, можно сделать предварительный вывод о том, что целесообразность применения вентиляции для снижения содержания влаги в воздухе крытой стоянки в холодное время года нуждается в дополнительном изучении.

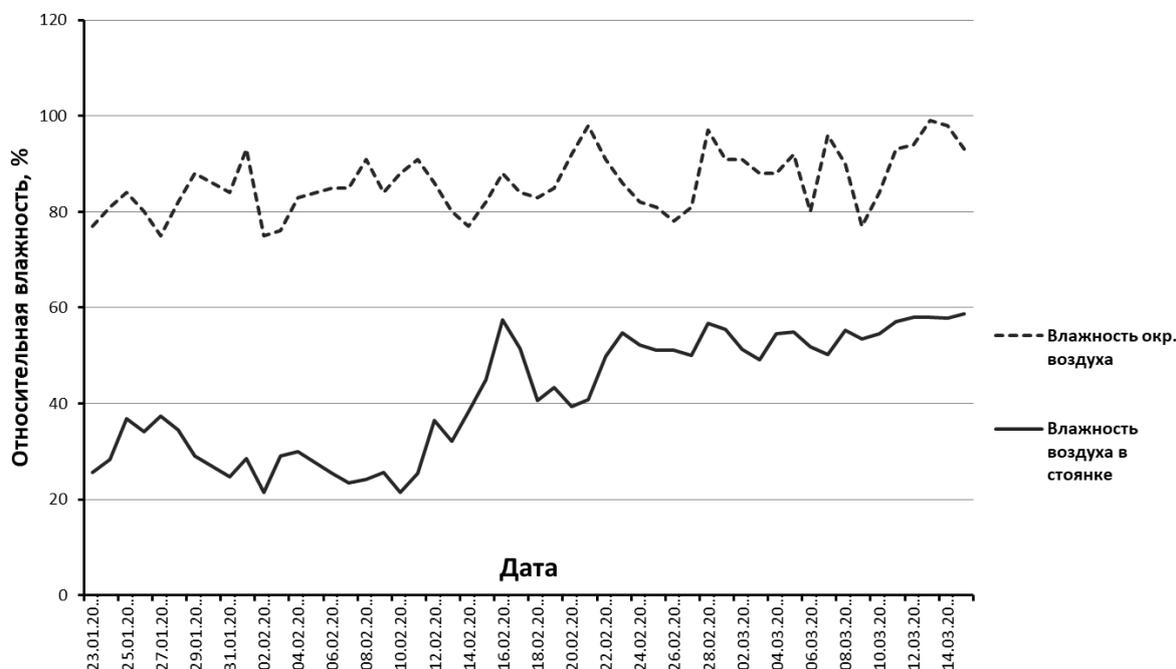


Рисунок 6 – Сравнительный анализ зависимости относительной влажности воздуха в помещении крытой стоянки в зависимости от относительной влажности воздуха окружающей среды

График, иллюстрирующий результаты сравнительного анализа изменения относительной влажности воздуха в помещении крытой стоянки и температуры окружающей среды, представлен на рис. 7.

Сравнение двух кривых, представленных на графике, позволяет сделать заключение о наличии связи относительной влажности в помещении крытой стоянки и температуры окружающей среды. Связь данных параметров объясняется физическими свойствами воздуха, в частности таким его параметром, как растворимость влаги, которая в свою очередь определяется давлением насыщенных паров воды при заданной температуре. С понижением температуры давление насыщенных паров воды в воздушной среде снижается. Как следствие, уменьшается абсолютное содержание в воздухе паров воды. Тот факт, что при снижении температуры окружающей среды уменьшается влажность воздуха в помещении крытой стоянки, свидетельствует

о наличии воздухообмена между стоянкой и окружающей средой, что и определяет условия образования конденсата на элементах кузова.



Рисунок 7 – Результаты сравнительного анализа изменения относительной влажности воздуха в помещении крытой стоянки и температуры окружающей среды

Условие образования конденсата можно определяется расчетным методом. В качестве примера рассмотрим случай, когда в помещение стоянки, внутренний воздух которой имеет температуру +10 °C и относительную влажность 30 % въезжает автобус, поверхности кузова которого имеют температуру – 10 °C. Оценить возможность образования конденсата на поверхности кузова можно следующим образом:

- по справочной таблице состояния насыщенного водяного пара определяем, что плотность насыщенного водяного пара при температуре +10 °C равна 9,4 г/м³;
- исходя из того, что относительная влажность воздуха в помещении стоянки составляет 40 %, определяем, что фактическое содержание водяных паров в воздухе стоянки составляет $\rho_f = 9,4 \cdot 0,4 = 3,76$ г/м³;
- так как поверхность кузова автобуса имеет температуру – 10 °C, то, соприкасающийся с кузовом воздух так же охлаждается до этой температуры. По справочной таблице состояния насыщенного водяного пара определяем, что что плотность насыщенного водяного пара при температуре – 10 °C равна 2,6 г/м³;
- исходя из того, что фактически в воздухе содержится 3,76 г/м³ водяного пара, что выше значения 2,6 г/м³, делаем заключение о том, что 3,76-2,6 = 1,16 грамма с каждого кубометра воздуха, соприкасающегося с кузовом, выпадет в конденсат.

В табл. 1 представлен фрагмент таблицы с результатами расчёта температуры «точки росы» и проверки условия образования конденсата на поверхностях кузовных деталей.

Следовательно, процесс образования конденсата на поверхностях кузова зависит от температуры и влажности воздуха в помещении стоянки, а также от температуры поверхности кузова. Очевидно, что данный процесс реализуется не всегда, а при определённом сочетании указанных параметров.

В ходе исследований установлено, что из 235 замеров, произведённых в ходе мониторинга, лишь в 8 случаях не возникли условия для образования конденсата. Следовательно, очевидна актуальность мероприятий, направленных на снижение влажности воздуха и уменьшение конденсатообразования при постановке транспортных средств на хранение в помещении отапливаемой крытой стоянки.

Таблица 1 – Результаты расчёта температуры «Точки росы» и проверки условия образования конденсата на поверхностях кузовных деталей (фрагмент)

Дата замера	Время замера	Наружный воздух			Средняя температура в стоянке	Средняя влажность в стоянке	Точка росы	Наличие конденсата
		Температура, °С	Температура кузова, °С	Относительная влажность, %				
23.01.2023	5:30	-21	-16,8	77	10,075	25,6	-8,742	+
	10:00	-19	-15,2	77	9,8	26,2	-8,739	+
24.01.2023	5:30	-18	-14,4	81	12,0	28,3	-5,850	+
	10:00	-14	-11,2	86	11,9	28,5	-5,833	+
	17:00	-9	-7,2	68	13,0	27,4	-5,381	+
	20:00	-13	-10,4	79	14,1	32,6	-2,108	+
	22:00	-14	-11,2	83	12,1	36,1	-2,452	+
25.01.2023	5:30	-13	-10,4	84	13,6	36,9	-0,868	+
	10:00	-12	-9,6	93	12,3	34,6	-2,878	+
	17:00	-10	-8	82	11,2	33,2	-4,439	+
	20:00	-11	-8,8	92	12,7	36,9	-1,654	+
	22:00	-12	-9,6	92	13,2	31,8	-3,230	+

Одним из таких мероприятий является увеличение воздухообмена между помещением крытой стоянки и окружающей средой за счёт использования вентиляционных систем

4 Обсуждение и заключение

По результатам проведенных наблюдений, а также анализа литературных источников установлено, что к факторам, способствующим интенсивному образованию коррозии, относится низкий уровень заводской антикоррозионной защиты в сочетании с неблагоприятными условиями эксплуатации и хранения автобусов на базе АО «Автоколонна № 1825». Это обуславливает повышенный уровень эксплуатационных затрат, связанных с преждевременным капитальным ремонтом автобусных кузовов.

При анализе условий эксплуатации, технического обслуживания кузовов автобусов и условий хранения подвижного состава установлено следующее. Значительное влияние на условия протекания коррозионных процессов оказывает эксплуатация транспортных средств в зимний период, во время которого кузова подвержены влиянию факторов среды и реагентов, которыми обрабатываются автомобильные дороги.

Для удаления эксплуатационных загрязнений проводятся уборочно-моечные работы. Недостатком организации уборочно-моечных работ на предприятии являются как отсутствие мойки колесных арок и днища кузова, так и отсутствие этапа принудительной сушки после мойки кузова.

В результате анализа литературных источников также установлено, что к факторам, влияющим на интенсивность коррозионных повреждений, относится образование конденсата на кузове при хранении транспортных средств. Для установления условий, способствующих возникновению конденсата на кузовах автобусов, проведены исследования температуры и относительной влажности воздуха в помещении крытой отапливаемой стоянки в зимний период.

По результатам исследования получены зависимости: температуры воздуха в помещении крытой стоянки от температуры окружающей среды, относительной влажности воздуха в помещении крытой стоянки от относительной влажности воздуха окружающей среды, относительной влажности воздуха в помещении крытой стоянки и температуры окружающей среды.

Результаты экспериментального исследования, а также результаты расчетно-аналитической работы позволило установить, что в зоне хранения автобусов в 227 случаях из 235 наблюдаемых зафиксированы условия микроклимата помещения хранения, связанные с образованием конденсата, что в совокупности с факторами эксплуатации и ежедневного обслуживания приводит к их интенсивному коррозионному разрушению кузовов автобусов.

Основными доступными в условиях производственно-технической базы АТП направлениями снижения скорости коррозионного разрушения автобусных кузовов являются:

– повышение коррозионной стойкости кузовных конструкций за счет нанесения противокоррозионных и лакокрасочных покрытий в местах возникновения местной коррозии, герметизации сопряжений и устранение зазоров в местах возникновения щелевой коррозии;

– обеспечение условий, способствующих снижению интенсивности коррозионного изнашивания автобусных кузовов за счет изменения технологии мойки и условий хранения автобусов.

Исходя из этого, можно сделать предположение о том, что повышение интенсивности воздухообмена можно рассматривать как одно из мероприятий, позволяющих снизить влажность воздуха в помещении крытой стоянки. Такое снижение позволяет уменьшить температуру выпадения конденсата, что в свою очередь способствует значительному снижению скорости коррозионных процессов.

Список литературы

- 1 Федорченко, В.И. Коррозия металлов / В.И. Федорченко. - М.: Бибком, 2009. - 655 с.
- 2 Orlov L.N. Rogov P.S. Tumasov A.V. Vashurin A.S. Increasing of the passive safety of the bus bodies constructions // Modern problems of science and education. – 2014. – № 3 – P. 17-17.
- 3 Korta J., Uhl T.. Multi-material design optimization of a bus body structure // Journal of KONES Powertrain and Transport, 2013. Vol. 20, No. 1, pp. 139-146.
- 4 Атмосферная коррозия металлов: Доклады на научно-техническом совещании по атмосферной коррозии и борьбе с ней. - М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1989. - 248 с.
- 5 Бахвалов, Г.Т. Коррозия и защита металлов / Г.Т. Бахвалов, А.В. Турковская. - М.: Металлургиздат, 2001. - 400 с.
- 6 Мещеринов, Н. А. Методы защиты кузова автомобиля от коррозии / Н. А. Мещеринов, В. О. Нугаева // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2019. – № 2(35). – С. 159-162. – EDN XWIKCV.
- 7 Суфиянов, Р. Ш. К вопросу о коррозии кузовов легковых автомобилей / Р. Ш. Суфиянов // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 93-8. – С. 23-26. – DOI 10.18411/trnio-01-2023-387. – EDN ATPSCB.
- 8 Белоглазов, Г.С. Квантово-химический анализ действия ингибиторов коррозии металлов / Г.С. Белоглазов. - М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. - 176 с.
- 9 Новый ингибитор коррозии в составе лакокрасочных покрытий кузовов автомобилей / А. В. Шемякин, И. В. Фадеев, И. А. Успенский [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 168-175. – DOI 10.36508/RSATU.2023.67.31.023. – EDN HNSCSM.
- 10 Сазонов, Д.С. Влияние ингибиторов коррозии на эффективность защиты элементов кузова автомобиля / Д. С. Сазонов, М. П. Ерзамаев, С. Н. Жильцов, А. П. Быченин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 1. – С. 29-36. – EDN PKEBZF.

11 Фадеев, И. В. Влияние компонентов дорожного загрязнения на влагопоглощение пленки противокоррозионного покрытия / И. В. Фадеев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2021. – № 1(49). – С. 177-183. – DOI 10.36508/RSATU.2021.49.1.026. – EDN QEXAHN.

12 Эксплуатация транспортных средств в условиях повышенной агрессивности окружающей среды / А. А. Абакаров, Ш. М. Игитов, А. А. Абакаров, М. О. Омаров // Приоритеты развития автотранспортного и дорожного комплекса : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Махачкала, 20–22 мая 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 136-143. – EDN OMSWZI.

13 Применение органических растворителей в окрасочных системах, используемых при высококачественной обработке кузовов автомобилей в период с 1998 по 2020 г / А. С. Панасюгин, И. Л. Кулинич, Н. П. Машерова [и др.] // Литье и металлургия. – 2022. – № 1. – С. 96-105. – DOI 10.21122/1683-6065-2022-1-96-105. – EDN UNAZOL.

14 Зорина, И. О. Увеличение ресурса кузова легкового автомобиля / И. О. Зорина, С. В. Дорохин // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2016. – Т. 3, № 1(4). – С. 75-79. – DOI 10.12737/18835. – EDN XRKFOP..

15 Закономерности коррозионных повреждений кузовов пассажирских автотранспортных средств / А. С. Гребенников, С. А. Гребенников, А. В. Косарева, А. С. Обельцев // Информационные технологии и инновации на транспорте : Материалы 5-ой Международной научно-практической конференции, Орёл, 22–23 мая 2019 года / Под общей редакцией А.Н. Новикова. – Орёл: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2020. – С. 335-343. – EDN BYILUK.

16 Шейнин, И.Г. Антикоррозионная защита поверхностей. Основы теории и технологии / И. Г. Шейнин, В. П. Барановский, В. И. Байцар. - СПб.: Издательство Политехника, 2010. - 368 с.

17 Ovchinnikov, N.A. The engineering method of calculation of the remaining life of the bus body safe operation on the basis of estimation of its corrosion deterioration / N.A. Ovchinnikov, B.Y. Kalmikov, S.G. Stradanchenko, E.A. Kozyreva, O.V. Chefranova // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10, № 22, pp. 10511-10522.

18 Ruban, D. Development of bus body technologies in terms of corrosion and durability / D. Ruban, L. Kraynyk, H. Ruban, M. Zakharova, S. Burmistrov, V. Khotunov, V. Metelap // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 3. pp. 67-75.

19 Белов А.С. Организация хранения автотранспортных средств в автомобильном транспорте // Автомобильный транспорт. - 2015. - № 2 (84). - С. 18-21.

20 Васильев С.В. Организация складирования автотранспорта: особенности и технологии // Логистика и управление цепями поставок. - 2015. - № 2 (19). - С. 22-26.

21 Григорьев, И.А. Организация и управление хранением автотранспортных средств на автостоянках // Транспорт и хранение нефти и газа. - 2016. - № 4 (31). - С. 34-38.

22 Иванов, И.В. Организация хранения автотранспортных средств на автостоянках: проблемы и пути их решения //И.В. Иванов, А.М.Смирнов. - Транспортное дело России. - 2014. - № 2. - С. 56-61.

23 Кондрашина, О.М. Организация хранения автотранспорта на автопарках транспортных компаний // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - 2015. - № 2 (16). - С. 78-82.

24 Сергеев, А.И. Организация и управление складами автотранспортных средств // Логистика и управление цепями поставок. - 2017. - № 3 (40). - С. 48-52.

25 Страхов, И.В. Организация хранения автотранспортных средств на автостоянках: особенности и технологии // Грузовой транспорт. - 2016. - № 6 (47). - С. 32-37.

26 Тихонов, А.А. Организация хранения автотранспорта на автостоянках: проблемы и пути их решения // Транспортное дело России. - 2015. - № 6 (49). - С. 25-29.

27 Хорева, Е.А. Организация хранения автотранспорта на автостоянках: проблемы и решения // Логистика и управление цепями поставок. - 2014. - № 4 (15). - С. 26-30.

28 Чернышов, И.В. Организация хранения автотранспорта на автостоянках: проблемы и пути их решения // Транспортное дело России. - 2016. - № 1 (54). - С. 26-31.

References

1 Fedorchenko, V.I. Corrosion of metals / V.I. Fedorchenko. - M.: Bibkom, 2009. - 655 p.

2 Orlov L.N. Rogov P.S. Tumasov A.V. Vashurin A.S. Increasing of the passive safety of the bus bodies constructions // Modern problems of science and education. – 2014. – No. 3 – P. 17-17.

3 Korta J., Uhl T.. Multi-material design optimization of a bus body structure // Journal of KONES Powertrain and Transport, 2013. Vol. 20, No. 1, pp. 139-146.

4 Atmospheric corrosion of metals: Reports at the scientific and technical meeting on atmospheric corrosion and its control. - M.: State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Ferrous and Non-ferrous Metallurgy, 1989. - 248 c.

5 Bakhvalov, G.T. Corrosion and protection of metals / G.T. Bakhvalov, A.V. Turkovskaya. - M.: Metallurgizdat, 2001. - 400 p.

6 Meshcherinov, N. A. Methods of protecting the car body from corrosion / N. A. Meshcherinov, V. O. Nugaeva // Technical regulation in transport construction. – 2019. – № 2(35). – Pp. 159-162. – EDN XWIKCV.

7 Sufiyarov, R. S. On the issue of corrosion of passenger car bodies / R. S. Sufiyarov // Trends in the development of science and education. – 2023. – No. 93-8. – pp. 23-26. – DOI 10.18411/trnio-01-2023-387. – EDN ATPSCB.

8 Beloglazov, G.S. Quantum chemical analysis of the action of metal corrosion inhibitors / G.S. Beloglazov. - M.: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. - 176 p.

9 A new corrosion inhibitor in the composition of paintwork coatings of car bodies / A.V. Shemyakin, I. V. Fadeev, I. A. Uspensky [et al.] // Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – pp. 168-175. – DOI 10.36508/RSATU.2023.67.31.023. – EDN HNSCSM.

10 Sazonov, D.S. The influence of corrosion inhibitors on the effectiveness of protecting the body elements of an automobile / D. S. Sazonov, M. P. Erzamaev, S. N. Zhiltsov, A. P. Bychenin // Izvestiya Samara State Agricultural Academy. – 2020. – No. 1. – pp. 29-36. – EDN PKEBZF.

11 Fadeev, I. V. The influence of road pollution components on the moisture absorption of the anticorrosive coating film / I. V. Fadeev // Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. – 2021. – № 1(49). – Pp. 177-183. – DOI 10.36508/RSATU.2021.49.1.026. – EDN QEXAHN.

12 Operation of vehicles in conditions of increased aggressiveness of the environment / A. A. Abakarov, Sh. M. Igitov, A. A. Abakarov, M. O. Omarov // Priorities for the development of the motor transport and road complex : collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference, Makhachkala, May 20-22, 2021. – Moscow: Pero Publishing House, 2021. – pp. 136-143. – EDN OMSWZI.

13 The use of organic solvents in paint systems used in high-quality processing of car bodies in the period from 1998 to 2020 / A. S. Panasyugin, I. L. Kulinich, N. P. Masherova [et al.] // Casting and metallurgy. - 2022. – No. 1. – pp. 96-105. – DOI 10.21122/1683-6065-2022-1-96-105. – EDN UNAZOL.

14 Zorina, I. O. Increase in the life of the car body / I. O. Zorina, S. V. Dorokhin // Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use. - 2016. – Vol. 3, No. 1(4). – pp. 75-79. – DOI 10.12737/18835. – EDN XRKFOP..

15 Patterns of corrosion damage to passenger vehicle bodies / A. S. Grebennikov, S. A. Grebennikov, A.V. Kosareva, A. S. Obeltsev // Information technologies and innovations in transport : Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference, Orel, May 22-23, 2019 / Under the general editorship of A.N. Novikov. – Orel: I.S. Turgenev Oryol State University, 2020. – pp. 335-343. – EDN BYILUK.

16 Sheinin, I.G. Anticorrosive protection of surfaces. Fundamentals of theory and technology / I. G. Sheinin, V. P. Baranovsky, V. I. Baitsar. - St. Petersburg: Polytechnic Publishing House, 2010. - 368 p.

17 Ovchinnikov, N.A. The engineering method of calculation of the remaining life of the bus body safe operation on the basis of estimation of its corrosion deterioration / N.A. Ovchinnikov, B.Y. Kalmikov, S.G. Stradanchenko, E.A. Kozyreva, O.V. Chefranova // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 10, № 22, pp. 10511-10522.

18 Ruban, D. Development of bus body technologies in terms of corrosion and durability / D. Ruban, L. Kraynyk, H. Ruban, M. Zakharova, S. Burmistrov, V. Khotunov, V. Metelap // *East-ern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 3. pp. 67-75.

19 Belov A.S. Organization of storage of motor vehicles in automobile transport // *Automobile transport*. - 2015. - № 2 (84). - Pp. 18-21.

20 Vasiliev S.V. Organization of vehicle warehousing: features and technologies // *Logistics and supply chain management*. - 2015. - № 2 (19). - Pp. 22-26.

21 Grigoriev, I.A. Organization and management of storage of motor vehicles in parking lots // *Transport and storage of oil and gas*. - 2016. - № 4 (31). - Pp. 34-38.

22 Ivanov, I.V. Organization of storage of motor vehicles in parking lots: problems and ways to solve them // I.V. Ivanov, A.M. Smirnov. - *The transport business of Russia*. - 2014. - No. 2. - pp. 56-61.

23 Kondrashina, O.M. Organization of vehicle storage in the fleets of transport companies // *Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. - 2015. - № 2 (16). - Pp. 78-82.

24 Sergeev, A.I. Organization and management of warehouses of motor vehicles // *Logistics and supply chain management*. - 2017. - № 3 (40). - Pp. 48-52.

25 Strakhov, I.V. Organization of storage of motor vehicles in parking lots: features and technologies // *Cargo transport*. - 2016. - № 6 (47). - Pp. 32-37.

26 Tikhonov, A.A. Organization of vehicle storage in parking lots: problems and solutions // *The transport business of Russia*. - 2015. - № 6 (49). - Pp. 25-29.

