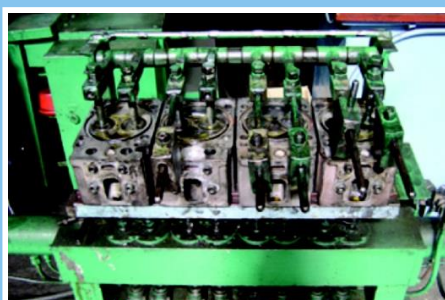


ВНТВ

Воронежский научно-технический вестник
4 (46) декабрь 2023



СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Лебедев В.А., Пастухов Ф.А., Чаава М.М.

Закономерности вибрационной механохимической обработки
деталей в условиях реновационного производства 4

Зубков Н.Н.

Анализ технологических возможностей развития внутренней
поверхности теплообменных труб методом
деформирующего резания 14

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Попов А.И.

Анализ морфологии при воздействии электролитической струи
на поверхность нержавеющей стали 35

Перова А.В., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Григораши В.В., Падурец А.А.

Экспериментальные исследования комбинированного процесса
электрохимикомеханического полирования 49

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Шемякин А.В., Успенский И.А., Рябчиков Д.С., Мальчиков В.Н., Кузнецов Ю.А.

Влияние тахографа на безопасность дорожного движения 56

Шемякин А.В., Успенский И.А., Рябчиков Д.С., Мальчиков В.Н., Кузнецов Ю.А.

Автоматизация грузовых перевозок с помощью информационных программ 64

Иовлева Е.Л., Тимофеев Н.С.

Проблемы и перспективы развития опорной сети транспортно-логистической
инфраструктуры северного завоза в Республике Саха (Якутия) 78

Гнездилова С.А., Гричаников В.А., Погромский А.С., Лукаш Е.А., Акимов А.Е.

Создание систем управления состоянием дорожных конструкций
как эффективного инструмента повышения безопасности
движения на автомобильных дорогах 87

Лелиовский К.Я., Молев Ю. И.

Определение текущего технического состояния агрегатов трансмиссии транспортных средств посредством вибродиагностики при тестовых заездах по дорожному спецучастку

97

Лазарев Д.А., Гринякин Р.В., Стрекалов Д.П., Шаталов Е.В.

Применение цифровых алгоритмов при оптимизации процесса расследования дорожно-транспортных происшествий

107

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-4-13



УДК 621.9.048.6

UDC 621.9.048.6

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ РЕНОВАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

REGULARITIES OF VIBRATION MECHANOCHEMICAL CLEANING OF PARTS FROM OPERATIONAL CONTAMINATIONS UNDER THE CONDITIONS OF RENOVATION PRODUCTIO

✉¹ **Лебедев Валерий Александрович**, к.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: va.lebidev@yandex.ru

✉¹ **Lebedev Valery Alexandrovich**, candidate of technical sciences, professor of the department of "Engineering technology", Don state technical university, Rostov-on-Don, e-mail: va.lebidev@yandex.ru

Пастухов Филипп Андреевич, ведущий инженер НИИ «Вибротехнология», Донской государственной технической университет г. Ростов-на-Дону, e-mail: vibrotech@mail.ru

Pastukhov Philip Andreevich, leading engineer of the Research Institute "Vibrotechnology", Don state technical university, Rostov-on-Don, e-mail: vibrotech@mail.ru

Чаава Михаил Мегонович, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: mihoch1972@gmail.com

Chaava Mikhail Megonovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of "Engineering technology", Don state technical university, Rostov-on-Don, e-mail: mihoch1972@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются технологические возможности применения вибрационной обработки для механохимической очистки поверхностей деталей в условиях реновационного производства. Приведена схема вибрационной обработки, обеспечивающая технологический эффект процесса очистки, на стадии подготовительных операций, предложены зависимости для их определения. Установлены основные закономерности вибрационной механохимической очистки деталей. Показано, что эффективность процесса удаления загрязнений с поверхности зависит от вида технологической жидкости, активирующего ударно-импульсного воздействия на неё абразивных гранул и их гранулометрических характеристик.