27 Khoreva, E.A. Organization of vehicle storage in parking lots: problems and solutions // *Logistics and supply chain management*. - 2014. - № 4 (15). - Pp. 26-30.

28 Chernyshov, I.V. Organization of vehicle storage in parking lots: problems and ways to solve them // *The transport business of Russia*. - 2016. - № 1 (54). - Pp. 26-31.

© Дрючин Д.А., Горбачёв С.В., Мельников А.Н., Фаскиев Р.С., 2024

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-103-110



УДК 656.09

UDC 656.09

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ПЕРЕКРЕСТКАХ

TO THE QUESTION OF JUSTIFICATION OF APPLICATION OF OPTIMAL TECHNOLOGY OF ROAD TRAFFIC ORGANIZATION AT INTERSECTIONS

Комаров Юрий Яковлевич, к.т.н., доцент кафедры «Автомобильные перевозки», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград.

Komarov Yury Yakovlevich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of Automobile transportation, Volgograd state technical university, Volgograd.

✉¹ **Ганзин Сергей Валерьевич**, к.т.н., доцент кафедры «Автомобильные перевозки», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, e-mail: ganzin_fat@mail.ru

✉¹ **Ganzin Sergey Valerievich**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of Automobile transportation, Volgograd state technical university, Volgograd, e-mail: ganzin_fat@mail.ru

Сильченков Дмитрий Дмитриевич, ст. преподаватель кафедры «Автомобильные перевозки», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград.

Silchenkov Dmitry Dmitrievich, senior lecturer of the department of Automobile transportation, Volgograd state technical university, Volgograd.

Зеликова Наталья Владимировна, аспирант автомобильного факультета, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Zelikova Natalya Vladimirovna, postgraduate student of the faculty of automotive, Voronezh state forestry engineering university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. Вопрос о применении оптимальной технологии организации дорожного движения на улично-дорожной сети в настоящий момент решен не полностью. В статье описывается разработка номограммы обоснования планировочного решения перекрестка на основе микромоделирования дорожного движения в программном комплексе Aimsun, и анализируются полученные результаты.

Annotation. The question of application of optimal technology of traffic organization on the street-road network at the present moment is not completely solved. The article describes the development of nomogram for justification of intersection planning solution on the basis of traffic micro-modeling in the Aimsun software package, and analyzes the obtained result.

Ключевые слова: АВТОМОБИЛЬ, ДОРОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ, AIMSUN.

Keywords: AUTOMOBILE, TRAFFIC, ORGANIZATION, EFFICIENCY, EFFICIENCYUN, AIMSUN.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

При сохраняющихся высоких темпах автомобилизации в Российской Федерации транспортная инфраструктура городов развивается менее интенсивно, что приводит к росту транспортных заторов, к потерям времени в дорожном движении, эмоционально-психологическому напряжению водителей и пассажиров, находящихся в транспортном заторе, что зачастую побуждает их к нарушениям правил дорожного движения, влечет за собой рост аварийности. За последние несколько десятилетий были приняты к реализации следующие нормативно-правовые акты: программы повышения безопасности дорожного движения в 2006-2012 гг. [1] и 2013-2020 гг. [2], Стратегия безопасности дорожного движения [3], Указ Президента РФ № 204 от 7 мая 2018 г. «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [4], направленный на достижение целевого показателя – 4 погибших на 100000 жителей к 2024 г., со стремлением к нулевому уровню смертности к 2030 г. Для достижения данного показателя предлагаются следующие пути: развитие и повышение качества улично-дорожной сети, внедрение новых стандартов обустройства автомобильных дорог, снижение и устранение мест концентраций дорожно-транспортных происшествий, внедрение новых технологий организации дорожного движения, в том числе с применением автоматизированных систем управления дорожным движением, интеллектуальных транспортных систем, усиление ответственности граждан за нарушение правил дорожного движения и др..

Реализация приведенных выше путей в полном объеме невозможна без квалифицированных специалистов и методической литературы по безопасности и организации дорожного движения.

В теории и практике безопасности и организации дорожного движения при обосновании выбора технологии организации дорожного движения на улично-дорожной сети применяют критерии:

- безопасности, основанные на оценке аварийности;
- организации дорожного движения, связанные с эффективностью, то есть с задержками в дорожном движении [5].

В частности, для обеспечения эффективности дорожного движения и удобства при выборе планировки пересечения автомобильных дорог и организации движения на перекрестке используются номограммы [6, 7, 8 и др.].

К недостаткам разработанных ранее номограмм можно отнести то, что в них не учитываются современные технологии организации дорожного движения, не предусмотрена возможность учета доли поворотных потоков, не в полном объеме показаны критерии выбора.

Таким образом, целью нашего исследования стало получение номограммы для обоснования планировки пересечения автомобильных дорог и организации движения на перекрестке по минимуму транспортных задержек с учетом применяемых современных технологий организации дорожного движения. Для достижения поставленной цели необходимо создать модели основных технологий организации дорожного движения и провести моделирование на них с варьированием значений интенсивностей движения по направлениям.

2 Материалы и методы

Данная работа является продолжением исследований, проводившихся на кафедре «Автомобильный транспорт» Волгоградского государственного технического университета [9, 10, 11].

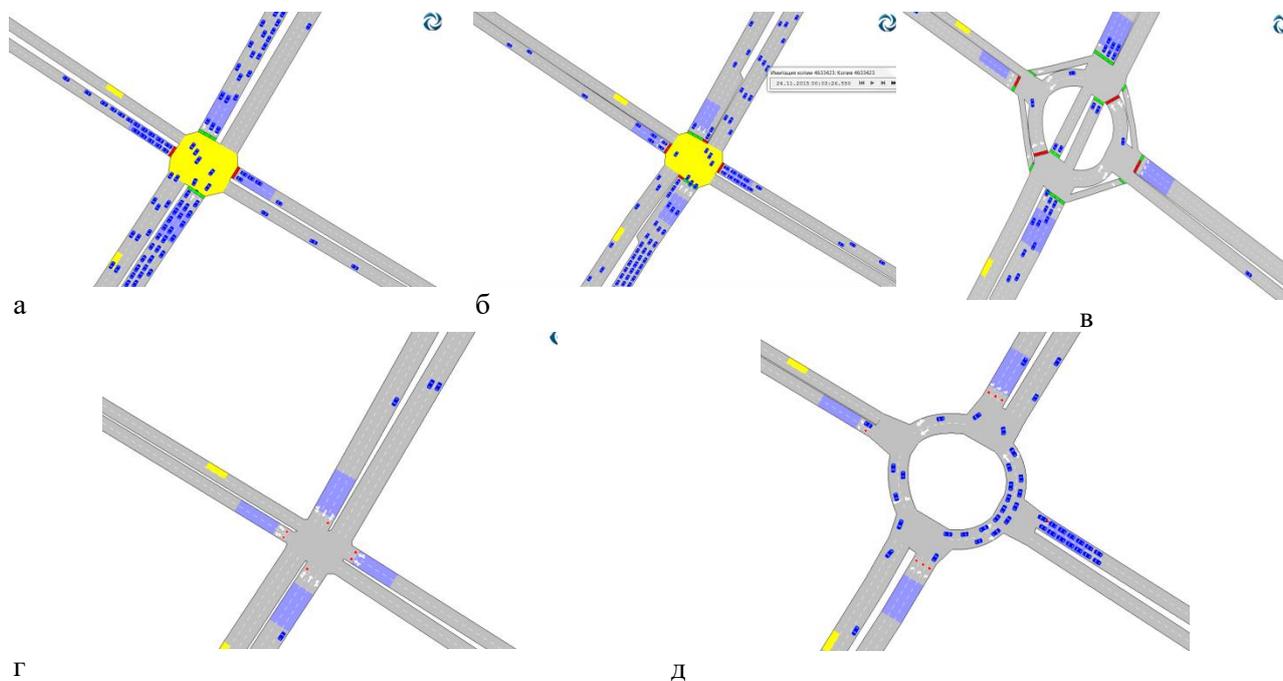
Основным инструментарием проведенного исследования послужил программный комплекс по моделированию дорожного движения «Aimsun», неоднократно апробированный в данной области знаний и рекомендованный к применению методическими документами по организации дорожного движения.

Для исследования были выбраны следующие виды технологий организации дорожного движения:

- нерегулируемое пересечение;
- регулируемое пересечение;

- регулируемое пересечение с выделенными полосами для транспортных средств, ожидающих поворот налево;
- кольцевое пересечение с диаметром островка 40 м;
- кольцевое пересечение со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком диаметром 40 м (КПСРПЦО).

Модели дорожного движения показаны на рис. 1.



- а) регулируемый перекресток; б) регулируемое пересечение с выделенными полосами для транспортных средств, ожидающих поворот налево; в) кольцевое пересечение со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком диаметром 40 м;
г) нерегулируемое пересечение; д) кольцевое пересечение с диаметром островка 40 м

Рисунок 1 – Технологии организации дорожного движения

В соответствии со ст. 3 ФЗ №443 «Об организации дорожного движения» [5] критерием эффективности организации дорожного движения является транспортная задержка. Наиболее распространена для оценки эффективности транспортного узла – средняя задержка на пересечении, рассчитываемая по формуле:

$$t_{\Delta H} = \frac{\sum_i^n (T_{\Delta H_i} N_i)}{\sum_i^n N_i}, \quad (1)$$

где $T_{\Delta H_i}$ – задержка на i -ом подходе к переходу, с; N_i – интенсивность транспортного потока на i -ом подходе, авт./ч.

В программном комплексе «Aimsun» [12] применяется следующая формула для расчета транспортной задержки:

$$DT_i = TT_i - \left(\frac{L_s}{\text{Min}(SMax_i, S_s * \theta_i)} + \frac{L_t}{\text{Min}(SMax_i, S_t * \theta_i)} \right), \quad (2)$$

где DT_i – задержка i -го транспортного средства (ТС) на участке дорожной сети (УДС), с; TT_i – время в пути i -го ТС на участке УДС, с; L_s – длина прямого участка, м; L_k – длина криволинейного участка, м; $SMax_i$ – желаемая максимальная скорость i -го ТС, м/с; S_s – разрешенная скорость прямого участка, м/с; S_k – разрешенная скорость криволинейного участка, м/с; θ_i – коэффициент выполнения требования разрешенной скорости движения.

В отличие от рекомендованной в отечественной методической литературе по организации дорожного движения методике Ф. Вебстера данная методика показывает хорошую согласованность с экспериментальными данными, полученными в условиях транспортного затора.

При проведении исследования были приняты следующие допущения:

- транспортные потоки состоят только из легковых автомобилей;
- интенсивности дорожного движения на встречных подходах к перекрестку равны;
- продольные уклоны составляют 0 %;
- ширина полосы движения составляет 3,75 м;
- доля транспортных средств, совершающих правый поворот по главной дороге – 5 %, совершающих левый поворот – 5, 10, 15, 20 %;
- доля транспортных средств, совершающих правый поворот на второстепенной дороге – 5 %, совершающих левый поворот – 10 %;
- отсутствие пешеходного движения.

Методика проведения исследования приведена на рис. 2.

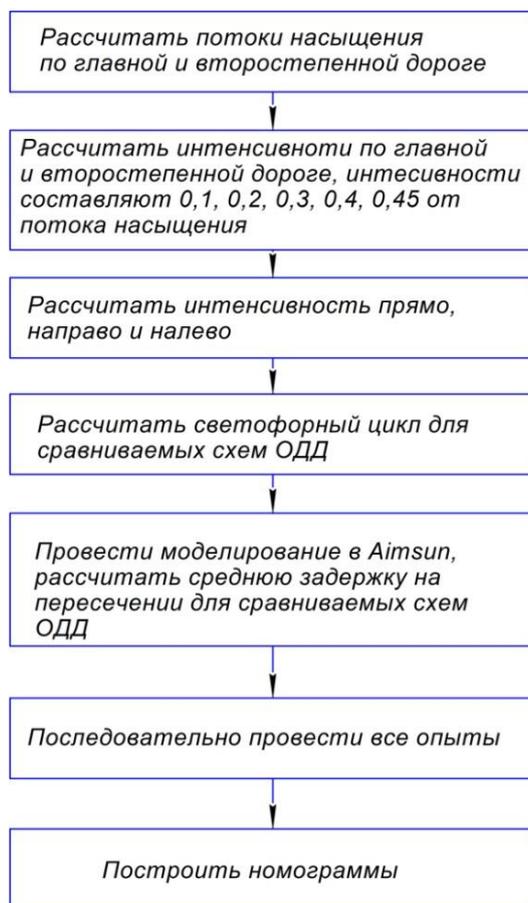


Рисунок 2 – Методика проведения исследования

Исходя из геометрических размеров, а также описанных выше допущений, для подходов к перекресткам определялись потоки насыщения по главной и второстепенной дороге [13, 14]. Далее определялись интенсивности по главной и второстепенной дороге, которые составляли: 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,45 от потока насыщения. Затем определялись интенсивности прямо, лево- и правоповоротных потоков. Структуры светофорных циклов рассчитывались согласно рекомендациям научно-технической литературы [5, 10, 13, 14].

Полученные интенсивности дорожного движения, структуры светофорных циклов вводились в модели дорожного движения. По окончании моделирования получали значения транспортных задержек по каждому подходу, на основании которых рассчитывалась средняя задержка по формуле 1.

На основе рассчитанных средних задержек были определены области, в которых одна из исследуемых технологий организации дорожного движения наиболее эффективна, т.е. имеет минимальные средние задержки. Для уточнения границ полученных областей проводилось дополнительное моделирование.

3 Результаты исследований

В результате обработки результатов исследования была разработана номограмма (см. рис. 3) для обоснования планировочного решения перекрестка по критерию эффективности организации дорожного движения в зависимости от средних интенсивностей на пересекающихся дорогах (улицах) и доли левоповоротного потока.

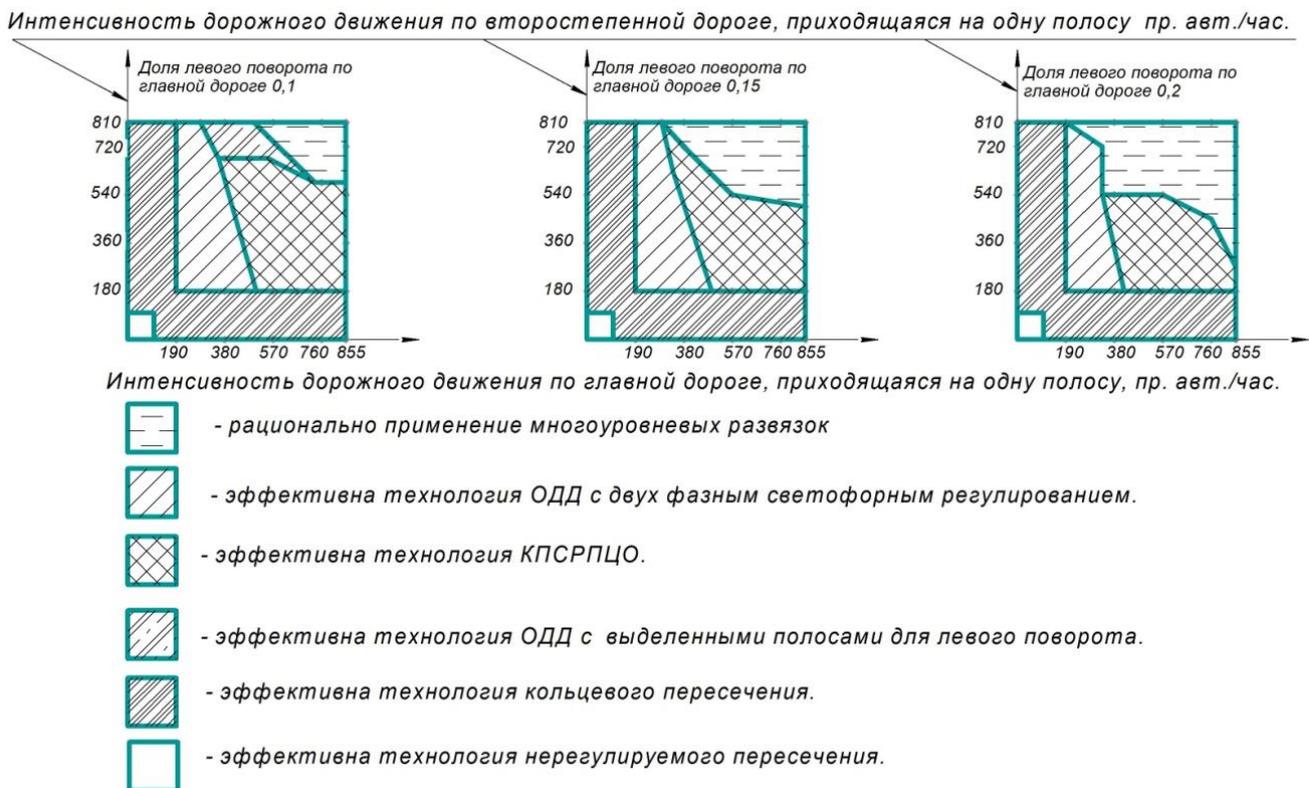


Рисунок 3 – Предлагаемая номограмма для обоснования планировочного решения перекрестка по критерию эффективности организации дорожного движения

4 Обсуждение и заключение

На основании полученных номограмм видно, что применение нерегулируемых перекрестков показывает свою эффективность при интенсивности дорожного движения до 100 приведенных ед./час на полосу движения (рис. 3). При превышении данного значения начинается рост транспортных задержек по второстепенному направлению, что влечет к росту средней транспортной задержки на пересечении. Технология кольцевого пересечения позволяет по развязке двигаться сразу нескольким транспортным средствам, поэтому с ростом интенсивностей по одному из направлений данная технология является предпочтительней, чем обычное пересечение. С одновременным ростом интенсивностей на пересекающихся улицах (начиная от 190 приведенных ед./час до 380 по главному направлению и до 720 приведенных ед./час по второстепенному направлению) эффективность кольцевого пересечения снижается ввиду образования очередей въезжающих транспортных средств на круговую развязку. В этой области эффективна технология регулирования дорожного движения. С дальнейшим ростом средних интенсивностей дорожного движения левоповоротные потоки не успевают завершить маневр, вызывая помехи транспорту, движущемуся по противоположному направлению вплоть до блокировки перекрестка. В данной области эффективны технологии организации дорожного движения кольцевого пересечения со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком и регулируемое пересечение с выделенными полосами для транспортных средств, ожидающих поворот налево. При последующем повышении средних интенсивностей происходит рост очередей транспортных средств перед развязкой, увеличении конфликтных ситуаций между транспортными средствами, заканчивающими левый поворот и начинающими движение на противоположном направлении. Поэтому при таких интенсивностях уже необходимо рассматривать вопрос о возможности применения многоуровневых развязок.

Разработанная номограмма обоснования планировочного решения перекрестка хорошо согласуется с известными ранее и апробированными номограммами, а также с результатами исследования эффективности дорожного движения на нерегулируемых, регулируемых и кольцевых пересечениях.

Предлагаемая номограмма отличается от существующих учетом средних часовых интенсивностей дорожного движения и варьированием доли левоповоротного потока по основному направлению [6]. Кроме этого, в номограмму дополнительно введены кольцевое пересечение со светофорным регулированием и диаметрально прорезанным центральным островком и регулируемое пересечение с выделенными полосами для транспортных средств, ожидающих поворот налево.

Таким образом, в результате проведенного исследования была получена номограмма для обоснования вида планировки пересечения автомобильных дорог и организации движения на перекрестке по минимуму транспортных задержек с учетом применяемых современных технологий организации дорожного движения. Для ее получения были разработаны пять моделей перекрестков автомобильных дорог, с помощью которых выявлены наиболее эффективные решения при различных сочетаниях интенсивностей дорожного движения по направлениям.

Список литературы

1 Федеральная целевая программа «Повышение безопасности дорожного движения в 2006 – 2012 годах» [Электронный ресурс] : утверждена Постановлением Правительства РФ от 20.02.2006 г. № 100. – Информационно-правовой справочник Гарант. Режим доступа: <http://base.garant.ru/189189/>.

2 Федеральная целевая программа «Повышение безопасности дорожного движения в 2013 – 2020 годах» [Электронный ресурс] : утверждена Постановлением Правительства РФ от 3.10.2013 г. № 864. – Информационно-правовой справочник Гарант. Режим доступа: <http://base.garant.ru/70467076/>.

3 Стратегия безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018 - 2024 годы [Электронный ресурс] : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 8.01.2018 года №1-р. – Информационно-правовой справочник Гарант. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71760528/>.

4 О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года [Электронный ресурс] : Указ Президента РФ от 7.05.2018 г. № 204. – Информационно-правовой справочник Гарант. Режим Доступа: <http://www.garant.ru/hotlaw/federal/1195467/#ixzz6kAOeEs3U>.

5 Об организации дорожного движения в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Электронный ресурс] : от 29.12.2017 ФЗ № 443-ФЗ. – Информационно-правовой справочник Гарант. Режим Доступа: <https://base.garant.ru/71848756/>.

6 ОДМ 218.2.020–2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. – Москва : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2013. – 144 с.

7 Свод правил по проектированию геометрических элементов автомобильных дорог и транспортных пересечений. Часть 2. Свод правил по проектированию геометрических элементов транспортных пересечений автомобильных дорог. – Москва : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2012. – 212 с.

8 Lagemann A. Vorrang für Busse und Straßenbahnen an Kreisverkehren, vom Fachbereich Architektur. Raum- und Umweltplanung // Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern zur Verleihung des akademischen Grades Dr.-Ing. genehmigte Dissertation. 2004. 222 p.

9 Сильченков, Д. Д. Определение условий эффективного применения кольцевого пересечения со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком (КПСРЦО) / Д. Д. Сильченков, А. В. Лемешкин, В. С. Метлев, В. В. Ульяновский // Строительные и дорожные машины. – 2020. – № 2. – С. 29-33.

10 Сильченков, Д. Д. Исследование транспортных задержек на кольцевом пересечении со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком / Д. Д. Сильченков, А. В. Лемешкин, Ю. Я. Комаров, В. С. Метлев // Строительные и дорожные машины. – 2020. – № 4. – С. 27-30.