Annotation. The technological possibilities of using vibration processing for mechanochemical cleaning of the surfaces of parts in the conditions of renovation production are considered. A diagram of vibration processing is presented that ensures the technological effect of the cleaning process at the stage of preparatory operations, and dependencies for their determination are proposed. The basic principles of vibration mechanochemical cleaning of parts have been established. It has been shown that the effectiveness of the process of removing contaminants from the surface depends on the type of process fluid, the activating shock-pulse effect of abrasive granules on it and their granulometric characteristics.

Ключевые слова: РЕНОВАЦИОННОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ВИБРАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА, МЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА, ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ГРАНУЛИРОВАННАЯ СРЕДА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЖИДКОСТЬ.

Keywords: RENOVATION PRODUCTION, VIBRATION TREATMENT, MECHANOCHEMICAL CLEANING, POLLUTION, GRANULAR MEDIA, PROCESS FLUID.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Современное реновационное производство предусматривает решение целого комплекса организационно-технологических задач, связанных с восстановлением рабочего ресурса объектов материального производства, использованием изделий по новому назначению с минимальными затратами энергии и материалов, либо с утилизацией их с минимальной экологической вредностью.

Качество эффективного решения реновационных задач во много зависит от качества выполнения подготовительных операций, таких как: мойка, очистка от загрязнений, являющихся результатом эксплуатации изделий, разборка, дефектация и другие. Наибольшие трудности при выполнении подготовительных операций в условиях реновационного производства вызывают очистные работы в силу их сложности и высокой продолжительности, связанной со степенью загрязнённости поверхностей, обуславливающей определённую многоэтапность их выполнения [1,2,6]. Так, например, загрязнения автотранспортных средств включают пыль и дорожную грязь, растительные остатки и ядохимикаты, продукты коррозии, топливо, масла и продукты их термического разложения: нагар, накипь, смолистые и лаковые отложения. Следует отметить, что загрязнения охватывают как открытые, доступные для очистки поверхности, так и труднодоступные места деталей, требующих применения специальных средств и способов их удаления.

Существующие на сегодняшний день в отечественной и зарубежной практике способы и средства очистки поверхностей не решают в полной мере эту проблему. Поэтому совершенствование технологического процесса очистки, разработка и применение более эффективного оборудования и технологических жидкостей (ТЖ) имеют немаловажное значение для выполнения моечно-очистных подготовительных операций для решения реновационных задач, направленных на продление жизненного цикла изделий [3,5].

Опыт, накопленный в НИИ «Вибротехнология» по разработке и внедрению в технологию изготовления деталей машин вибрационных технологических систем на операциях отделочно-зачистной обработки позволяет рассматривать их в качестве перспективного средства для выполнения моечно-очистных операций в реновационном производстве. Об актуальности этого направления свидетельствуют широкие технологические возможности вибрационных технологий, а также эффективное практическое применение их в металлообработке [1-20].

Целью настоящих исследований являлось установить особенности механохимической очистки деталей в условия вибрационных технологических систем.

2 Материалы и методы

Основным технологическим оборудованием, реализующим процесс вибрационной механохимической очистки, является вибрационная установка, оснащённая 4-мя рабочими камерами U-формы с объёмом 10 дм³ (рис. 1).



Рисунок 1 – Вибрационная установка УВГ- 4x10

В качестве обрабатываемой среды использовались:

– искусственные гранулированные среды, состоящие из фарфоровых шаров диаметром 6-12 мм, абразивных формованных гранул ПТ10х10, ПТ15х15; природные гранулированные среды, состоящие из дроблённых гранул минерала “Байкалит”; гранулированные среды, полученные из древесины, пластмасс, резины, войлока, фетра, кожи;

– технологические жидкости в виде комбинированных в различном сочетании водных растворов кальцинированной соды, нитрида натрия, фосфорной кислоты, хромового ангидрида, ацетона, хлорного железа, медного купороса, обеспечивающие химическое, пассивирующее и ингибирующее воздействие на поверхность обрабатываемых деталей.