11 Adaptation of the Traffic Signal Control Design Method to a Hamburger Roundabout (Адаптация методики расчета светофорного цикла для кругового пересечения со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком) / Д. Д. Сильченков, Ю. А. Сильченкова, Г. С. Закожурникова, С. С. Закожурников // Architecture and Engineering. - 2021. - Vol. 6, issue 3. - С. 70-76. - DOI: 10.23968/2500-0055-2021-6-3-70-76.

12 Aimsun Micro / Meso 6. Руководство пользователя – Текст : электронный // TTS – Transport Simulation System, 2009.– 236 с.

13 ОДМ 218.6.003–2011. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. – Москва : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2011. – 69 с.

14 Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения : учебник для вузов / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – Москва : Академкнига, 2005. – 279 с.

References

1 Federal Target Programme "Improving Road Safety in 2006 - 2012" [Electronic re-source] : Approved by the Resolution of the Government of the Russian Federation dated 20.02.2006 y. № 100. – Information-legal reference book Garant. Access mode: <http://base.garant.ru/189189/>.

2 Federal Target Programme "Improving Road Safety in 2013-2020" [Electronic resource] : Approved by the Resolution of the Government of the Russian Federation dated 3.10.2013 y. № 864. – Information-legal reference book Garant. Access mode: <http://base.garant.ru/70467076/>.

3 Strategy of road safety in the Russian Federation for 2018 - 2024 years [Electronic re-source] : approved by the order of the Government of the Russian Federation from 8.01.2018 № 1-r. - Information-legal directory Garant. Access mode: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71760528/>.

4 On national goals and strategic objectives of development of the Russian Federation for the period up to 2024 [Electronic resource] :Decree of the President of the Russian Federation from 7.05.2018 № 204. - Information-legal directory Garant. Mode of Access: <http://www.garant.ru/hot-law/federal/1195467/#ixzz6kAOeEs3U>.

5 On the organisation of road traffic in the Russian Federation and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation [Electronic resource] : from 29.12.2017 FZ № 443-FZ. - Information-legal directory Garant. Mode of Access: <https://base.garant.ru/71848756/>.

6 ODM 218.2.020-2012. Methodological recommendations for assessing the capacity of motorways. - Moscow : Federal Road Agency (Rosavtodor), 2013. - 144 p.

7 Code of rules for the design of geometric elements of motorways and transport intersections. Part 2. Code of rules for the design of geometric elements of transport intersections of motorways. - Moscow : Federal Road Agency (Rosavtodor), 2012. - 212 p.

8 Lagemann A. Vorrang für Busse und Straßenbahnen an Kreisverkehren, vom Fachbereich Architektur. Raum- und Umweltplanung // Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern zur Verleihung des akademischen Grades Dr.-Ing. genehmigte Dissertation. 2004. 222 p.

9 Determination of the conditions of effective application of the roundabout with traffic light regulation and cut-through central island / D.D. Silchenkov, A.V. Lemeshkin, V.S. Metlev, V.V. Ulyanovsky // Construction and Road Machines. Ulyanovsky // Stroitel'nye i rozhnye mashiny [Construction and Road Machines. - 2020. - № 2. - P. 29-33.

10 Investigation of the traffic delays at the roundabout with the traffic light regulation and a cut-through central island / D.D. Silchenkov, A.V. Lemeshkin, Yu.Y. Komarov, V.S. Metlev // Stroitel'nye i rozhnye mashiny [Construction and Road Machines. - 2020. - № 4. - P. 27-30.

11 Adaptation of the Traffic Signal Control Design Method to a Hamburger Roundabout / D.D. Silchenkov, Yu.A. Silchenkova, G.S. Zakozhurnikova, S.S. Zakozhurnikov // Architecture and Engineering. - 2021. - Vol. 6, issue 3. - P. 70-76. - DOI: 10.23968/2500-0055-2021-6-3-70-76.

12 Aimsun Micro / Meso 6. User manual - Text : electronic // TTS - Transport Simulation System, 2009.- 236 p.

13 ODM 218.6.003-2011. Methodical recommendations on design of traffic light objects on motorways. - Moscow : Federal Road Agency (Rosavtodor), 2011. - 69 p.

14 Kremenets, Yu.A. Technical means of road traffic organisation : textbook for universities / Yu.A. Kremenets, M.P. Pecherskiy, M.B. Afanasyev. - Moscow : Akademkniga, 2005. - 279 p.

© Комаров Ю.Я., Ганзин С.В., Сильченков Д.Д., Зеликова Н.В., 2024

DOI: [10.34220/2311-8873-2024-111-122](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2024-111-122)



УДК 629.33.027.5

UDC 629.33.027.5

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СХОЖДЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЁС АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ

THE METHOD OF AUTOMATIC ADJUSTMENT OF THE CONVERGENCE OF THE CONTROLLED WHEELS A MOTOR VEHICLE IN MOTION

✉¹ **Рассоха Владимир Иванович**,
д.т.н., доцент, декан транспортного факультета,
Оренбургский государственный университет,
г. Оренбург, e-mail: cabin2012@yandex.ru

✉¹ **Rassokha Vladimir Ivanovich**,
doctor of technical sciences, associate professor, dean
of the faculty of transport, Orenburg state university,
Orenburg, e-mail: cabin2012@yandex.ru

Аннотация. Цель: автоматическое обеспечение параллельности плоскостей вращения управляемых колёс автотранспортного средства в процессе движения при различных режимах и условиях, что способствует минимальному износу шин, снижению сопротивления движению и расходу топлива. Основная идея: в системе управления схождением управляемых колёс регулирующие воздействие отключают до достижения оптимального значения схождения на промежуток времени (или угол поворота) инерционного дорегулирования, зависящий от режима и условий движения автотранспортного средства. Результаты: определены зависимости основных параметров (время или угол поворота) фазы инерционного дорегулирования для следующих режимов движения автотранспортного средства: равномерное движение, разгон, движение на подъёме, торможение, движение накатом. Полученные зависимости имеют научную новизну и практическую значимость для реализации автоматического регулирования схождения управляемых колёс автотранспортного средства в процессе движения.

Annotation. Purpose: automatic maintenance of the parallelism of the planes of rotation of the controlled wheels of the vehicle during movement under various modes and conditions, which contributes to minimal tire wear, reduced resistance to movement and fuel consumption. The main idea: in the control system for the convergence of the steering wheels, the regulating effect is turned off until the optimal convergence value is reached for the time interval (or angle of rotation) of the inertial adjustment, depending on the mode and driving conditions of the vehicle. Results: the dependences of the main parameters (time or angle of rotation) of the inertial control phase for the following modes of movement of the vehicle are determined: uniform movement, acceleration, movement on the rise, braking, rolling motion. The obtained dependences have scientific novelty and practical significance for the implementation of automatic control of the convergence of the controlled wheels of a motor vehicle in the process of movement.

Ключевые слова: АВТОТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО, СХОЖДЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЕС, СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ, ИНЕРЦИОННОСТЬ, РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ, РАЗГОН, ДВИЖЕНИЕ НА ПОДЪЕМЕ, ТОРМОЖЕНИЕ, ДВИЖЕНИЕ НАКАТОМ.

Keywords: MOTOR VEHICLE, CONVERGENCE OF CONTROLLED WHEELS, CONTROL SYSTEM, INERTIA, UNIFORM MOTION, ACCELERATION, MOVEMENT ON THE RISE, BRAKING, ROLLING MOTION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Обеспечение непрерывного контроля и регулирования схождения управляемых колёс автотранспортных средств в процессе их движения является необходимым, а зачастую и достаточным условием [1-7]:

- совершенствования ряда эксплуатационных свойств автотранспортного средства, таких, как устойчивость, управляемость и топливная экономичность;
- снижения износа шин и сопутствующих ему образования шинной пыли и выброса канцерогенных веществ в окружающую среду.

Однако обеспечение параллельности плоскостей вращения управляемых колёс автотранспортного средства в процессе движения при различных режимах и условиях представляет собой сложную задачу, в настоящее время не решённую.

Теоретическому и практическому решению указанной задачи посвящены публикации научной школы В. И. Рязанцева [6, 7-11], а также ряд патентов на изобретения. Результаты анализа предлагаемых решений, а именно – недостатки, препятствующие их использованию на практике, сведены в табл. 1.

Попытками устранения указанных в табл. 1 недостатков можно считать способ и два устройства автоматической установки схождения управляемых колёс в процессе движения, предложенные с участием автора [12-14].

Способ [12] заключается в том, что в процессе движения автотранспортного средства:

- непрерывно измеряют и сравнивают с помощью электрического моста между собой боковые силы, действующие на каждое из управляемых колёс автотранспортного средства;
- дисбаланс моста вызывает подачу напряжения на катушку привода управляющего устройства;
- реверсивный механизм изменения рабочей длины поперечной рулевой тяги устраняет дисбаланс;
- привод, воздействующий на золотник распределительного устройства, включают импульсно, причём продолжительность включения составляет от 0,1 до 0,5 с, а паузы – от 0,5 до 1,5 с и зависит от величины дисбаланса и скорости движения автотранспортного средства;
- после каждого включения золотник распределительного устройства возвращается в среднее положение.

Для реализации способа необходимо, чтобы сердечник электромагнитной катушки (привод золотника распределительного устройства рабочей жидкости) возвращался в центральное положение. Для обеспечения этого условия были предложены два варианта реализации системы.

В первом из вариантов [13] сердечник электромагнитной катушки и золотник распределительного устройства рабочей жидкости соединены через упругий элемент в виде конусообразно закрепленной пластины, обеспечивающей возвращение золотника в центральное (нейтральное) положение.

Во втором варианте [14] управляющее устройство содержит две электромагнитные катушки, одна из которых предназначена для перемещения золотника распределительного

устройства рабочей жидкости и, следовательно, изменения рабочей длины поперечной рулевой тяги; а другая – для возвращения золотника в центральное (нейтральное) положение.

Таблица 1 – Результаты патентного поиска по проблеме

№ п/п	Реквизиты охранного документа	Авторы	Название	Недостатки
1	Patent US 3498630, 1970	Crawford С.А.	Automatic wheel alignment mechanism for automotive vehicles [8]	Возможность выработки датчиками вследствие износов и деформаций элемента конструкции, сигналов с ошибкой, в результате чего система будет поддерживать неправильное схождение управляемых колёс; устройство не обеспечивает схождение управляемых колёс при движении транспортного средства на повороте.
2	Авторское свидетельство 905692 СССР, 1982	Рязанцев В.И., Жуков А.М.	Устройство для автоматического регулирования схождения управляемых колёс транспортного средства [9]	Не обеспечивается создание на каждом управляемом колесе автотранспортного средства максимальной суммарной боковой реакции, препятствующей отклонению направления движения от заданного из-за воздействия внешних боковых сил, например, при движении на косогоре, повороте и т.д.
3	Авторское свидетельство 1107028 СССР, 1984	Рязанцев В.И., Жуков А.М.	Способ установки оптимального угла схождения управляемых колёс транспортного средства [10]	Низкая эксплуатационная надёжность системы управления, вызванная использованием реле с подвижными и неподвижными контактами и наличием втулок, установленных с возможностью их осевого перемещения вдоль цапфы управляемого колеса автотранспортного средства.
4	Авторское свидетельство 746242 СССР, 1980	Морозов М.В., Жирнов А.А., Судак Ф.М.	Способ установки схождения управляемых колёс транспортного средства [11]	Не учитывает инерционность системы регулирования, вследствие чего после достижения оптимального схождения управляемых колёс и прекращения процесса регулирования управляемые колёса будут продолжать некоторое время поворачиваться, что потребует нового цикла работы системы по устранению возникшего в результате перерегулирования обратного отклонения схождения, и т. д., что снижает эффективность регулирования схождения управляемых колёс в процессе движения.

Недостатком предложенных способа и устройств [12-14] является то, что заявляемая зависимость продолжительности включения привода, воздействующего на золотник распределительного устройства (от 0,1 до 0,5 с), и паузы между включениями (от 0,5 до 1,5 с) от величины дисбаланса и скорости движения автотранспортного средства не подтверждается расчётами. В результате, вследствие отсутствия учёта условий и режимов движения автотранспортного средства и инерционности системы регулирования, возможны недорегулирование или перерегулирование схождения управляемых колёс, что снижает эффективность его регулирования в процессе движения.

<p>Уравнение силовых факторов, действующих на управляемое колесо автотранспортного средства</p>	<p>а) В силовой фазе восстановления правильного схождения управляемых колёс:</p> $M_x + M_u - M_p = 0;$ $M_x = X a = Z_k f a;$ $Z_k = (0,5 G_l + G_k) m_{p1};$ $f = f_0 (1 + V^2 / 20000);$ $M_u = I_k \varepsilon_1;$ $I_k = m_k a^2;$ $M_p = P b;$ $P = p \pi d_u^2 / 4;$ $X a + m_k a^2 \varepsilon_1 - P b = 0.$ <p>б) В инерционной фазе восстановления правильного схождения управляемых колёс:</p> $M_x - M_u = 0;$ $X a - m_k a^2 \varepsilon_2 = 0.$
<p>Зависимости угловых скорости и ускорения управляемого колеса с осью в сборе относительно центра поворота колеса</p>	<p>а) В силовой фазе восстановления правильного схождения управляемых колёс:</p> $\varepsilon_1 = (P b - X a) / m_k a^2;$ $\delta_p = \varepsilon_1 t_p^2 / 2;$ $d\delta_p / dt = 2 \varepsilon_1 t_p / 2;$ $t_1 = \omega_o / \varepsilon_1;$ $\delta_p = \omega_o^2 / 2 \varepsilon_1.$ <p>б) В инерционной фазе восстановления правильного схождения управляемых колёс:</p> $\varepsilon_2 = X / m_k a;$ $\omega = \omega_o - \varepsilon_2 t_u;$ $t_u = \omega_o / \varepsilon_2;$ $\delta_u = \omega_o^2 / 2 \varepsilon_2;$ $\delta = \delta_p + \delta_u = (\omega_o^2 / 2 \varepsilon_1) + (\omega_o^2 / 2 \varepsilon_2);$ $\omega_o = \{2 \delta X (P b - X a) / P b m_k a\}^{1/2}.$
<p>Итоговые зависимости для определения параметров фаз силового восстановления и инерционного дорегулирования</p>	$t_p = \{\delta G_o m_p f m_k a^3 / P b (P b - 0,5 G_o m_p f a)\}^{1/2};$ $t_u = \{2 \delta m_k a (P b - P_f a) / P b P_f\}^{1/2};$ $\delta_p = \delta G_o m_p f a / 2 P b;$ $\delta_u = \delta (P b - P_f a) / P b.$

Обозначения	<p> M_u – инерционный момент управляемых колёс; $M_{ст}$ – стабилизирующий момент; M_x – момент, создаваемый касательной реакцией дороги на управляемое колесо; M_p – момент от усилия в гидроцилиндре поперечной рулевой тяги; P – усилие, создаваемое исполнительным механизмом в поперечной рулевой тяге; p – давление рабочей жидкости в системе; d_u – рабочий диаметр гидроцилиндра исполнительного механизма; Z_k – нормальная реакция дороги на колесо; X – касательная реакция дороги на управляемое колесо; Y – боковая реакция дороги на управляемое колесо; R – суммарная реакция дороги на колесо, действующая в плоскости дороги; G_1 – вес автотранспортного средства, приходящийся на управляемую ось; G_k – вес управляемого колеса в сборе с осью; m_k – масса управляемого колеса в сборе с осью; f – коэффициент сопротивления качению; f_0 – коэффициент, зависящий от дорожного покрытия; I_k – момент инерции управляемого колеса с осью в сборе; a – расстояние от центра поворота до средней плоскости управляемых колёс; b – расстояние от оси поперечной тяги до центра поворота управляемых колёс с осью; O_1 – центр поворота управляемого колеса; ω_0 – угловая скорость управляемого колеса с осью относительно O_1 в момент окончания силовой и начала инерционной фазы восстановления правильного схождения управляемых колёс; δ – угол отклонения схождения управляемых колёс от оптимального положения; δ_p – угол силового восстановления части отклонения схождения управляемых колёс от оптимального за счёт воздействия исполнительного механизма системы; δ_u – угол инерционного дорегулирования до оптимального схождения управляемых колёс за счёт инерции элементов системы; δ_u' – угол возможного «перерегулирования» схождения управляемых колёс за счёт инерционности элементов системы в случае прекращения воздействия исполнительного механизма в момент достижения оптимального схождения; ε_1 – угловое ускорение управляемых колёс с осью относительно центра поворота O_1 в фазе силового восстановления; ε_2 – угловое ускорение управляемых колёс с осью относительно центра поворота O_1 в фазе инерционного дорегулирования; V – скорость движения автотранспортного средства; t_p – время фазы силового восстановления схождения управляемых колёс за счёт действия исполнительного механизма; t_u – время фазы инерционного дорегулирования, за которое нужно прекратить силовое воздействие исполнительного механизма для восстановления оптимального схождения управляемых колёс. </p>
-------------	--

3 Результаты исследований

В табл. 3 приведены расчётные схемы и итоговые зависимости для определения параметров фазы инерционного дорегулирования для остальных рассмотренных режимов движения автотранспортного средства – разгона, движения на подъёме, торможения, движения накатом.

Зависимость параметров фаз процесса регулирования схождения управляемых колёс от большого количества факторов, определяемых как состоянием самого автотранспортного средства и его системы регулирования, так и условиями и режимами движения (вес автотранспортного средства, приходящийся на управляемую ось при различной загрузке; скорость и ускорение его движения; угол подъёма дороги, тип и состояние дорожного покрытия и т.д.) делает каждый цикл регулирования схождения уникальным, поэтому представление в табл. 2 и 3 числовых значений параметров нецелесообразно.

На основе полученных зависимостей был предложен способ автоматического регулирования схождения управляемых колёс в процессе движения, заключающийся в том, что:

- привод, воздействующий на золотник распределительного устройства, включается управляющим устройством при достижении рассогласования между боковыми силами порогового значения;

- управляющее устройство по показаниям датчиков идентифицирует режим движения автотранспортного средства (равномерное движение, разгон, движение на подъёме, торможение, движение накатом);

- управляющее устройство рассчитывает время регулирующего воздействия, необходимое для обеспечения требуемого схождения управляемых колёс и, в зависимости от режима и условий движения автотранспортного средства, определяет момент времени, в который регулирующее действие необходимо прекратить, чтобы за счёт инерционного дорегулирования обеспечить требуемое схождение управляемых колёс.

Таблица 3 – Итоговые зависимости параметров фазы инерционного дорегулирования для режимов разгона, движения на подъёме, торможения, движения накатом автотранспортного средства

Режим движения автотранспортного средства на подъёме	
Расчётная схема	
Зависимости для определения параметров фазы инерционного дорегулирования	$t_u = \{ 2 \delta [P b \eta_{pm} - a (G_k \sin \alpha - P_f)] / P b [a (G_k \sin \alpha + P_f) + P b (1 - \eta_{pm})] \}^{1/2};$ $\delta_u = \delta [P b \eta_{pm} - a (G_k \sin \alpha - P_f)] / P b.$

Режим разгона автотранспортного средства	
Расчётная схема	
Зависимости для определения параметров фазы инерционного дорегулирования	$t_u = \{2 \delta [P b - a (P_f + m_k j)] (P_f + m_k j) / P b m_k a\}^{1/2};$ $\delta_u = \delta [P b - a (P_f + m_k j)] / P b.$
Режим торможения автотранспортного средства	
Расчётная схема	
Зависимости для определения параметров фазы инерционного дорегулирования	$t_u = \{2 \delta m_k a^2 [P b \eta_{pm} - a (0,5 G_o m_p f + P_f - m_k j)] / P b [a (0,5 G_o m_p f + P_f - m_k j) + P \cdot b \cdot (1 - \eta_{pm})]\}^{1/2};$ $\delta_u = 2 \delta a [P b \eta_{pm} - a (0,5 G_o m_p f + P_f - m_k j)] / P b.$

Режим движения автотранспортного средства накатом	
Расчётная схема	
Зависимости для определения параметров фазы инерционного дорегулирования	$t_u = \{2 \delta (G_k j a - P_f a + P b \eta_{pm}) \cdot m_k \cdot a^2 / P b [P_f a - G_k j a + P b (1 - \eta_{pm})]\}^{1/2},$ $\delta_u = \delta (G_k j a - P_f a + P b \eta_{pm}) / P b.$
Обозначения (кроме символов, расшифрованных в табл. 2)	<p>$M_{тр}$ – момент трения в шкворневом соединении;</p> <p>P_u – сила инерции управляемого колеса с осью и поворотным кулаком в сборе;</p> <p>P_m – тормозная сила на колесе;</p> <p>P_f – касательная реакция дороги на управляемое колесо;</p> <p>$G_{кz}$ – составляющая веса управляемого колеса в сборе, действующая параллельно поверхности дороги;</p> <p>$G_{кп}$ – составляющая веса управляемого колеса в сборе, действующая перпендикулярно поверхности дороги;</p> <p>G_o – вес автотранспортного средства, приходящийся на управляемую ось; $G_o = m g$;</p> <p>m – масса автотранспортного средства, приходящаяся на управляемую ось;</p> <p>g – ускорение свободного падения;</p> <p>α – угол подъёма дороги;</p> <p>r_k – радиус качения управляемых колёс;</p> <p>m_p – коэффициент перераспределения нормальных реакций дороги на управляемое колесо;</p> <p>P_f – сила сопротивления качению, лежащая в плоскости дороги и средней плоскости управляемого колеса, являющаяся касательной реакцией дороги на управляемое колесо $P_f = Z f$, где Z – нормальная реакция дороги на управляемое колесо,</p> <p>$Z = G_o / (m_p \cos \alpha)$;</p> <p>$\eta_{pm}$ – коэффициент, оценивающий потери на трение в шкворневых узлах управляемых колёс;</p> <p>j – ускорение автотранспортного средства.</p>

4 Обсуждение и заключение

Несмотря на то, что зависимости получены с использованием известных математических методов, они явным образом не следуют из уровня знаний специалистов, а поэтому имеют научную новизну и практическую значимость для реализации автоматического регулирования схождения управляемых колёс автотранспортного средства в процессе движения. Предлагаемый способ повышает точность регулирования параллельности плоскостей вращения управляемых колёс при различных режимах и условиях движения автотранспортного средства.