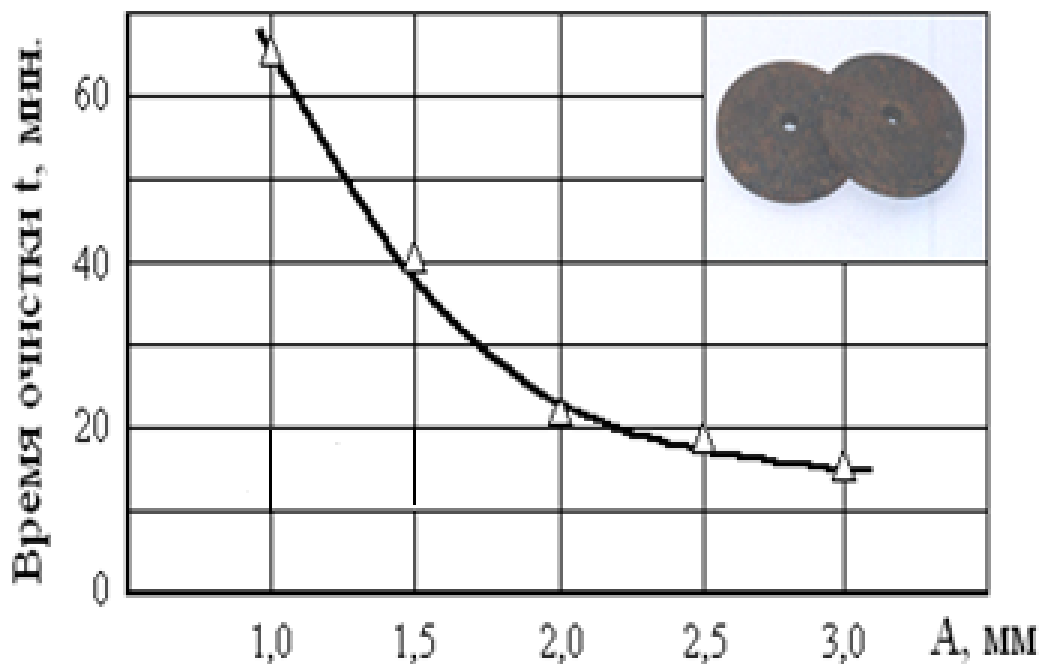
Исследования проводились на цилиндрических образцах, изготовленных из стали 45, алюминиевого сплава Д16Т, латуни ЛС62, Ст. 3, покрытых следами загрязнений в виде коррозии, окалины, масла, а также на деталях автотранспортных средств, бывших в эксплуатации.

Объём загрузки рабочей камеры обрабатываемой средой и деталями не превышал 0,75V_{р.к.} (где V_{р.к.} – объём рабочей камеры). Обработка образцов осуществлялась при непрерывной промывке технологической жидкостью.

Степень удаления твёрдых загрязнений, определялась путем взвешивания образцов до и после очистки на аналитических весах АД-200 с точностью 0,0002 г. Оценка очистки масляных загрязнений проводилась методом смачивания поверхности водой. Результаты обработки образцов подвергались статистическому анализу, на основе которого устанавливались закономерности вибрационной механохимической очистки в зависимости от условий обработки.

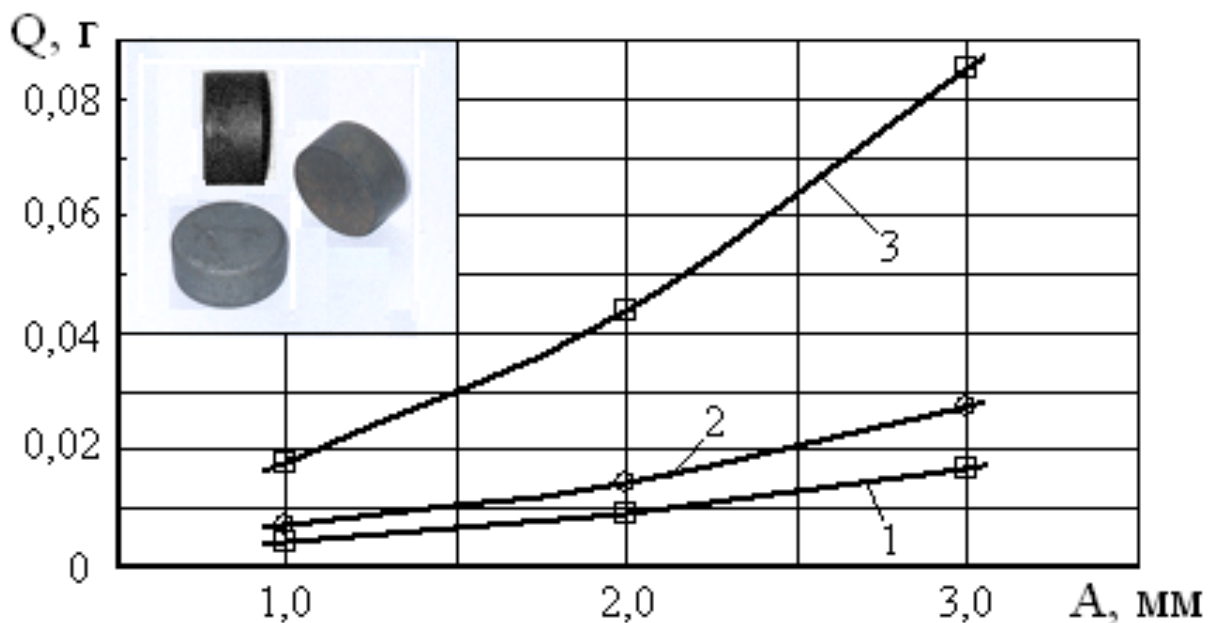
3 Результаты исследований

На рис. 2-5 представлены результаты исследований эффективности вибрационной механохимической очистки (ВМХО) поверхности образцов от загрязнений при различных амплитудно-частотных режимах обработки.



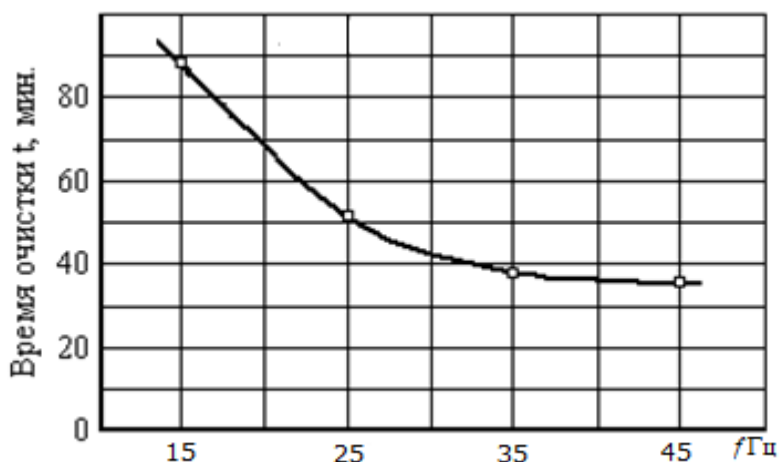
условия очистки: частота колебаний рабочей камеры 33,3 Гц, обрабатывающая среда – абразивные гранулы ПТ10х10 и 5 % водный раствор кальцинированной соды

Рисунок 2 – Зависимость продолжительности ВМХО образцов из Ст3 от амплитуды колебаний рабочей камеры



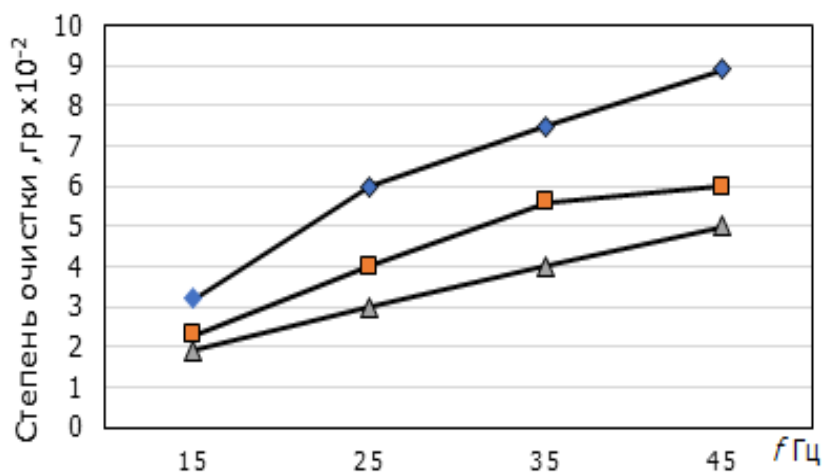
условия очистки: частота колебаний рабочей камеры 33,3 Гц, обрабатывающая среда – абразивные гранулы ПТ10х10 и 5 % водный раствор кальцинированной соды; материал образцов:
1 – сталь 45; 2 – дуралюминий Д16Т; 3 – латунь ЛС62