Результаты исследований В. И. Троицкого [15] позволяют оценить эффект от реализации непрерывного регулирования схождения управляемых колёс автотранспортных средств как результат снижения износа шин на 25-33,7 %. Оценка вклада в это снижение непосредственно от применения предлагаемого способа повышения точности регулирования, а также в снижение сопротивления движению автотранспортного средства и расходу им топлива может быть определена при экспериментальных исследованиях.

Список литературы

- 1 Автомобильные шины. Конструкция, механика, свойства, эксплуатация / О.Б. Третьяков [и др.]. – М.: КолосС, Химия, 2007. – 432 с.: ил.
- 2 Рассоха, В. И. Разработка системы для непрерывного регулирования схождения управляемых колёс автотранспортных средств в движении / В.И. Рассоха, Е.В. Бондаренко, В.Т. Исайчев // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2008. – № 2. – С. 138-143.
- 3 Рассоха, В. И. Система активного регулирования схождения: место, задачи и реализации в проблеме ресурсосбережения автомобильных шин / В.И. Рассоха // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 2. – С. 154-160.
- 4 Рассоха, В. И. Повышение срока службы автомобильных шин за счёт регулирования схождения управляемых колёс в процессе движения: монография / В.И. Рассоха, В.Т. Исайчев. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2015. – 202 с.: ил.
- 5 Рассоха, В. И. Совершенствование системы активного регулирования схождения управляемых колёс автотранспортных средств: монография [Электронное издание] / В.И. Рассоха, В.Т. Исайчев. – Оренбург: ОГУ, 2023. – 225 с.: ил.
- 6 Рязанцев, В. И. Активное управление схождением колес автомобиля: монография / В.И. Рязанцев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 212 с.
- 7 Нгуен Чи Конг. Моделирование движения по прямолинейной и криволинейной траекториям автомобиля с активным управлением схождением колёс / Нгуен Чи Конг, В.И. Рязанцев // Известия вузов. Машиностроение. – 2009. – № 1. – С 52-61.
- 8 Patent US 3498630 A [B 62 D 17/00](#). Automatic wheel alignment mechanism for automotive vehicles / [Charles A. Crawford](#). – Declared 06.05.1968; published 03.03.1970. – URL: <https://patents.google.com/patent/US3498630A/en> (дата обращения: 14.11.2023).
- 9 Авторское свидетельство 905692 СССР, МКИ G 01 M 17/06. Устройство для автоматического регулирования схождения управляемых колёс транспортного средства / В.И. Рязанцев, А.М. Жуков. – № 2886317; заявл. 22.02.80; опубл. 15.02.82, Бюл. № 6. – 4 с.: ил.
- 10 Авторское свидетельство 1107028 СССР, МКИ G 01 M 17/06. Способ установки оптимального угла схождения управляемых колёс транспортного средства / В.И. Рязанцев, А.М. Жуков. – № 3554488; заявл. 18.02.83; опубл. 07.08.84, Бюл. № 29. – 5 с.: ил.
- 11 Авторское свидетельство 746242 СССР, МКИ G 01 M 17/06. Способ установки схождения управляемых колёс транспортного средства / М.В. Морозов, А.А. Жирнов, Ф.М. Судак. – № 2614505; заявл. 15.05.78; опубл. 07.07.80, Бюл. № 25. – 3 с.: ил.
- 12 Патент 2333470 РФ, МПК G 01 M 17/06. Способ автоматической установки схождения управляемых колёс в процессе движения / Е.В. Бондаренко, В.А. Бондаренко, В.И.

Рассоха, В.Т. Исайчев, А.С. Килов; заявитель и патентообладатель ОГУ. – № 2006105921; заявл. 26.02.2006; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25. – 3 с.: ил.

13 Патент 2349892 РФ, МПК G 01 M 17/06; B 62 D 17/00. Устройство для автоматической установки схождения управляемых колёс в процессе движения / Е.В. Бондаренко, В.А. Бондаренко, В.И. Рассоха, В.Т. Исайчев, А.С. Килов; заявитель и патентообладатель ОГУ. – № 2007113393; заявл. 10.04.2007; опубл. 20.03.2009. Бюл. № 8. – 3 с.: ил.

14 Патент 2353912 РФ, МПК G 01 M 17/06; B 62 D 17/00. Устройство для автоматической установки схождения управляемых колёс в процессе движения / Е.В. Бондаренко, В.А. Бондаренко, В.И. Рассоха, В.Т. Исайчев, А.С. Килов; заявитель и патентообладатель ОГУ. – № 2007113391; заявл. 10.04.2007; опубл. 27.04.2009. Бюл. № 12. – 3 с.: ил.

15 Троицкий, В. И. Снижение износа шин управляемых колёс обеспечением рационального соотношения углов их поворота при эксплуатации легкового автомобиля в условиях города (на примере автомобиля ГАЗ-24 «Волга»): дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10, 05.05.03 / В.И. Троицкий. – М., 1984. – 200 с.

References

1 Car tires. Design, mechanics, properties, operation / O.B. Tretyakov [et al.]. – М.: KolosS, Chemistry, 2007. – 432 p.: ill.

2 Rassokha, V. I. Development of a system for continuous regulation of the convergence of controlled wheels of motor vehicles in motion / V.I. Rassokha, E.V. Bondarenko, V.T. Isaichev // Bulletin of the Orenburg State University. – 2008. – No. 2. – pp. 138-143.

3 Rassokha, V. I. The system of active convergence regulation: place, tasks and implementation in the problem of resource saving of automobile tires / V.I. Rassokha // Bulletin of the Orenburg State University. – 2009. – No. 2. – pp. 154-160.

4 Rassokha, V. I. Increasing the service life of automobile tires by adjusting the convergence of controlled wheels during movement: monograph / V.I. Rassokha, V.T. Isaichev. Orenburg: IPK Universitet LLC, 2015. – 202 p.: ill.

5 Rassokha, V. I. Improvement of the system of active regulation of the convergence of controlled wheels of motor vehicles: monograph [Electronic edition] / V.I. Rassokha, V.T. Isaichev. – Orenburg: OSU, 2023. – 225 p.: ill.

6 Ryazantsev, V. I. Active control of the convergence of car wheels: monograph / V.I. Ryazantsev. – М.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2007. – 212 p.

7 Nguyen Chi Kong. Modeling of movement along rectilinear and curved trajectories of a car with active wheel convergence control / Nguyen Chi Kong, V.I. Ryazantsev // Izvestiya vuzov. Mechanical engineering. – 2009. – No. 1. – С 52-61.

8 Patent US 3498630 A B 62 D 17/00. Automatic wheel alignment mechanism for automotive vehicles / Charles A. Crawford. – Declared 05/06/1968; published 03/03/1970. – URL: <https://patents.google.com/patent/US3498630A/en> (date of application: 11/14/2023).

9 Copyright certificate 905692 USSR, MKI G 01 M 17/06. A device for automatic control of the convergence of controlled wheels of a vehicle / V.I. Ryazantsev, A.M. Zhukov. – No. 2886317; application. 22.02.80; publ. 15.02.82, Bul. No. 6. – 4 p.: il.

10 Copyright certificate 1107028 USSR, MKI G 01 M 17/06. A method for setting the optimal angle of convergence of the controlled wheels of a vehicle / V.I. Ryazantsev, A.M. Zhukov. – No. 3554488; application No. 18.02.83; publ. 07.08.84, Bul. No. 29. – 5 p.: ill.

11 Copyright certificate 746242 USSR, MCI G 01 M 17/06. Method of installing convergence of controlled wheels of a vehicle / M.V. Morozov, A.A. Zhirnov, F.M. Sudak. – No. 2614505; application 15.05.78; publ. 07.07.80, Bul. No. 25. – 3 p.: il.

12 Patent 2333470 of the Russian Federation, IPC G 01 M 17/06. A method for automatically installing the similarity of controlled wheels during movement / E.V. Bondarenko, V.A. Bondarenko,

V.I. Rassokha, V.T. Isaichev, A.S. Kilov; applicant and patent holder of OSU. – No. 2006105921; application. 02/26/2006; publ. 09/10/2008, Bul. No. 25. – 3 p.: ill.

13 Patent 2349892 RF, IPC G 01 M 17/06; B 62 D 17/00. A device for automatic installation of the convergence of controlled wheels in the process of movement / E.V. Bondarenko, V.A. Bondarenko, V.I. Rassokha, V.T. Isaichev, A.S. Kilov; applicant and patent holder of OSU. – No. 2007113393; application. 04/10/2007; publ. 03/20/2009. Byul. No. 8. – 3 p.: il.

14 Patent 2353912 RF, IPC G 01 M 17/06; B 62 D 17/00. A device for automatic installation of the convergence of controlled wheels in the process of movement / E.V. Bondarenko, V.A. Bondarenko, V.I. Rassokha, V.T. Isaichev, A.S. Kilov; applicant and patent holder of OSU. – No. 2007113391; application. 04/10/2007; publ. 04/27/2009. Byul. No. 12. – 3 p.: il.

15 Troitskiy, V. I. Reduction of tire wear of controlled wheels by ensuring a rational ratio of their turning angles during operation of a passenger car in urban conditions (using the example of a GAZ-24 Volga car) : dis. ... candidate of Technical Sciences : 05.22.10, 05.05.03 / V.I. Troitsky. – M., 1984. – 200 p.

© Раскоха В.И, 2024

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-123-133



УДК 656.13

UDC 656.13

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**АДАПТИВНО-УПРАВЛЯЕМЫЙ
МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ
АППАРАТУРЫ
И ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ
СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

**ADAPTIVE-CONTROLLED METHOD
FOR MONITORING THE TECHNICAL
CONDITION OF FUEL EQUIPMENT
AND CYLINDER-PISTON GROUP
OF A VEHICLE POWER UNIT**

Сафиуллин Равиль Нуруллович,
д.т.н., профессор кафедры ТТП и М, Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург.

Safiullin Ravil Nurulloviсh,
doctor of technical sciences, professor of the department of TTP and M, St. Petersburg mining university, St. Petersburg.

Шаммазов Ильдар Айратович,
д.т.н., профессор кафедры ТХНГ, Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург.

Shammazov Ildar Airatovич,
doctor of technical sciences, professor of the department of THNG, St. Petersburg mining university, St. Petersburg.

Сафиуллин Руслан Равиллович,
к.т.н., доцент кафедры ТТП и М, Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург.

Safiullin Ruslan Ravillovich,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of TTP and M, St. Petersburg mining university, St. Petersburg.

✉¹ **Сорокин Кирилл Владиславович,**
аспирант, Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург, e-mail: kiros_00@bk.ru

✉¹ **Sorokin Kirill Vladislavovич,**
postgraduate student, St. Petersburg mining university, St. Petersburg, e-mail: kiros_00@bk.ru

Мошников Антон Романович,
студент, Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург.

Moshnikov Anton Romanovич,
student, St. Petersburg mining university, St. Petersburg

Аннотация. Проведено теоретическое исследование существующих способов определения технического состояния топливной аппаратуры и давления в цилиндрах силовых установок, разработан алгоритм работы адаптивно-управляемого метода контроля технического состояния топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы силовой установки транспортного средства, который решает задачу синхронизации и контроля за работой топливной аппаратуры, в зависимости от

Annotation. A theoretical study of existing methods for determining the technical condition of fuel equipment and pressure in the cylinders of power plants was carried out, an algorithm was developed for the operation of an adaptive-controlled method for monitoring the technical condition of fuel equipment and the cylinder-piston group of a vehicle power plant, which solves the problem of synchronization and control of the operation of fuel equipment, depending on the pressure in the cylinders of the vehicle power plant. Based on the

давления в цилиндрах силовой установки транспортных средств. На основании адаптивно-управляемого метода контроля технического состояния топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы силовой установки транспортного средства разработано техническое решение – автоматизированная система контроля технического состояния топливной аппаратуры транспортного средства.

Ключевые слова: СИЛОВАЯ УСТАНОВКА, СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ, ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА.

adaptive-controlled method of monitoring the technical condition of the fuel equipment and the cylinder-piston group of the vehicle's power plant, a technical solution has been developed: Automated system for monitoring the technical condition of the vehicle's fuel equipment.

Keywords: POWER PLANT, FUEL EQUIPMENT CONDITION CONTROL SYSTEM, MAINTENANCE, VEHICLES.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Повышение сложности конструкции транспортных средств (ТС) привело к увеличению расхода материалов и материальных средств для поддержания их в работоспособном состоянии. Это привело к созданию и переходу к прогрессивной системе технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), основанной на определении фактического состояния узлов и агрегатов. При этом большая часть автомобильных предприятий продолжают работать по плано-предупредительной системе технического обслуживания и ремонта. Диагностирование в данной системе технического обслуживания производится только при первом и втором техническом обслуживании, а также ремонте. Помимо первого и второго технических обслуживаний, существует ежедневное обслуживание, но оно направлено на оценку общего состояния транспортного средства, а не на определение технического состояния конкретного агрегата. Исходя из этого при использовании данной системы технического обслуживания возрастает вероятность внезапных отказов в связи с отсутствием мониторинга изменения параметров агрегатов. Помимо перехода к прогрессивной системе технического обслуживания и ремонта транспортных средств происходит и развитие различных автоматизированных систем, датчиков, способных оперативно определять техническое состояние систем транспортных средств [1-3].

Одними из основных причин, приводящих к потере работоспособности транспортных средств, являются неисправности в силовой установке, а именно износ цилиндропоршневой группы (ЦПГ). На основе износа цилиндропоршневой группы необходимо корректировать и топливную систему, связанную с подачей топлива и синхронизации работу форсунок во время эксплуатации, так как вследствие данного износа увеличивается нагрузка на топливную систему и возрастает расход топлива из-за невозможности адаптации топливной системы под состояние ЦПГ. Исходя из этого для предотвращения возникновения внезапных отказов необходимо осуществлять постоянный мониторинг давления в цилиндрах двигателя, а также производить оперативный контроль работы форсунок и, при необходимости, синхронизировать их работу на самом транспортном средстве во время эксплуатации [4-6].

2 Материалы и методы

На основе информационного поиска авторами проведен анализ технических решений, применяемых для оценки цилиндропоршневой группы силовой установки и контроля топливной системы транспортных средств (рис. 1).



Рисунок 1 – Технические решения, применяемые для оценки цилиндропоршневой группы силовой установки и контроля топливной системы транспортных средств (составлено авторами)

Технические решения по определению состояния ЦПГ:

1 При помощи компрессионного тестера. Данный способ заключается в установке компрессионного тестера в отверстие под свечу зажигания, после чего при помощи стартера прокручивается двигатель и регистрируется компрессия в каждом цилиндре двигателя. После чего происходит сравнение полученных показаний с номинальными значениями, указанными заводом-изготовителем.

2 Осмотр свечей зажигания. Последовательное наблюдение за состоянием свечей зажигания дает представление о состоянии давления в цилиндрах двигателя. Обильные слои нагара на свечах могут свидетельствовать о сгоревшем масле или топливе, что может указывать на проблемы в цилиндрах двигателя.

3 Использование датчика давления масла. Данный способ позволяет косвенно, на основании данных с датчика давления масла, определить давление в цилиндрах двигателя. На холостом ходу двигателя измеряется наличие давления масла, а также стабильность показаний датчика. Низкое или нестабильное давление масла может указывать на проблемы с давлением в цилиндрах двигателя. Данный способ очень неточный, поскольку давление масла зависит не только от давления в цилиндрах двигателя, но и от состояния масляного насоса, а также вязкости используемого масла в двигателе [7-9].

Технические решения по определению состояния топливной аппаратуры:

1 Визуальный осмотр: данный способ подразумевает проверку видимых повреждений, например, проверку на наличие трещин, утечек.

2 Использование специальных манометров: использование данного способа подразумевает установку специального манометра на форсунку и измерение давления топлива. Суть

данного метода заключается в определении давления топлива на высоких оборотах силовой установки и сравнение их с требованиями производителей.

3 Проведение процедуры балансировки форсунок. В ходе данного метода производится демонтаж форсунок, после чего при помощи прибора, например, М-108, производится сравнение рабочих характеристик каждой форсунки, на основании чего происходит выявление неоднородности в работе форсунок.

Данные технические решения не позволяют производить мониторинг и оперативный контроль состояния топливной аппаратуры и давления в цилиндрах силовой установки транспортных средств вследствие недостатков: сложность их реализации, большие трудозатраты, связанные с разбором узлов и агрегатов. Также существенным недостатком предложенных способов является невозможность корректировки топливной аппаратуры во время эксплуатации ТС в зависимости от изменения состояния цилиндропоршневой группы.

3 Результаты исследований

Для реализации системы ТО и Р транспортных средств по фактическому состоянию был разработан адаптивно-управляемый метод контроля технического состояния топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы силовой установки транспортного средства, основывающийся на показаниях разности давления топлива и давления впрыска топлива, позволяющий адаптировать работу форсунок и определять состояние силовой установки во время эксплуатации ТС. Основная задача адаптивно-управляемой системы – способность корректировать цикловой впрыск топлива и производить постоянную диагностику состояния цилиндропоршневой группы и форсунок, исходя из информации о давлении топлива, полученной и обработанной непосредственно на самом транспортном средстве [10-12].

Адаптивно-управляемый метод контроля технического состояния топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы силовой установки транспортного средства основывается на показаниях, получаемых с внедренного датчика дифференциального давления [7]. Датчик показывает разницу давления топлива в 2-х узлах транспортного средства: в камере распылителя топливной форсунки и в топливной рампе. Первичное давление топлива, создаваемое топливным насосом, соответствует давлению в топливной рампе F_T , давление в камере распылителя топливной форсунки обозначается F_ϕ . Для реализации данного метода необходимо получить давление F_K , создаваемое в камере сгорания. Для нахождения давления F_K необходимо, чтобы разница давления топлива в камере распылителя форсунки и в топливной рампе была равна давлению в камере сгорания [13-15]. Для нахождения F_K был разработан следующий алгоритм (рис. 2):

При применении алгоритма используются следующие расчеты:

Давление в камере распылителя топливной форсунки будет определяться давлениями F_T и F_K . Во время открытия форсунки поршень будет создавать противодействие (давление F_K) к давлению F_T . Соответственно:

$$F_\phi = F_T - F_K. \quad (1)$$

Датчик дифференциального давления представляет собой диафрагму, по разные стороны которой на нее действуют давления топлива F_ϕ и F_T . Пусть значение давления на выходе датчика дифференциального давления $F_{кд}$. В итоге получим:

$$F_{кд} = F_T - F_\phi = F_T - (F_T - F_K) = F_T - F_T + F_K = F_K. \quad (2)$$

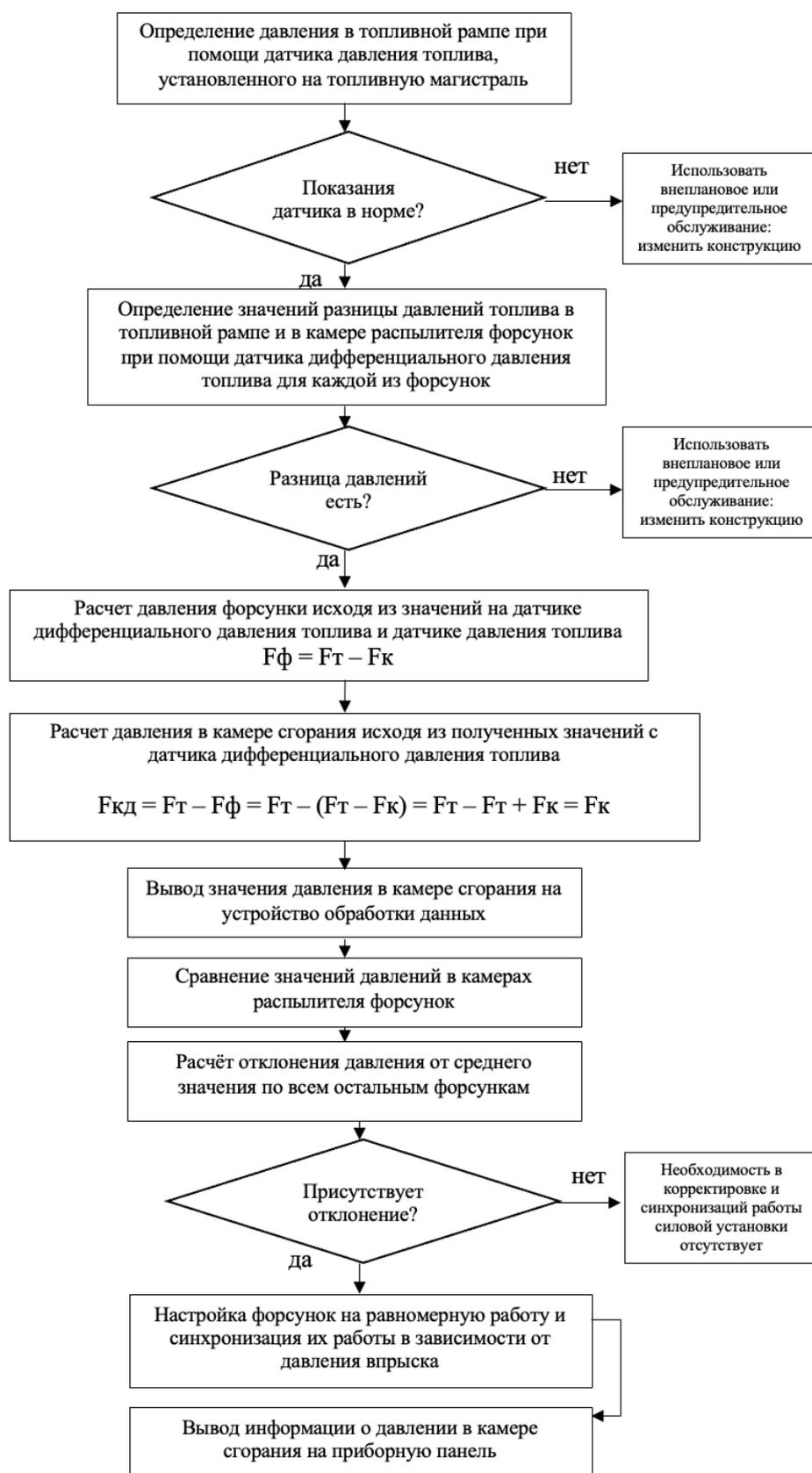
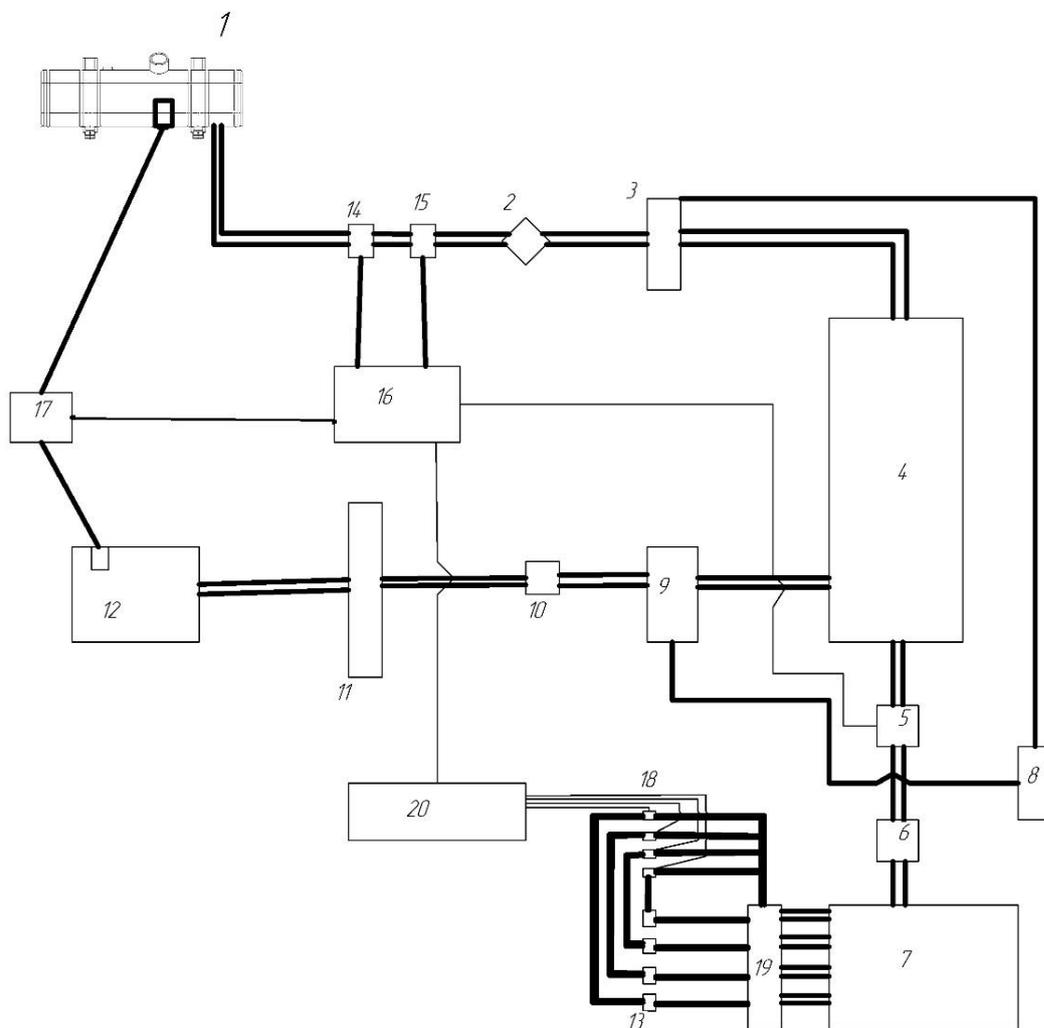


Рисунок 2 – Алгоритм работы адаптивно управляемого метода контроля технического состояния топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы силовой установки транспортного средства (составлено авторами)

Исходя из этого необходимое давление получено при помощи датчика дифференциального давления, поэтому отсутствует необходимость в проведении расчетов давления контроллером, так как на его вход уже приходит значение равное F_k . А основная роль контроллера заключается в сборе данных и последующем сравнении полученных значений с номинальными [16-18]. Схема патента на изобретение, основанного на данном методе, изображена на рис. 3.



1 – емкость с дизельным топливом; 2 – водный фильтр; 3 – топливный электромагнитный клапан; 4 – диспергирующее устройство ротационного типа; 5 – датчик определения процентного содержания присадки в топливе; 6 – фильтр тонкой очистки; 7 – топливный насос высокого давления; 8 – автоматическое регулировочное устройство; 9 – электромагнитный клапан; 10 – фильтр грубой очистки; 11 – топливо-подкачивающий насос; 12 – емкость с присадкой; 13 – форсунки; 14 – датчик контроля качества топлива; 15 – датчик температуры топлива; 16 – электронный блок оценки; 17 – датчик уровня топлива; 18 – датчик дифференциального давления топлива; 19 – топливный тракт; 20 – блок обработки измерений

Рисунок 3 – Автоматизированная система контроля технического состояния топливной аппаратуры транспортного средства (составлено авторами)

Автоматизированная система контроля технического состояния топливной аппаратуры транспортного средства отличается от прототипа тем, что для контроля технического состояния

силовой установки добавлены следующие элементы: топливная рампа, топливные форсунки, датчики дифференциального давления топлива, контроллер (блок обработки измерений).

Необходимое значение давления в камере сгорания создается в момент нахождения поршня в верхней мертвой точке, поэтому значения давления в любой другой момент работы двигателя не несут ценности. Для получения корректных данных о давлении в камере сгорания необходимо отсеять из множества значений только одно – значение давления в момент, когда поршень находится в ВМТ. Данная операция производится в контроллере системы. Отсеивание происходит при помощи данных, получаемых от модуля зажигания и датчика положения коленвала для бензиновых двигателей и датчика положения коленвала для дизельных двигателей [19-21].

Основной задачей является пропуск через контроллер системы значения давления, полученного в момент нахождения поршня в ВМТ, остальные данные опустить. Контроллер пропускает информацию о давлении в камере сгорания только во время циклов впрыска и сжатия топлива. На контроллер приходит информация о положении коленвала в данный момент, следовательно, в момент подхода поршня к точке ВМТ значение, полученное с датчика дифференциального давления, запоминается в контроллере как начальная точка измерения давления. Конечную точку необходимо рассчитать в контроллере, так как подача искры происходит раньше, чем поршень дойдет до ВМТ. Возможно создание 2-х вариантов систем. Первый вариант – время задержки после подачи искры берется с небольшим запасом, чтобы окончание замеров происходило после прохождения поршнем ВМТ. Контроллер отбирает максимальное значение в промежутке между начальной и конечной точкой замеров. Второй вариант – необходимо рассчитать момент, когда поршень будет находиться в ВМТ и контроллер будет пропускать последнее полученное значение. Первый вариант предпочтителен для бензиновых, так как является более простой системой. Для дизельных двигателей ввиду отсутствия системы зажигания, возможно использование только второго варианта. В итоге, полученное в контроллере значение подается на электронный блок управления силовой установкой, которая делает вывод о её техническом состоянии [22].

Данная система также применена для диагностики топливной системы, в частности форсунок. Так как для каждой форсунки используется отдельный датчик дифференциального давления, то рассматривается давление топлива в камере распылителя отдельной форсунки, относительно остальных форсунок. При сильном отклонении значения, снятого на одном из датчиков, можно судить о неисправности форсунки. В случае если отклонение небольшое, возможно регулировать время подачи топлива или давление топлива, создаваемое топливным насосом. При регулировке времени подачи топлива, необходимо знать о давлении в камере распылителя форсунки. Для получения этого давления нужно использовать значения разности давления топлива в камере распылителя форсунки и топливной рампе, а также давление в топливном тракте (равное давлению в топливной рампе), полученное с датчика давления топлива:

$$F_{\phi} = F_T - F_{\text{кд}}. \quad (3)$$

Если значение давления в камере распылителя форсунки будет отличаться в большую сторону от остальных форсунок, то необходимо уменьшить время подачи топлива. Если же давления будут отличаться в меньшую сторону, то противодействие, создаваемое поршнем меньше. Поэтому необходимо увеличить объём подаваемого топлива форсункой (время подачи топлива) [22].

Вторым возможным вариантом будет регулировка давления топливным насосом. При отклонении значения давления топлива в камере распылителя форсунки, в момент ее работы, возможно изменение давления, создаваемого топливным насосом. Однако этот вариант имеет минусы – система является более сложной, так как в нее добавляется дополнительный элемент; при одновременной работе форсунок разных цилиндров, будет изменяться давление во всех одновременно работающих форсунках.

Апробация данного технического решения, в основе которого лежит адаптивно-управляемый метод контроля технического состояния топливной аппаратуры и цилиндропоршневой

группы силовой установки транспортного средства возможна при установке на реальную силовую установку датчика дифференциального давления топлива, который способен определять разницу давлений в каждой форсунке и топливной рампе. Это позволит определять техническое состояние силовой установки в режиме реального времени, а также снизить, предположительно на 10 %, годовой объём работ по техническому обслуживанию, включающий в себя работы по ТО-1, ТО-2, СО, ЕО:

$$T_{\text{ТО}} = K_{\text{год}} \cdot \left(\frac{t_{\text{ТО-1}}}{L_{\text{ТО-1}}} + \frac{t_{\text{ТО-2}} - t_{\text{ТО-1}}}{L_{\text{ТО-2}}} \right) + D_{\text{к}} \cdot \alpha_{\text{т}} \cdot t_{\text{ЕО}} + 2 \cdot t_{\text{СО}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{ТО-1}}$, $t_{\text{ТО-2}}$, $t_{\text{ЕО}}$, $t_{\text{СО}}$ – трудоемкости ТО-1, ТО-2, ЕО, СО, чел.ч; $L_{\text{ТО-1}}$, $L_{\text{ТО-2}}$ периодичность ТО-1 и ТО-2 соответственно, км; $K_{\text{год}}$ – годовой пробег, км; $D_{\text{к}}$ – число календарных рабочих дней в году, $\alpha_{\text{т}}$ – коэффициент технической готовности.

4 Обсуждение и заключение

В ходе проведенного исследования были проанализированы способы по оценке технического состояния давления в цилиндрах силовой установки и контролю топливной аппаратуры силовых установок. На основании проведенных существующих способов по контролю технического состояния силовой установки был разработан алгоритм адаптивно-управляемого метода контроля технического состояния топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы силовой установки транспортного средства, который позволит:

- улучшить смесеобразование в цилиндрах двигателя;
- производить корректировку цикловой подачи топлива в силовую установку;
- производить диагностику топливной аппаратуры силовой установки;
- определять давление в цилиндрах силовой установки.

Разработанный метод лёг в основу предлагаемого технического решения – автоматизированной системы контроля технического состояния топливной аппаратуры транспортного средства, позволяющей производить оперативный контроль силовой установки транспортных средств. Разработанные теоретические и практические положения позволят повысить надежность и прогнозировать отказы транспортного средства, а также существенно снизить трудоемкость и время нахождения в простое транспортного средства.

Список литературы

- 1 Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
- 2 Гэри, М. Вычислительные машины и трудно решаемые задачи. Монография / М. Гэри, Д. Джонсон – М.: Мир, 1982. – 420 с.
- 3 Кондратьев, А. А. Барьеры внедренческих процессов ИТС // Сборник трудов Международной академии транспорта. – 2014. – № 17 – С. 89-95.
- 4 Сафиуллин Р. Н., Сафиуллин Р. Р., Ефремова В. А. Метод комплексной оценки бортовых информационно-управляющих систем на горных машинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 49–63. DOI: 10.25018/0236/1493/2023/91049.
- 5 Николаев, В. И. Системотехника: методы и приложения / В. И. Николаев, В. М. Брук. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
- 6 Подиновский, В. В. Оптимизация по последовательно применяемым критериям / В. В. Подиновский, В. М. Гаврилов. – М.: Советское радио, 1975. – 192 с.
- 7 Патент № 2559299 С2 Российская Федерация, МПК G01L 9/00, G01D 3/028. датчик дифференциального давления: № 2013157288/28 : заявл. 24.12.2013 : опубл. 10.08.2015 /

Ю. Н. Тиняков, К. А. Андреев, Т. А. Цивинская, Д. В. Гусляев ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – EDN ZADIRD.

8 Борисов, С. В., Колтунова Е. А., Кладиев С. Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 1–8. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.12.

9 Бузмаков С. А., Санников П. Ю., Кучин Л. С., Игошева Е. А., Абдулманова И. Ф. Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения // Записки Горного института. – 2023. – Т. 260. – С. 180-193. DOI: 10.31897/PMI.2023.22.

10 Назарычев А. Н., Дяченко Г. В., Сычев Ю. А. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 363-373.

11 Курганов В. М., Грязнов М. В., Колобанов С. В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 10. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10

12 Козярук А. Е., Камышьян А. М. Повышение энергетической эффективности электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала // Записки Горного института. – 2019. – Т. 239. – С. 576. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.576.

13 Бааке Э., Шпенст В. А. Последние научные исследования по электротермическим металлургическим процессам // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 660-668. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.660.

14 Махараткин П. Н., Абдулаев Э. К., Вишняков Г. Ю., Ботян Е. Ю., Пушкарев А. Е. Повышение эффективности функционирования карьерных автосамосвалов на основе обоснования их рациональной скорости с помощью имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6(2). – С. 237-250. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.

15 Комаров, В. В. Интеллектуальные задачи телематических транспортных систем и интеллектуальная транспортная система / В. В. Комаров, С. А. Гараган // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6, № 4. – С. 34-38. – EDN PWPAPZ.

16 Сафиуллин, Р. Н. Методы внедрения систем удалённого диагностирования пассажирского транспорта в городских агломерациях / Р. Н. Сафиуллин, Р. Р. Сафиуллин, К. В. Сорокин // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2023. – № 4(66). – С. 18-24. – EDN FXOCET.

17 Афанасьев А. С., Евстафьев П. В., Сигин Д. В. Анализ разработок в сфере удаленного диагностирования на автомобильном транспорте // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №4(34), ISSN 2007-5687. – СПб.: ГУАП., 2022 – с. 103-108. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-103-108.

18 Won S. H., Haas F. M., Dooley S., Edwards T., & Dryer F. L. (2017). Reconstruction of chemical structure of real fuel by surrogate formulation based upon combustion property targets. *Combustion and Flame*, 183, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.04.032>.

19 Yu L., Zhao C., Liu S., & Di M. (2013). Alkane Influence of Combustion Products in Polyethylene and Gasoline. *Procedia Engineering*, 52, 566–570. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.186>.

20 Ramavath S., & Suryawanshi S. R. (2024). Optimal Prediction of Shear Properties in Beam-Column Joints Using Machine Learning Approach. *International Journal of Engineering*, 37(1), 67-82. doi: 10.5829/ije.2024.37.01a.07.

21 Ghaderi F., Toloei A., & Ghasemi R. (2024). Formation Control and Obstacle Avoidance of a Multi-Quadrotor System Based on Model Predictive Control and Improved Artificial Potential Field. *International Journal of Engineering*, 37(1), 115-126. doi: 10.5829/ije.2024.37.01a.11.

22 Патент РФ № 2792386, 24.01.2023. Сафиуллин Р.Н., Сафиуллин Р.Р., Унгефук А.А., Сорокин К.В., Тянь Хаотянь Автоматизированная система удаленной диагностики технического состояния транспортных средств на основе матричного QR-кода. 2023. Бюл. № 9.

23 Gaile A.A.; Vereshchagin A.V.; Klement'ev V.N. Refining of diesel and ship fuels by extraction and combined methods. Part 1. Use of ionic liquids as extractants. Russ. J. Appl. Chem. 2019,92, 453–475. DOI:10.1134/S1070427219040013.

24 Gaile A.A.; Vereshchagin A.V.; Klement'ev V.N. Refining of diesel and ship fuels by extraction and combined methods. Part 2. Use of organic solvents as extractants. Russ. J. Appl. Chem. 2019,92, 583–595. DOI:10.1134/S107042721905001X.

25 Povarov V., & Efimov I. (2023). Use of the UNIFAC model in the calculation of physicochemical properties of ecotoxicants for technological and ecoanalytical purposes. Journal of Mining Institute, 260, 238–247. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.41>.

References

1 Bundy, B. Optimization methods. Introductory course: Per. from English / B. Bundy. – M.: Radio and 1. Bandi B. Optimization methods. Introductory course: Per. from English / B. Bundy

2 Gary, M. Computers and difficult problems. Monograph / M. Gary, D. Johnson - M.: Mir, 1982. - 420 p.

3 Kondratyev, A. A. Barriers to ITS implementation processes // Collection of proceedings of the International Academy of Transport. – 2014. – No. 17 – P. 89-95.

4 Safiullin R. N., Safiullin R. R., Efremova V. A. Method for a comprehensive assessment of on-board information and control systems on mining machines // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2023. – No. 9-1. – pp. 49–63. DOI: 10.25018/0236/1493/2023/91049.

5 Nikolaev, V. I. Systems engineering: methods and applications / V. I. Nikolaev, V. M. Bruk. – L.: Mechanical Engineering, 1985. – 199 p.

6 Podinovsky, V.V. Optimization according to consistently applied criteria / V.V. Podinovsky, V.M. Gavrilov. – M.: Soviet radio, 1975. – 192 p.

7 Patent No. 2559299 C2 Russian Federation, IPC G01L 9/00, G01D 3/028. differential pressure sensor: No. 2013157288/28: appl. 12/24/2013: publ. 08/10/2015 / Yu. N. Tinyakov, K. A. Andreev, T. A. Tsvinskaya, D. V. Guslyayev; The applicant is the Russian Federation, on behalf of which the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation acts. – EDN ZADIRD.

8 Borisov, S. V., Koltunova E. A., Kladiev S. N. Improving the structure of the simulation model of the traction asynchronous electric drive of a mine electric locomotive // Notes of the Mining Institute. - 2021. - T. 247. - pp. 1–8. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.12.

9 Buzmakov S. A., Sannikov P. Yu., Kuchin L. S., Igosheva E. A., Abdulmanova I. F. Application of unmanned aerial photography for diagnosing technogenic transformation of the natural environment during the exploitation of an oil field // Notes of the Mining Institute. – 2023. – T. 260. – P. 180-193. DOI: 10.31897/PMI.2023.22.

10 Nazarychev A. N., Dyachenok G. V., Sychev Yu. A. Study of the reliability of the traction electric drive of mining dump trucks based on the analysis of failures of its functional units // Notes of the Mining Institute. – 2023. – T. 261. – P. 363-373.

11 Kurganov V.M., Gryaznov M.V., Kolobanov S.V. Assessing the reliability of the functioning of excavator-vehicle complexes in a quarry // Notes of the Mining Institute. – 2020. – T. 241. – P. 10. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.

12 Kozyaruk A. E., Kamyshyan A. M. Increasing the energy efficiency of the electromechanical transmission of a mining dump truck // Notes of the Mining Institute. – 2019. – T. 239. – P. 576. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.576.

13 Baake E., Shpenst V.A. Latest scientific research on electrothermal metallurgical processes // Notes of the Mining Institute. – 2019. – T. 240. – P. 660-668. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.

14 Maharatkin P. N., Abdulaev E. K., Vishnyakov G. Yu., Botyan E. Yu., Pushkarev A. E. Increasing the efficiency of the functioning of mining dump trucks based on justification of their rational speed using simulation modeling // Mining Information analytical bulletin. – 2022. – No. 6(2). – pp. 237-250. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.15.

15 Komarov, V.V. Intelligent tasks of telematic transport systems and intelligent transport system / V.V. Komarov, S.A. Garagan // T-Comm: Telecommunications and transport. – 2012. – Т. 6, No. 4. – P. 34-38. – EDN PWPAPZ.

16 Safiullin, R. N. Methods for implementing remote diagnostic systems for passenger transport in urban agglomerations / R. N. Safiullin, R. R. Safiullin, K. V. Sorokin // Technical and technological problems of service. – 2023. – No. 4(66). – P. 18-24. – EDN FXOCET.

17 Afanasyev A. S., Evstafiev P. V., Sigin D. V. Analysis of developments in the field of remote diagnostics in automobile transport // System analysis and logistics: journal: issue No. 4(34), ISSN 2007-5687. – SPb.: GUAP., 2022 – p. 103-108. RSCI. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-103-108.

18 Won, S. H., Haas, F. M., Dooley, S., Edwards, T., & Dryer, F. L. (2017). Reconstruction of chemical structure of real fuel by surrogate formulation based upon combustion property targets. *Combustion and Flame*, 183, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.04.032>.

19 Yu L., Zhao C., Liu S., & Di M. (2013). Alkane Influence of Combustion Products in Polyethylene and Gasoline. *Procedia Engineering*, 52, 566–570. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2013.02.186>.

20 Ramavath, S., & Suryawanshi, S. R. (2024). Optimal Prediction of Shear Properties in Beam-Column Joints Using Machine Learning Approach. *International Journal of Engineering*, 37(1), 67-82. doi: 10.5829/ije.2024.37.01a.07.

21 Ghaderi F., Toloei A., & Ghasemi R. (2024). Formation Control and Obstacle Avoidance of a Multi-Quadrotor System Based on Model Predictive Control and Improved Artificial Potential Field. *International Journal of Engineering*, 37(1), 115-126. doi: 10.5829/ije.2024.37.01a.11.

22 RF Patent No. 2792386, 01/24/2023. Safiullin R.N., Safiullin R.R., Ungefuk A.A., Sorokin K.V., Tian Haotian Automated remote diagnostic system.

23 Gaile A.A.; Vereshchagin A.V.; Klement'ev V.N. Refining of diesel and ship fuels by extraction and combined methods. Part 1. Use of ionic liquids as extractants. *Russ. J. Appl. Chem.* 2019,92, 453–475. DOI:10.1134/S1070427219040013.

24 Gaile A.A.; Vereshchagin A.V.; Klement'ev V.N. Refining of diesel and ship fuels by extraction and combined methods. Part 2. Use of organic solvents as extractants. *Russ. J. Appl. Chem.* 2019,92, 583–595. DOI:10.1134/S107042721905001X.

25 Povarov V., & Efimov I. (2023). Use of the UNIFAC model in the calculation of physicochemical properties of ecotoxicants for technological and ecoanalytical purposes. *Journal of Mining Institute*, 260, 238–247. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.41>.

© Сафиуллин Р.Н., Шаммазов И.А., Сафиуллин Р.Р., Сорокин К.В., Мошников А.Р., 2024

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-134-153



УДК 629.11.02.001.5

UDC 629.11.02.001.5

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ
ВНЕШНИХ СИЛ И РЕАКЦИЙ
НА ВЕЛИЧИНУ БОКОВОГО УВОДА
УПРАВЛЯЕМЫХ
И НЕУПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЕС
ПРИ КРИВОЛИНЕЙНОМ
ДВИЖЕНИИ ДВУХОСНОГО
АВТОМОБИЛЯ**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE
MAIN EXTERNAL FORCES AND
REACTIONS ON THE MAGNITUDE OF
THE LATERAL WITHDRAWAL OF
CONTROLLED AND UNCONTROLLED
WHEELS DURING THE CURVILINEAR
MOVEMENT OF A TWO-AXLE CAR**

Гудков Виктор Владимирович,
к.т.н., доцент, доцент кафедры автомобиль-
ной подготовки ВУНЦ ВВС «ВВА им. Н. Е.
Жуковского и Ю.А.Гагарина», г. Воронеж.

Gudkov Viktor Vladimirovich,
candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the department of automotive
training of the VUNTS of the Air Force "VVA named
after N. E. Zhukovsky and Yu.A.Gagarin", Voronezh.

✉¹ **Сокол Павел Александрович,**
к.т.н., старший преподаватель кафедры ав-
томобильной подготовки ВУНЦ ВВС «ВВА
им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»,
г. Воронеж, e-mail: pavsokol@yandex.ru

✉¹ **Sokol Pavel Alexandrovich,**
candidate of technical sciences, senior lecturer at
the department of automotive training of the
VUNTS of the Air Force "N. E. Zhukovsky and
Yu.A. Gagarin Air Force Academy", Voronezh,
e-mail: pavsokol@yandex.ru

Василенко Андрей Владимирович,
к.т.н., доцент кафедры систем управления и
информационных технологий Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж.

Vasilenko Andrey Vladimirovich,
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of management systems and in-
formation technologies, Voronezh state technical
university, Voronezh.

Янин Андрей Николаевич,
преподаватель кафедры автомобильной под-
готовки ВУНЦ ВВС «ВВА им. Н.Е. Жуков-
ского и Ю.А.Гагарина», г. Воронеж.

Yanin Andrey Nikolaevich,
lecturer of the department of automotive training of
the VUNTS of the Air Force "VVA named after
N.E. Zhukovsky and Yu.A.Gagarin", Voronezh.

Аннотация. Пневматические шины должны обладать эластичностью, прочностью, износоустойчивостью, и воспринимая вертикальную, тангенциальную и боковую нагрузки должны обеспечивать устойчивость автомобиля на поворотах. Оптимизация их параметров и свойств, зачастую противоречивого характера, является актуальной задачей, для решения которой были выдвинуты гипотезы

Annotation. Pneumatic tires must have elasticity, strength, wear resistance and, taking vertical, tangential and lateral loads, must ensure vehicle stability when cornering. Optimization of their parameters and properties, often of a contradictory nature, is an urgent task, for the solution of which hypotheses were put forward based on the information and analytical research carried out and which made it possible to specify the purpose and objectives of subsequent research.

на основе проведенного информационно-аналитического исследования и которые позволили конкретизировать цель и задачи последующих исследований.

Ключевые слова: СКОЛЬЖЕНИЕ, БОКОВОЙ УВОД, БОКОВАЯ СИЛА, ПОВОРОТ, УГОЛ, СКОРОСТЬ, РЕАКЦИЯ.

Keywords: SLIDING, LATERAL WITHDRAWAL, LATERAL FORCE, ROTATION, ANGLE, SPEED, REACTION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Актуальность и постановка вопроса и плана исследования

Одним из основных показателей автомобилей, влияющих на безопасность дорожного движения, является курсовая устойчивость, т.е. способность сохранять в заданных пределах ориентацию в горизонтальном и вертикальном направлении при отсутствии воздействия со стороны водителя, независимо от скорости его движения, характера действия внешних сил, нагрузок, реакций и моментов. При криволинейном движении аварийные ситуации могут возникать при изменении положения полнуса поворота, особенно у многоосных автомобилей со всеми управляемыми колесами при выходе из строя силового привода рулевого управления либо рулевой трапеции [1].

При качении колеса с эластичной (как в продольном, так и в поперечном направлении) пневматической шиной под действием внешней боковой силы происходит поперечное смещение шины с боковым уводом колеса. При этом, если структура опорной поверхности (ОП) препятствует боковому скольжению протектора шины в области контакта, то в результате ее деформации середина рисунка протектора не совпадает с плоскостью вращения колеса в продольном направлении. У пневматических шин с развитыми грунтозацепами каждый из них представляет собой эластичный элемент, который при прямолинейном движении (в общем случае) деформируются только в продольном направлении. А под действием внешней боковой силы они деформируются также в поперечном направлении.

Объектом исследования является колесный движитель автомобилей с эластичными пневматическими шинами и процесс его взаимодействия с ОП.

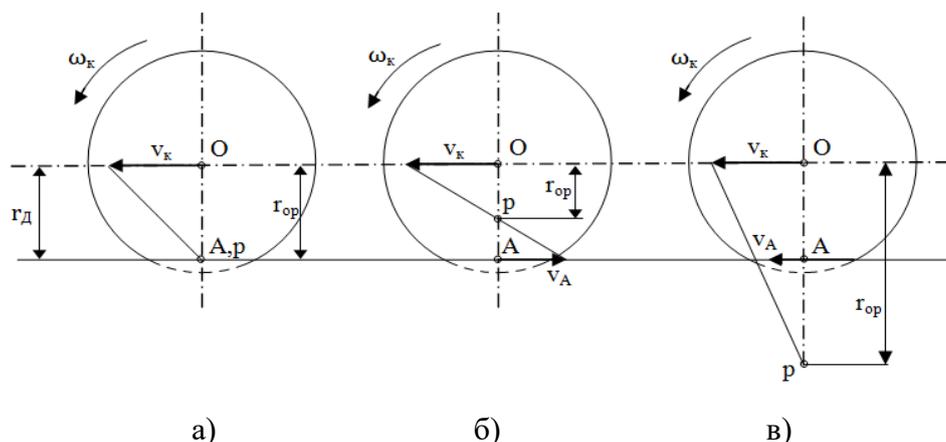
Предметом исследования является влияние основных внешних сил и реакций на величину бокового увода управляемых и неуправляемых колес при криволинейном движении двухосного автомобиля.

Сложный механизм взаимодействия пневматической шины с ОП, возникающий при качении колеса, усложняется циклически изменяющимися нагрузками, контактными деформациями и напряжениями, которые зависят от конструкции (каркаса, типа, числа слоев корда) и геометрических размеров шины. При этом, в настоящее время, существуют противоречивые мнения о механизме процесса проскальзывания элементов протектора пневматической шины относительно ОП [2]. С увеличением силовых и динамических нагрузок на колесный движитель выдвигаются специфические требования к описанию процессов его взаимодействия с ОП в комплексном анализе и является актуальной научной задачей в аспекте теории кинематики скольжения и бокового увода ведущих колес при криволинейном движении двухосного автомобиля.

2 Анализ информационных источников

Научно-исследовательские работы, выполненные как индивидуально, так и коллективно, используют различные подходы как в описании процессов взаимодействия пневматической шины с ОП, так и в проведении экспериментов по исследованию проскальзывания протектора шины по площади контакта.

Необходимость создания теорий взаимодействия эластичного колеса и ОП на основе гипотезы бокового увода, а также разработки математических моделей их взаимодействия под действием внешних боковых сил и реакций возникла достаточно давно. В работе [3] автор рассмотрел процесс качения колеса по ОП в ведомом, ведущем и тормозном режимах (рис. 1), введя при этом ряд допущений.



O – центр колеса; p – мгновенный центр скоростей; v_s – скорость скольжения колеса; ω_k – скорость качения колеса; r_{op} – кинематический радиус колеса
 а) ведомый; б) ведущий; в) тормозной

Рисунок 1 – Схема режимов качения колеса

Скорость скольжения колеса определялась как сумма скорости упругого скольжения колеса из-за деформации шины и скорости скольжения протектора шины в области контакта с ОП (на рисунке – точка А). В ведущем режиме качения колеса буксование будет наступать при его полном скольжении, а в тормозном режиме оно перейдет в юз.

В работе [4], исследуя параметры проскальзывания колеса, сделан вывод о том, что проскальзывание колеса происходит в определенные временные интервалы: в начале движения автомобиля и при увеличении подводимого крутящего момента к ведущим колесам (рис. 2).

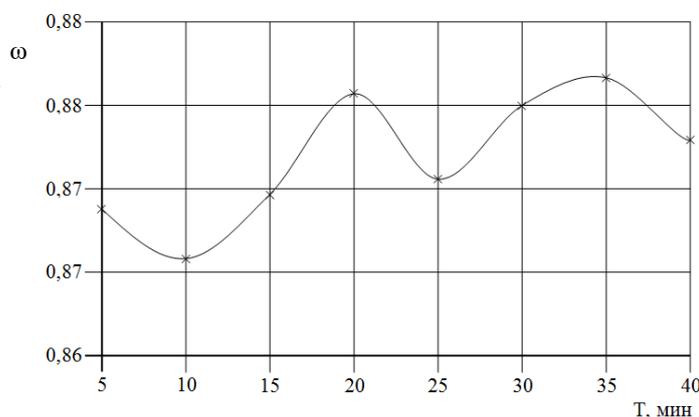
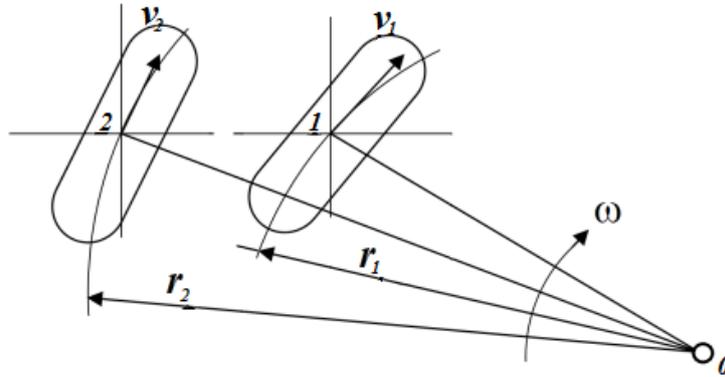


Рисунок 2 – Изменение угловой скорости вращения колеса при движении автомобиля

Криволинейное движение автомобиля характеризуется двумя параметрами: траекторией центра масс автомобиля и углом поворота относительно его продольной оси, при

этом, равномерный поворот может происходить по дуге окружности с постоянным радиусом и постоянной угловой скоростью вращения управляемых колес (рис. 3) [5]. При этом эластичная пневматическая шина деформируется (скручивается) и поворачивается на меньший угол, чем колесный диск.



v_1, v_2 – векторы скоростей колес; r_1, r_2 – радиусы поворота колес;
 ω – угловая скорость вращения колес; O – центр поворота; $1, 2$ – точки крепления колес

Рисунок 3 – Поворот ведущих колес при криволинейном движении автомобиля

Разница между углами поворота колесного диска и пневматической шины составляет угол увода колеса, определяющего поворачиваемость автомобиля (нейтральную, недостаточную и избыточную) [6]. Величина бокового увода колес зависит от конструкции пневматической шины и ее характеристик (типа и рисунка протектора, давления воздуха, соотношения высоты профиля и ее ширины), от остаточной высоты рисунка протектора шины, а также от влияния внешних физических факторов (ветровой нагрузки, распределения груза по площади поверхности кузова автомобиля).

В работе [7] автор, исследуя взаимодействие колеса и ОП приводит определение возникающих при этом процессов: проскальзывание шины представляет собой перемещение части точек колеса, находящегося в области контакта относительно ОП при одновременном наличии в контакте точек, неподвижных относительно этой поверхности.

Скольжение колеса представляет собой одновременное перемещение всех находящихся в области контакта точек колеса относительно ОП и элемент протектора начинает проскальзывать относительно ОП при достижении граничных условий равновесия. При этом смещение поверхности колеса приводит к состоянию, когда силы трения, удерживающие элемент протектора в несскользящем положении, становятся меньше сил упругой деформации каркаса, определяемых кинематикой взаимодействия колеса с ОП. В таком процессе начало перемещения будет связано с несколькими факторами: конструкцией каркаса протектора, характером распределения контактных напряжений, кинематикой движения колеса.

Увод колеса представляет собой перемещение в поперечной плоскости центра колеса, катящегося без бокового скольжения.

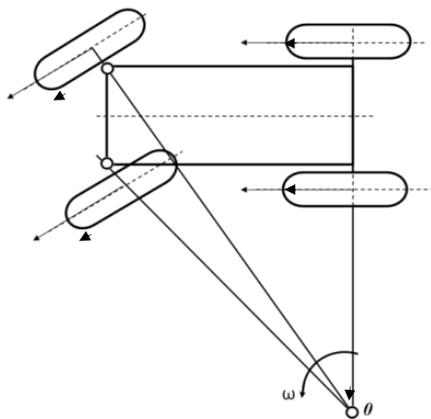
Боковое упругое смещение колеса представляет собой линейное смещение центра колеса относительно площади контакта за счет упругих свойств шины под действием боковой силы, измеренное в центральной плоскости, параллельной опорной.

В работе [8] описаны три варианта бокового увода колес со скольжением:

- силового, возникающего от действия на эластичную шину боковой силы;
- кинематического, вызванного наклоном колес в поперечной вертикальной плоскости и особенностями подвески;

– геометрического, вызванного несоответствием величины углов поворота колес и расчетных значений из-за геометрических показателей рулевой трапеции.

Без бокового увода управляемых колес автомобиль может двигаться по криволинейной траектории в случае расположения центра поворота на оси неуправляемых колес заднего моста (рис. 4), чего можно добиться, рассчитав параметры рулевой трапеции [5].



O – центр поворота; ω – угловая скорость вращения колес

Рисунок 4 – Схема поворота двухосного автомобиля

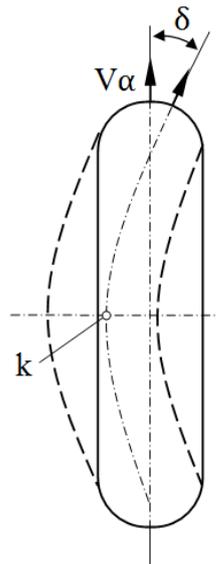
В работе [9] автор предположил, что под действием внешних боковых сил будет происходить показанная на рис. 5 деформация пневматической шины, а область контакта ее протектора с ОП сместится от середины беговой дорожки на некоторую величину, при этом колесо будет двигаться под некоторым углом к своей срединной плоскости, которой был обозначен углом увода колеса.

Гипотеза бокового увода колеса была отражена в работах [10], [11] и получила достаточно широкое распространение ввиду своей простоты, показав определенное соответствие теоретических исследований с проведенными экспериментами.

В работе [2] было предложено для теоретических расчетов использовать модель кинематических связей при изучении процесса взаимодействия пневматической шины с ОП.

Данный метод подразумевает использование уравнений кинематической связи с большим количеством дифференциальных уравнений и введение кинематических коэффициентов. При этом были описаны наиболее характерные случаи движения:

- общий, при котором по характеристикам пневматической шины и скорости движения не делалось никаких предложений и движение системы описывалось уравнениями $2(n+m)$ – порядка, где m – число кинематических связей, n – число узлов;
- движение автомобиля с высокой скоростью, при этом система описывалась уравнениями $2n$ -порядка;
- на автомобиле установлены упругие, но жесткие пневматические шины, при этом система будет сводиться к уравнениям $2(n + m)$ -порядка;
- при движении автомобиля с минимальной скоростью система будет описываться уравнениями $2n$ -порядка.



δ – угол увода; k – коэффициент увода, кгс/рад; v_a – направление качения колеса

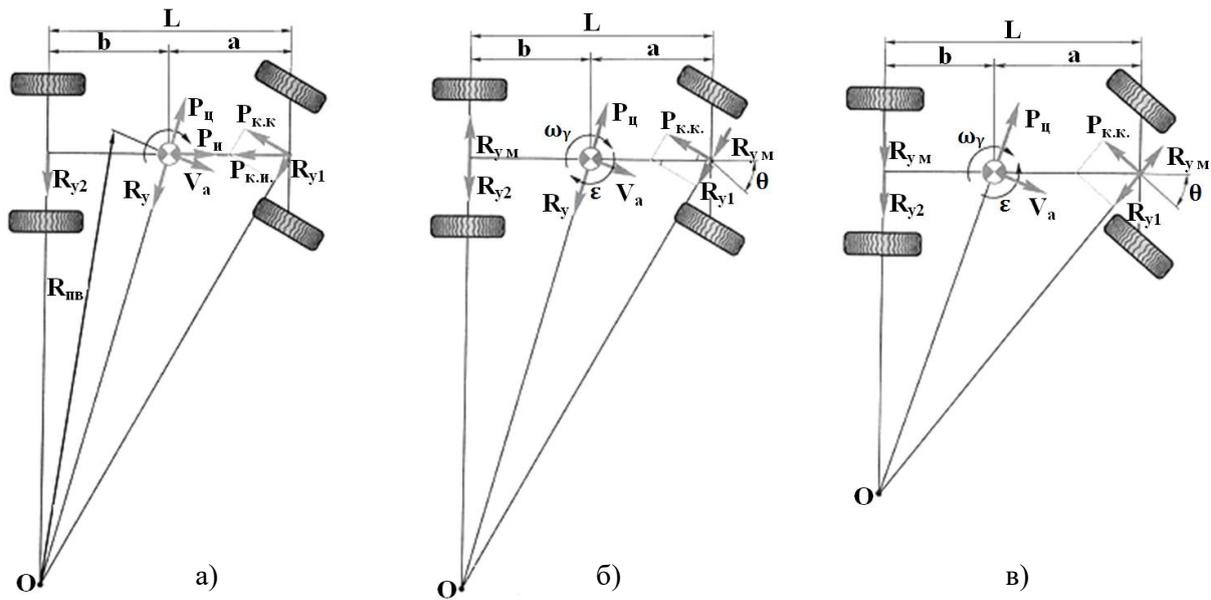
Рисунок 5– Модель бокового взаимодействия шины и опорной поверхности

В работе [1] авторы при описании сил трения в области контакта колеса с ОП рассмотрели и проанализировали различные подходы к моделированию качения шины по ОП и сделали вывод, что в обычном случае движения это будет сухое трение, причем, граница по сцеплению элементарной боковой силы будет представлена параболой.

Область контакта колеса с ОП в этом случае будет делиться на две зоны. В первой зоне будет действовать сила упругости, воспринимаемая отклонившимися элементами шины, которые не исчерпывали всех возможностей по сцеплению и поэтому они не скользят относительно ОП. Во второй зоне сила упругости увеличивается, превышая предел по сцеплению и отклонившиеся элементы шины начинают скользить под действием силы трения скольжения.

Экспериментальные исследования, представленные в работе [2], позволили установить, что элементы протектора пневматической шины, закрепленные по ширине ее беговой дорожки, проскальзывают в области контакта с ОП в противоположном направлении. Элементы внутренней части шины, расположенной ближе к центру поворота колеса, двигались с буксованием, а элементы, находящиеся на внешней части протектора, двигались юзом. При этом, величины пути и характер проскальзывания для различных элементов шины были неодинаковыми. Крайние элементы двигались без изменения направления продольного проскальзывания, внешние – юзом, равномерно по всей длине области контакта, а внутренние – с буксованием, более интенсивным на выходе из нее. Также было установлено, что уменьшение радиуса поворота и давления воздуха в шине вызывают увеличение пути продольного и бокового проскальзывания.

В работе [12] рассмотрены схемы сил, действующих на автомобиль при криволинейном движении (рис. 6). Движение автомобиля описывается траекторией центра масс и углом поворота относительно него продольной оси автомобиля γ .



а) движение на повороте с постоянной угловой скоростью ω_γ ; б) вход в поворот с увеличением угловой скорости поворота от O до ω_γ ; в) – выход из поворота с уменьшением угловой скорости поворота от ω_γ до O ; $R_{к.и.}$ – реакция между повернутыми колесами и дорогой под действием силы инерции; $P_{к.к.}$ – составляющая $R_{к.и.}$, увеличивающая сопротивление качению на повороте; R_{y1} – составляющая $R_{к.и.}$, поперечная реакция между передними управляемыми колесами и дорогой, создающая поворачивающий момент; R_{y2} – поперечная реакция между задними колесами и дорогой, создающая стабилизирующий момент; P_ψ – центробежная сила; R_{yM} – поперечная реакция на колесах, создающая пару сил; θ – угол поворота управляемых колес; V_a – скорость автомобиля; ω_γ – угловая скорость поворота автомобиля; ε – угловое ускорение поворота автомобиля; L – база автомобиля; a – расстояние между центром масс и передними колесами; b – расстояние между центром масс и задними колесами; $R_{пв}$ – радиус поворота автомобиля

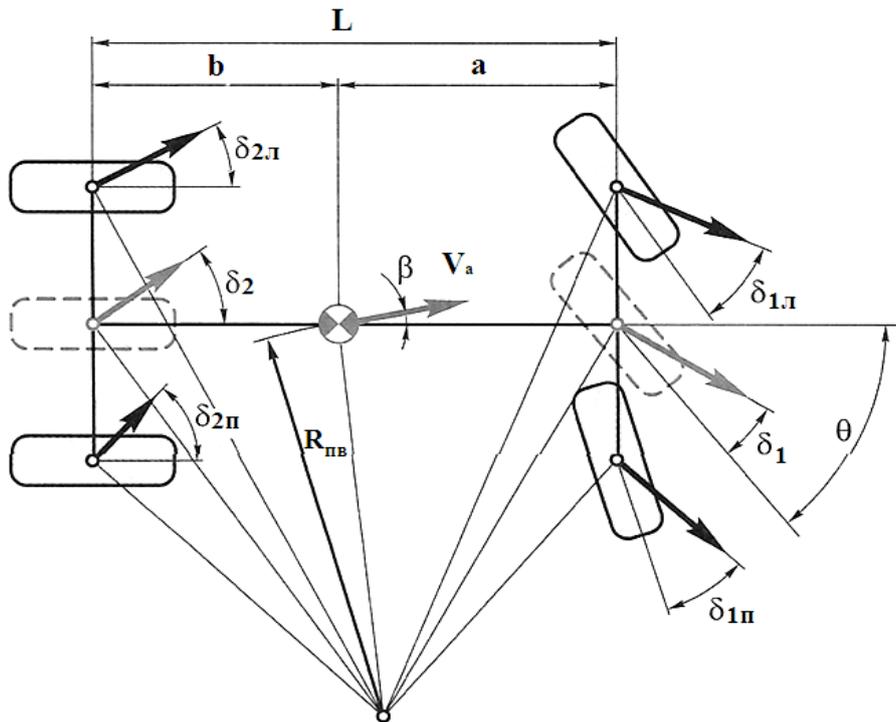
Рисунок 6 – Схема сил, действующих на автомобиль при криволинейном движении

При криволинейном движении в центре масс возникает центробежная сила P_ψ , которая уравнивается поперечной реакцией R_y . Поворачивающий момент M_1 уравнивается стабилизирующим моментом M_2 . Когда поворачивающий и стабилизирующий моменты равны между собой, движение является устойчивым. В случае, если M_1 станет больше M_2 , произойдет занос автомобиля.

Поперечная реакция R_y распределяется между передними и задними колесами обратно пропорционально расстоянию от центра масс до передних и задних колес соответственно. При криволинейном движении с постоянной линейной скоростью V_a угловая скорость поворота продольной оси равна ω_γ . Поэтому при начале поворота должен произойти разгон до угловой скорости поворота ω_γ , а при завершении поворота – замедление угловой скорости ω_γ до нуля с возникновением углового ускорения. В соответствии с этим, при начале и завершении поворота на автомобиль будут действовать дополнительные поворачивающий и тормозной моменты. При начале поворота реакции на передних колесах R_{y1} и R_{yM} складываются, а на задних колесах R_{y2} и R_{yM} вычитаются. При завершении поворота имеет место обратное: реакции на передних колесах R_{y1} и R_{yM} вычитаются, а на задних колесах R_{y2} и R_{yM} складываются.

Курсовая устойчивость автомобиля прямо связана с его поворачиваемостью, т. к. характер движения автомобиля на эластичных пневматических шинах на поворотах отличается

от движения на массивных шинах. На рис. 7 показана схема поворота автомобиля с боковым уводом его колес [12]. Для удобства анализа схемы в этой работе углы увода четырех колес заменили углами увода в середине каждой оси δ_1 и δ_2 . При этом четыре колеса заменили двумя колесами, показанными на рис. 4 штриховыми линиями. Как можно видеть из анализа рис. 4, угол увода передних колес δ_1 уменьшает угол их поворота и увеличивает радиус траектории движения автомобиля. Угол увода задних колес δ_2 , наоборот, поворачивает задние колеса способствуя уменьшению радиуса поворота автомобиля. При этом вокруг центра поворота будет поворачиваться и ось управляемого колеса, а координатами центра поворота будут радиус поворота и смещение центра поворота от оси Y (рис. 8) [5].

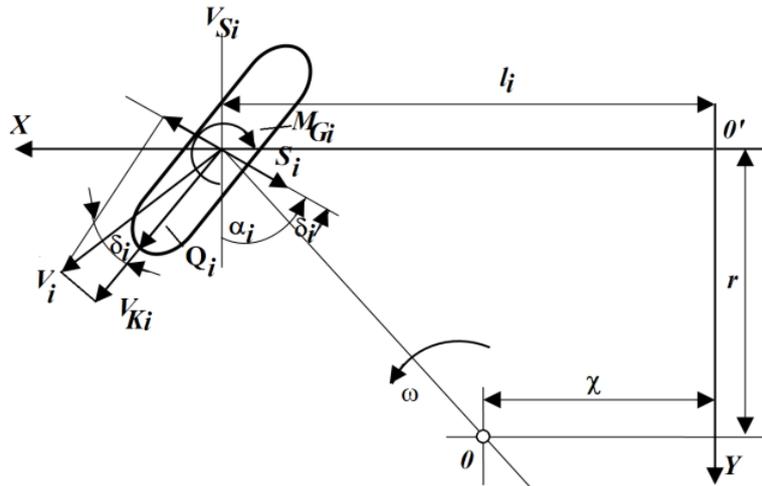


L – база автомобиля; a – расстояние между ЦМ и передними колесами; b – расстояние между центром масс и задними колесами; $R_{пв}$ – радиус поворота; δ_1, δ_2 – углы увода колес; θ – угол поворота управляемых колес; V_a – скорость автомобиля; β – угол сноса

Рисунок 7 – Схема поворота автомобиля с боковым уводом колес

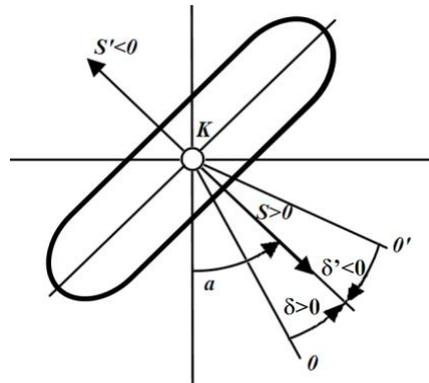
При равномерном повороте управляемого колеса вектор скорости находится в плоскости качения колеса (совпадает с его продольной осью). Но, в действительности, из-за эластичности пневматической шины и действия на нее боковой силы имеет место боковой увод колеса (упругое скольжение вдоль поперечной оси). Из-за бокового скольжения управляемого колеса на ОП от нее возникает боковая реакция, пропорциональная углу увода управляемого колеса, имеющая как положительное, так и отрицательное значение, которые определяются знаком угла увода.

Также, при повороте управляемого колеса относительно вертикальной оси на ОП возникает реактивный момент сопротивления верчению колеса. Схема определения знака увода управляемого колеса показана на рис. 9.



O – центр поворота; r – радиус поворота; V_i – скорость поступательного движения колеса; V_{Si} – вектор скольжения колеса; δ_i – угол бокового увода колеса; ω – угловая скорость колеса; χ – смещение центра колеса; l_i – координаты положения колеса; α_i – угол поворота; S_i – боковая реакция колеса; M_{Gi} – реактивный момент сопротивления верчению колеса; Q_i – реакция опорной поверхности, действующая в плоскости качения колеса

Рисунок 8 – Кинематическая схема поворота ведущего управляемого колеса с уводом



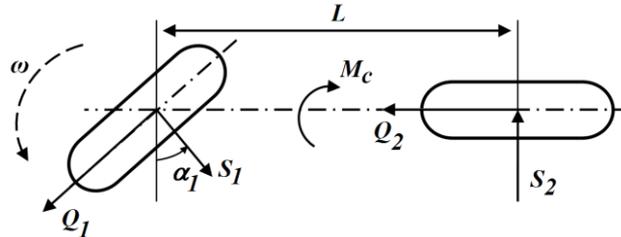
S – боковая реакция дороги; δ – угол увода; K – ось вращения колеса; α – угол поворота колеса

Рисунок 9 – Схема определения знака увода управляемого колеса

Угол увода колеса считается положительным, если он отсчитывается от радиуса ОК до вертикали к плоскости качения колеса, против хода часовой стрелки. При этом и боковая реакция ОП будет иметь положительное значение и будет направлена по вертикали в сторону к центру поворота автомобиля. Если угол увода колеса отрицательный, то он отсчитывается от радиуса ОК и направлен по ходу часовой стрелки, боковая реакция ОП будет направлена от центра поворота автомобиля. Таким образом, в реальных условиях скольжения пневматических шин по ОП на колеса постоянно действуют внешние боковые силы.

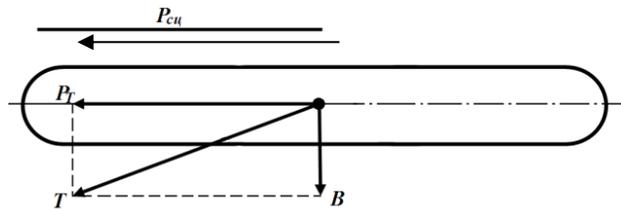
При наличии продольного или бокового скольжения колеса область трения скольжения распространится по всей области контакта, при этом колесо потеряет устойчивость и управляемость.

Неровности ОП (выступы, выбоины) способствуют перемещению колес в вертикальном и боковом направлениях, при этом возникает поперечная сила инерции, стремящаяся вернуть автомобиль к первоначальной прямолинейной траектории движения. Заблокированный дифференциал, неодинаковая нагрузка на ведущие мосты, неравномерный износ пневматических шин, перераспределение вертикальных и горизонтальных реакций ОП между ведущими колесами также вызывают появление боковых сил (рис. 10). При этом величина действующих внешних боковых сил постоянно изменяется. Схема действия тормозных и внешних сил на ведущее колесо показана на рис. 11, 12 [13].



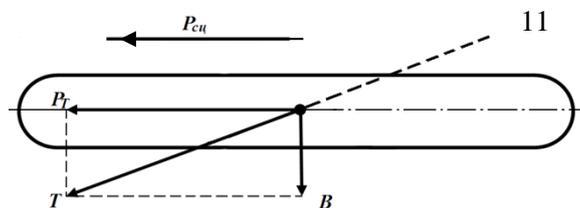
α_1 – угол поворота колеса; Q_1 – сила сопротивления качению переднего колеса; Q_2 – сила сопротивления качению заднего колеса; S_1 – реактивный момент переднего колеса; S_2 – реактивный момент заднего колеса; M_c – момент сопротивления повороту; L – база; ω – угловая скорость вращения колеса

Рисунок 10 – Поворот двухосного автомобиля с колесной формулой 4x4 при заблокированной силовой передаче



P_T – тормозная сила; B – боковая сила, действующая в момент торможения; T – равнодействующая сил P_T и B ; $P_{сц}$ – сила сцепления

Рисунок 11 – Схема действия тормозной и боковой сил на незаблокированное колесо



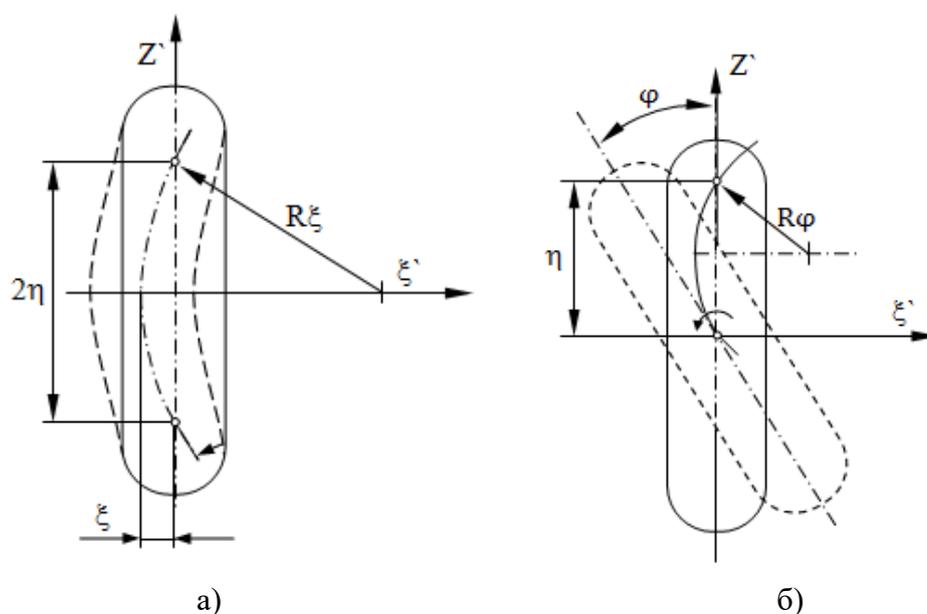
P_T – тормозная сила; B – боковая сила, действующая в момент торможения; T – равнодействующая сил P_T и B ; $P_{сц}$ – сила сцепления; l – направление скольжения

Рисунок 12 – Схема действия тормозной и боковой сил на заблокированное колесо

Если при торможении автомобиля колеса заблокировались и начался процесс скольжения, то это означает, что тормозная сила уравнилась по величине с силой сцепления колеса с ОП. При этом даже небольшая по величине боковая сила будет способствовать увеличению величины равнодействующей тормозной и боковой сил, и когда она превысит величину силы сцепления с ОП, колеса будут двигаться не по траектории прямолинейного движения, а по направлению действия равнодействующей силы, приводя к заносу автомобиля.

Также заносу автомобиля способствует перераспределение нагрузки на колеса переднего и заднего ведущих мостов при торможении автомобиля, что изменяет его сцепной вес и величину силы сцепления ведущих колес с ОП (на задних она уменьшается, а на передних увеличивается).

В работе [14] представлена модель и разработанная методика определения сил сопротивления качению колес и значения боковых сил, действующих на них для двухосного трактора. Особенностью данной модели является рассмотрение влияния инерциальных сил, возникающих при движении трактора по криволинейной траектории или неровной ОП. Недостатками работы можно считать рассмотрение влияния всех сил отдельно, а не в комплексе с боковыми силами и без учета поворота управляемых колес на соответствующий угол. Распределение внешних реакций, действующих на колеса, рассматривается только как зависящее от веса и геометрических характеристик машины, а не от их взаимного влияния друг на друга.



а) деформация при воздействии внешней боковой силы и момента; б) деформация при воздействии внешней боковой силы и момента со смещением центра воздействия; ξ – координаты, соответствующие уравнениям неголономных связей; φ – угол поворота колеса; η – длина деформированной зоны контакта; R_ξ – радиус деформации области контакта от действия боковой силы; R_φ – радиус деформации от действия внешних воздействий со смещением

Рисунок 13 – Модель бокового взаимодействия пневматической шины и опорной поверхности

На рис. 13 показана деформация пневматической шины при воздействии на колесо внешней боковой силы и момента со смещением центра области контакта с ОП на некоторую величину относительно срединной плоскости колеса. При этом область контакта с ОП под действием момента поворачивается на некоторый угол относительно плоскости колесного диска [9].

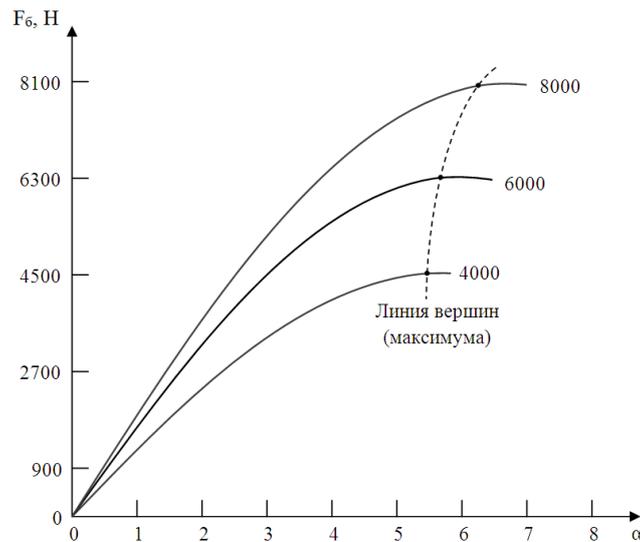


Рисунок 14 – Влияние боковой силы F_b на угол увода колеса α

Как видно из анализа графика, даже на небольших углах увода колеса боковая сила перестает расти и при некоторой величине угла увода, достигнув максимума, начинает снижаться. Обычно этот режим не рассматривают, но т. к. боковая сила реально действует на управляемые колеса, то в общем случае движения возможно сохранение контроля за траекторией движения автомобиля.

Боковое скольжение ведущих колес и занос автомобиля могут возникнуть в следующих случаях: при криволинейном движении автомобиля; при движении по ОП с боковым уклоном; при торможении на мокрых и скольких ОП; при резком ускорении автомобиля; при резком повороте руля на высокой скорости движения автомобиля; при вертикальном перемещении колес на неровностях ОП. При этом величина центробежной силы увеличивается с увеличением скорости движения и при уменьшении радиуса поворота.

Изменение величины боковой силы при постоянной нагрузке на ведущие колеса в функции угла увода (зависимость угла увода колеса от приложенной к нему поперечной силы) показано на рис. 15.

Кривая ОАБВ включает в себя следующие характерные участки: ОА – увод колеса при отсутствии бокового скольжения шины ($\delta_{yb} = 4-6^\circ$); АБ – увод с частичным боковым проскальзыванием шины; БВ – оптимальное скольжение шины ($\delta_{yb} = 6-12^\circ$); ВГ – полное скольжение шины вбок ($\delta_{yb} = 12-15^\circ$).

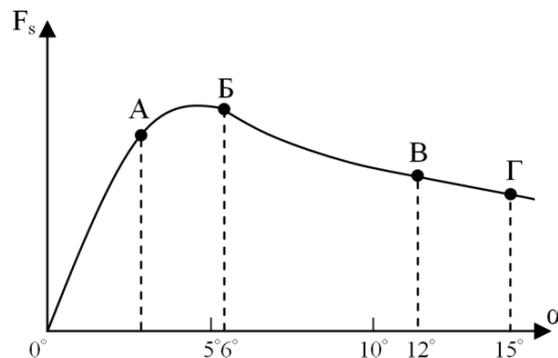
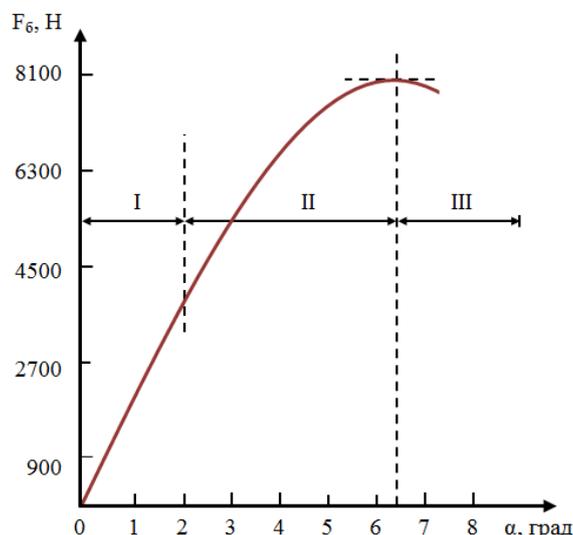


Рисунок 15 – Зависимость угла увода колеса α от поперечной силы F_s

На рис. 16 показана связь между боковым усилием и углом увода шины с тремя диапазонами. Наклон кривой на линейном (упругом) диапазоне является важным параметром для прогнозирования характера качения шин автомобиля при криволинейном движении, а вершина кривой определяет максимальную величину боковой силы (предела сцепления), действующей на шину.

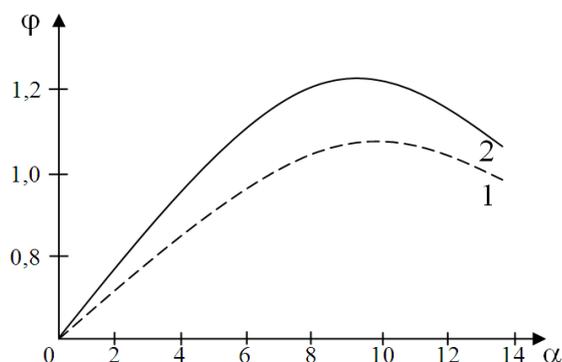


I – отсутствие скольжения (упругий диапазон); *II* – наличие скольжения (переходный диапазон); *III* – полное скольжение (диапазон трения)

Рисунок 16 – Боковая сила F_6 и угол увода α при нагрузке 8000 Н

В работе [15] автор установил, что при криволинейном движении автомобиля величина коэффициента сцепления пневматической шины с ОП максимальна при значении угла увода колес в пределах 6-12° (рис. 17).

В процессе заноса автомобиля радиус его поворота уменьшается, а величина действующей боковой силы возрастает, увеличивая его инерционность. Занос автомобиля при криволинейном движении аналогичен заносу от резкого торможения (ускорения), но его вызывает большая по величине боковая сила, превышающая величину силы сцепления ведущих колес с ОП.



1 – шины колесных транспортных средств; *2* – шины гоночных автомобилей

Рисунок 17 – Зависимость угла увода колеса α от коэффициента сцепления φ с опорной поверхностью

В работе [16] представлен график зависимости коэффициента сцепления φ_x колес от коэффициента скольжения S_6 (рис. 18). Автор сделал вывод, что максимального значения коэффициент сцепления достигает в диапазоне 10-15 % коэффициента относительно проскальзывания в области контакта пневматической шины и ОП.

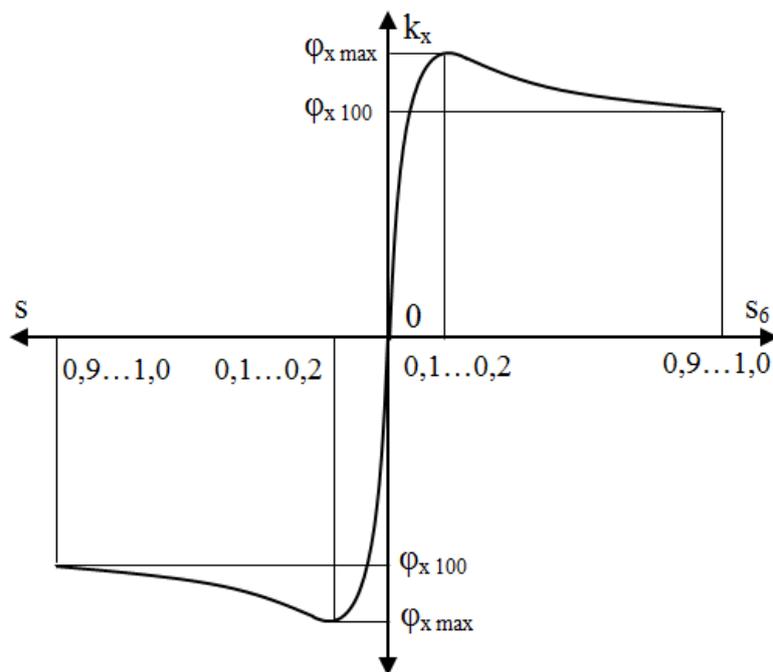


Рисунок 18 – Зависимость коэффициента продольной силы K от коэффициента буксования S_6

В работе [17] автор, исследуя процессы качения колеса по ОП в различных режимах, построил график зависимости коэффициента продольной силы от коэффициента буксования колеса (рис. 19), выделяя зону перехода в ведущий режим (ΔS) при увеличении нагрузки.

Из анализа графика (рис. 18, 19) видно, что коэффициент буксования колеса достигает своего максимального значения в интервале, равном 0,1 ... 0,2 (в среднем 0,15). Как известно, при качении колеса с уводом в плоскости контакта протектора шины с ОП возникают дополнительные боковые касательные контактные напряжения. Эти напряжения, складываясь с действующими контактными напряжениями шины, существенно повышают их величину [18]. Касательные контактные напряжения при качении колеса с уводом возрастают в зоне выхода протектора из области контакта, что расширяет участок скольжения протектора относительно ОП и повышает интенсивность его износа, особенно по ширине беговой дорожки шины. Измерение высоты выступов рисунка протектора показало, что при больших углах увода ($\pm 5^\circ$) износ краев беговой дорожки шин легковых автомобилей на 30-35 %, а грузовых автомобилей на 20-25 % выше, чем в средней ее части.

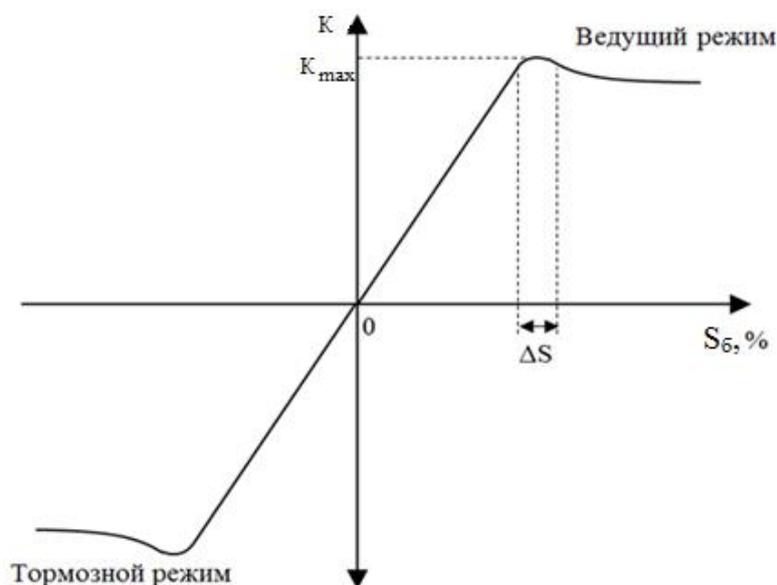
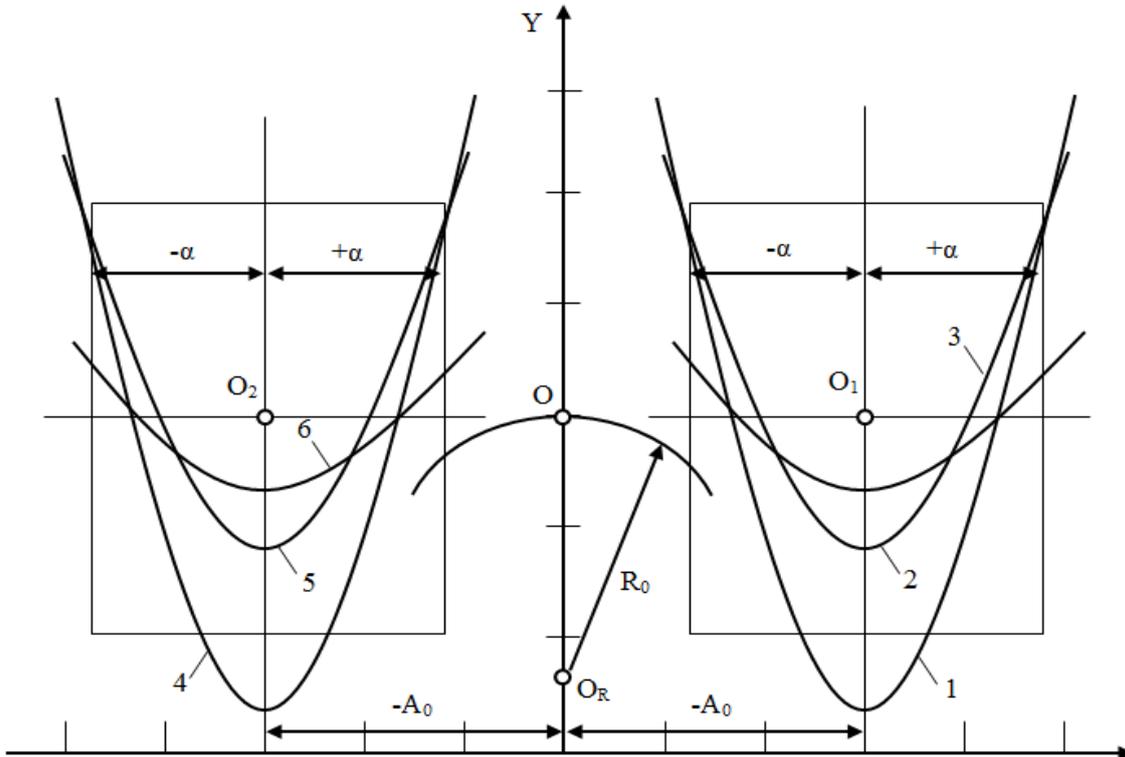


Рисунок 19 – Зависимость коэффициента продольной силы K от коэффициента буксования колеса S_{δ}

На графике (рис. 20) показано положение элементов, не скользящих в продольном направлении при различных радиусах поворота колес [19]. Параболические кривые представляют собой геометрические места, не скользящих в продольном направлении элементов шин. Анализ графика показывает, что ускорение продольного проскальзывания шин не зависит от радиуса поворота и режима качения колес. Для переднего колеса проскальзывающие элементы шины движутся с замедлением (ускорение отрицательно), а для заднего – с возрастающим ускорением, достигающим максимального значения на выходе из области контакта. В отличие от продольного, абсолютная величина ускорения бокового проскальзывания шин зависит как от радиуса поворота, так и от режима качения колеса. Уменьшение радиуса поворота сопровождается увеличением абсолютной величины ускорения проскальзывания элементов шины в боковом направлении.

Путь проскальзывания является одним из наиболее важных параметров, характеризующих процесс проскальзывания элементов шины в области контакта с ОП. Уменьшение радиуса поворота не влияет на величину пути продольного проскальзывания центральной опорной точки и увеличивает его для внешнего и внутреннего элементов протектора. Уменьшение радиуса недеформированного профиля шины увеличивает путь буксования при уменьшении пути юза. На рис. 21 представлены графики, выражающие зависимость пути бокового проскальзывания по длине области контакта. Из анализа графика видно, что при уменьшении радиуса поворота от 6 до 1 метра проскальзывание центральной опорной точки увеличивается в 6 раз. Таким образом, происходит увеличение длины траектории проскальзывания для внутренних элементов протектора шины. Для центрального элемента протектора беговой дорожки шины длина траектории увеличивается для первого колеса на 26 %, для второго колеса – на 31 %. Для внутренних элементов протектора шины увеличение длины траектории проскальзывания для первого колеса происходит на 44 %, для второго колеса – на 62 %. Увеличение длины траектории проскальзывания шин совместно с неравномерным распределением вертикальной нагрузки, действующей на колеса, приводит к неравномерному износу протектора.

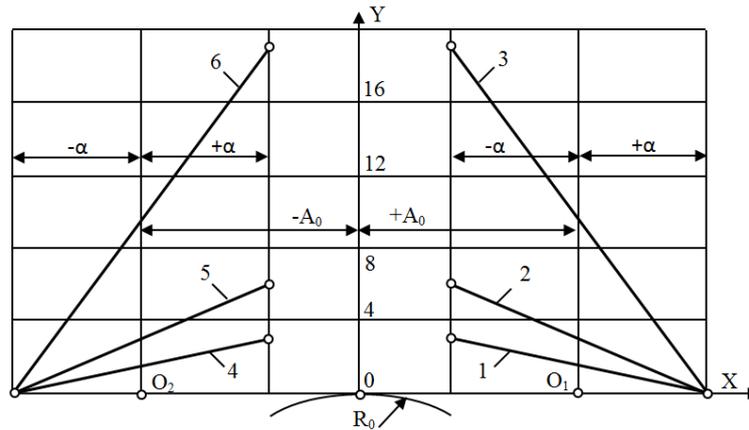


1, 2, 3 – первое колесо; 1, 4 – $R_0 = 6,25$ м; $O_0 = 0,95$; 4, 5, 6 – второе колесо; 2, 5 – $R_0 = 2,75$ м; $P_w = 0,4$ МПа; 3, 6 – $R_0 = 1,65$ м; α – размер области контакта; R_0 – радиус поворота машины; X_i – текущая координата произвольной точки; O_i – центр области контакта; A_0 – расстояние от оси колеса до оси балансира

Рисунок 20 – Положение нескольких элементов проектора пневматических шин в области контакта при криволинейном движении

Из анализа графиков видно, что при уменьшении радиуса поворота проскальзывание центральной опорной точки увеличивается в 6 раз.

Совместные действия продольного и бокового проскальзывания формируют общий путь и траекторию проскальзывания при движении колеса по дуге окружности. При этом внутренние, центральные и внешние элементы протектора совершают движение по разным траекториям и с различной величиной пройденного пути. Следует отметить, что в зависимости от режима и условий движения основным может быть боковое проскальзывание (маневрирование, криволинейное движение) или продольное проскальзывание (тяговый режим движения). Во всех случаях движения проскальзывание колеса по ОП ведет к повышенному износу проектора пневматических шин и потерям тяговой мощности.



1, 2, 3 – первое колесо; 1,4 – $R_0 = 6,25$ м; $O_0 = 0,95$; 4, 5, 6 – второе колесо; 2, 5 – $R_0 = 3$ м; $P_w = 0,4$ МПа; 3, 6 – $R_0 = 1$ м; α – размер области контакта; R_0 – радиус поворота машины; X_i – текущая координата произвольной точки; O_i – центр области контакта; A_0 – расстояние от оси колеса до оси балансир

Рисунок 21 – Распределение пути бокового проскальзывания элементов протектора шин по области контакта

3 Обобщение результатов исследований

Таким образом, можно сделать вывод, что интенсивность износа протектора шин нелинейно повышается с увеличением угла увода колес, причем у шин легковых автомобилей в большей степени, чем у шин грузовых автомобилей. Так, с возрастанием угла увода колеса от 0 до $\pm 2,0^\circ$ интенсивность износа протектора шин легковых и грузовых автомобилей повышается в 10 и 6 раз соответственно. А при больших углах увода колеса интенсивность износа протектора шин значительно возрастает.

Также установлено, что различия в характере проскальзывания элементов шин радиальной и диагональной конструкции происходит вследствие того, что элементы протектора диагональной шины в боковом направлении проскальзывают только к центру поворота, причем, на значительно меньшую по сравнению с шинами радиальной конструкции величину. Путь бокового скольжения к центру поворота у центрального элемента шины диагональной конструкции меньше, чем у шин радиальной металлокордной и комбинированной конструкции.

Различия в процессе проскальзывания шин со сплошным и расчлененным протекторами заключается также в характере распределения пути проскальзывания по ширине беговой дорожки шины, причем, у шин со сплошным протектором зависимость близка к линейной. Нелинейный характер указанной зависимости для шины с расчлененным протектором свидетельствует о том, что проскальзывание происходит не только под действием кинематических факторов и деформации, как это наблюдается у шин со сплошным протектором, но и за счет проскальзывания, обусловленного упругими деформациями грунтозацепов, которые тем выше, чем больше глубина рисунка протектора. Значительная ширина упругих деформаций и пути проскальзывания могут повлечь за собой выход из строя шин, не достигших состояния износа из-за возникновения дефектов в плечевой зоне, а также повышенного износа протектора по краям беговой дорожки.

Изменение ширины беговой дорожки шины влияет главным образом на величину пути продольного проскальзывания ее крайних элементов, возрастающего с увеличением ширины беговой дорожки для всех типов шин.

Таким образом, определение кинематики качения колеса с пневматической шиной по дуге окружности представляет собой сложную задачу, причем, при взаимодействии пневма-

тической шины с недеформируемой ОП преобладающим видом деформации является радиальная. При этом величина минимального радиуса поворота может изменяться, а направление бокового проскальзывания будет зависеть от того, в какой области контакта находится элемент беговой дорожки шины (в области загрузки или в области разгрузки).

Обеспечение безопасной эксплуатации автомобилей, особенно, при криволинейном движении, зависит от конструкции и технических характеристик и особенностей рисунка протектора пневматических шин, которые закладываются на этапе их проектирования и производства.

Являясь одним из основных элементов автомобиля колесный движитель имеет достаточно низкий КПД, особенно при работе на нестабильных нагрузочных режимах, либо в тяговом (неоптимальном) режиме. Проведение натурных экспериментов и исследования процесса взаимодействия колесного движителя и ОП, особенно при криволинейном движении, и уточнение существующих методов расчета параметров пневматических шин представляет собой важную и актуальную научную задачу.

4 Научно-технический проблемный вопрос (проблема), концепция и задачи его разрешения

Имеющаяся теория кинематики скольжения и бокового увода ведущих колес при криволинейном движении двухосного автомобиля, не объясняет все известные расхождения теоретических и экспериментальных результатов и, в частности, расхождения по определению коэффициента увода колеса для различных расчетных методик. Результаты информационного анализа показывают, что при определении коэффициента увода колеса несколькими способами результаты могут существенно отличаться и при этом достаточно часто теоретические и практические результаты не совпадают. Развитие дальнейших исследований состоит в учете данной теорией всех кинематических, динамических и триботехнических факторов на основе выдвинутых гипотез:

- увод колеса от первоначальной траектории качения представляет собой частный случай по отношению к общим уравнениям кинематических связей;
- критерий оценки принятия конкретного способа описания процесса взаимодействия эластичного колеса и ОП существенно определяется формулированием предварительных условий для наиболее распространенных расчетных случаев качения колеса.

Это должно, во-первых, устранить имеющиеся противоречия результатов различных исследований процессов взаимодействия деформируемого эластичного колеса в области контакта с ОП при криволинейном движении автомобиля и наличии внешней боковой силы, нагрузок и реакций. Во-вторых, данная теория должна описывать объект исследования без существенных допущений и упрощений.

При проведении расчетов с использованием аналитических и численных методов и экспериментальных исследований в целях развития концепции создания нового поколения безаварийных эластичных пневматических шин необходимо решить сложную задачу по оптимизации параметров и показателей, зачастую противоречивого характера, получить высокие нагрузочные и скоростные показатели шины при одновременном снижении ее массы для обеспечения радиальной, окружной и боковой устойчивости при снижении амплитуды вынужденных колебаний на оси вращения.

Технический уровень пневматических шин, обеспечивающий безопасность дорожного движения, во многом определяется применяемой при их создании системой методов, средств проектирования и проведения корректных натурных испытаний. При этом создание пневматических шин представляет собой сложную задачу по оптимизации параметров и свойств зачастую противоречивого характера, и, эта задача не может быть эффективно решена путем использования только традиционных эмпирических методов проектирования, основанном только на собственном опыте.

Также, в системе исследований важное место необходимо отвести совершенствованию средств и методов измерений деформированного состояния шин, средств определения свойств материалов шин и исследованию процессов, происходящих в области контакта при качении колеса по ОП.

Необходимо проведение натуральных (эксплуатационных) испытаний пневматических шин с целью оценки деформационного и теплового состояния ее отдельных элементов, оценки работоспособности конструкции шины в целом, проверки эффективности технических решений, заложенных в конструкцию шины. Для получения наиболее достоверных результатов необходимо проведение продолжительных испытаний большого количества шин в условиях реальной эксплуатации автомобилей, используя статические закономерности при разрушении каркаса у 30 % испытываемых шин.

Список литературы

- 1 Саркисов П. И., Попов С.Д. Обзор моделей нестационарного качения колеса с упругой шиной по недеформируемому опорному основанию. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. – Вып. 12. – С. 1-18. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1129.html>
- 2 Никулин, П. И. Теория криволинейного движения колесного движителя. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1992. – 212 с.
- 3 Маркина, А. А. Теория движения колесных машин. Учебное пособие. Министерство науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета. – 2021. – 216 с.
- 4 Васильев Ю. Э., Ивачев А. В., Царьков Д. С. Исследования параметров проскальзывания колеса при различных режимах вращения кругового универсального испытательного стенда дорожных материалов. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», выпуск 1., январь – февраль 2014.– С. 1 – 13.<http://publ.naukovedenie.ru>, 46TVN1 14 (Дата обращения 23.01.2024).
- 5 Антонов А. С., Кононович Ю. А., Магидович Е. И. Армейские автомобили. Теория. – М.: ВИ МО СССР. – 1970. – 528 с.
- 6 Автомобили. Качение колеса. Термины и определения. ГОСТ 17697-72 Издание официальное, – 22 с.
- 7 Малиновский, М. П. Системы управления колесных машин: учебное пособие. – М.: МАДИ, 2018. – 100 с.
- 8 Малиновский Е. Ю., Гайцгорн М. М. Динамика самоходных машин с шарнирной рамой. М.: Машиностроение. – 1974. – 176с.
- 9 Рокар, И. Неустойчивость в механике. Автомобили. Самолеты. Висячие мосты. М.: Издательство иностранной литературы, 1959. – 287с.
- 10 Певзнер, Я. М. Теория устойчивости автомобиля. М.: Машгиз. 1947. – 156 с.
- 11 Неймарк Ю. И., Фуфаев Н. А. Динамика неголономных систем. М.: Физмат, 1967.– 520 с.
- 12 Майборода, О. В. Основы управления автомобилем и безопасность движения. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 256 с.
- 13 Пути предупреждения автомобильных происшествий. – М. : ВИ МО СССР. – 1982. – 68 с.
- 14 Беляев А. Н., Свистов В. В., Тришина Т. В. Определение сил при повороте трактора со всеми управляемыми колесами // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – №3 (50). – С. 132-140.
- 15 Konig R. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering [Электронный ресурс].- Electronic text data. - [Б. м.] : John Wiley & Sons, Inc., 1998 - (Ulrich). URL: <http://eu.wiley.com> (publisher's website): [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1099-047X](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1099-047X) (journal link (full text - НТО-3)). - ISSN 1096-4290. (дата обращения 30.01.2024 г.).
- 16 Горбачев, М.Г. Экстремальное вождение: гоночные секреты. – М.: РИПОЛ классик: Престиж книга, 2006. – 303 с.
- 17 Сазонов И. С., Ким В.А., Ки Йонг Чой. Теория автомобиля: учебное пособие. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2017. – 164 с.
- 18 Кравец, В. Н. Теория автомобиля: учебник. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. – 413 с.

19 Тютин В. О., Вербас В. В., Смирнов О. Г., Варивода В. И. Внедорожные шины мировых лидеров. Научное издание. – Днепропетровск: УкО ИМА–Пресс. – 1999. –304 с.

20 Гудков, В. В. Разработка методики расчета ходимости пневматических шин землеройно-транспортных машин. 05.05.04 Дис. на соискание уч. степ.канд. техн. наук. ВГАСА, Воронеж. – 1997. – 203 с.

References

1 Sarkisov P.I., Popov S.D. Review of models of unsteady rolling of a wheel with an elastic tire on a non-deformable support base. Engineering journal: science and innovation, 2013. – Vol. 12. – P.1-18. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1129.html>

2 Nikulin, P. I. Theory of curvilinear motion of a wheel propulsion device. – Voronezh: VSU Publishing House, 1992. – 212 p.

3 Markina, A. A. Theory of movement of wheeled vehicles. Tutorial. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. – Ekaterinburg: Ural University Publishing House. – 2021. – 216 p.

4 Vasiliev Yu. E., Ivachev A. V., Tsarkov D. S. Research of wheel slip parameters under different rotation modes of a circular universal test bench for road materials. Internet journal “SCIENCE”, issue 1., January – February 2014. – P. 1 – 13. <http://publ.naukovedenie.ru>, 46TVN1 14 (Date of access 01/23/2024).

5 Antonov A. S., Kononovich Yu. A., Magidovich E. I. Army cars. Theory. – M.: VI MO USSR. – 1970. – 528 p.

6 Cars. Wheel rolling. Terms and Definitions. GOST 17697-72 Official publication, –22 p.

7 Malinovsky, M. P. Control systems for wheeled vehicles: textbook. – M.: MADI, 2018. – 100 p.

8 Malinovsky E. Yu., Gaitsgorn M. M. Dynamics of self-propelled vehicles with an articulated frame. M.: Mechanical engineering. – 1974. – 176 p.

9 Rocard, I. Instability in mechanics. Cars. Aircraft. Suspension bridges. M.: Foreign Literature Publishing House, 1959. – 287 p.

10 Pevzner, Ya. M. Theory of vehicle stability. M.: Mashgiz. 1947. – 156 p.

11 Neimark Yu. I., Fufaev N. A. Dynamics of nonholonomic systems. M.: Fizmat, 1967.– 520 p.

12 Mayboroda, O. V. Fundamentals of driving and traffic safety. – M.: Publishing Center “Academy”, 2007. – 256 p.

13 Ways to prevent car accidents. – M.: VI MO USSR. – 1982. – 68 p.

14 Belyaev A.N., Svistov V.V., Trishina T.V. Determination of forces when turning a tractor with all steering wheels // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. – 2016. – No. 3 (50). – pp. 132-140.

15 Konig R. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering [Electronic resource]. - Electronic text data. - [B. m.]: John Wiley & Sons, Inc., 1998 - (Ulrich). URL: <http://eu.wiley.com> (publisher's website): [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1099-047X](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1099-047X) (journal link (full text - NTO-3)). - ISSN 1096-4290. (date of access: 01/30/2024).

16 Gorbachev, M.G. Extreme driving: racing secrets. – M.: RIPOL classic: Prestige book, 2006. – 303 p.

17 Sazonov I.S., Kim V.A., Ki Yong Choi. Car theory: textbook. – Mogilev: Belarusian-Russian University, 2017. – 164 p.

18 Kravets, V. N. Theory of the car: textbook. Nizhny Novgorod State Technical University named after. R.E. Alekseeva. – Nizhny Novgorod, 2013. – 413 p.

19 Tyutin V. O., Verbas V. V., Smirnov O. G., Varivoda V. I. Off-road tires of world leaders. Scientific publication. – Dnepropetrovsk: UkO IMA-Press. – 1999. –304 p.

20 Gudkov, V.V. Development of a methodology for calculating the mileage of pneumatic tires of earth-moving and transport machines. 05.05.04 Diss. for academic competition degree candidate tech. Sci. VGASA, Voronezh. – 1997. – 203 p.