Рисунок 3 – Влияние амплитуды колебаний рабочей камеры на степень ВМХО образцов из различных материалов от твердых загрязнений



условия очистки: амплитуда колебаний рабочей камеры – 3 мм, обрабатываемая среда – абразивные гранулы ПТ10х10 и 5 % водный раствор кальцинированной соды

Рисунок 4 – Зависимость продолжительности ВМХО образцов из Ст3 от частоты колебаний рабочей камеры



условия очистки: амплитуда колебаний рабочей камеры – 3 мм, обрабатываемая среда – абразивные гранулы ПТ10х10 и 5 % водный раствор кальцинированной соды; материал образцов: 1 – сталь 45; 2 – дуралюминий Д16Т; 3 – латунь ЛС62

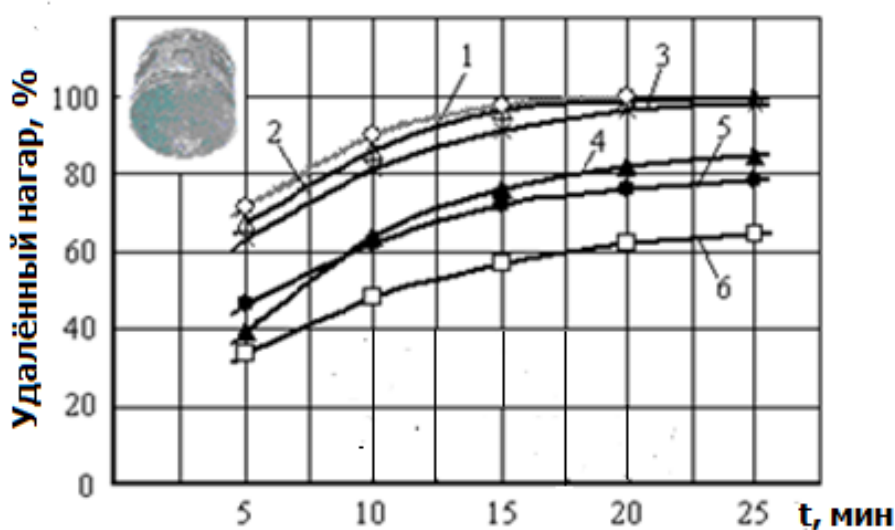
Рисунок 5 – Влияние частоты колебаний рабочей камеры на степень ВМХО образцов из различных материалов от твердых загрязнений

Амплитудно-частотные характеристики, как показано в вышеприведенных исследованиях, определяют в основном интенсивность процесса очистки и, как следствие, его производительность. Что же касается качества очистки, то здесь определяющую роль играет обрабатываемая среда, представляющая собой комбинацию твердых гранул и технологической жидкости, от вида и состава которых зависит технологический эффект очистки поверхностей от загрязнений. Для его оценки была проведена следующая серия экспериментальных исследований в соответствии с технологическими регламентами (ТР), приведёнными в табл. 1. Результаты ВМХО по

установленным регламентам загрязнённых после эксплуатации поршней двигателя Д50, изготовленных из сплава А110В, проиллюстрированы на рис. 6 и 7.

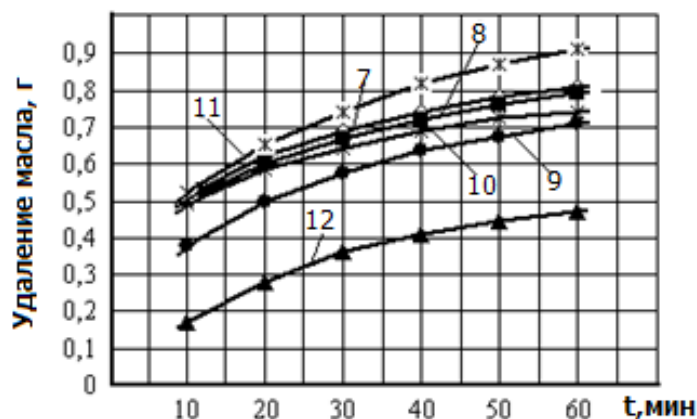
Таблица 1 – Технологические регламенты ВМХО

ТР	Вид гранулированной среды	Технологическая жидкость	Режимы очистки
1	Смесь гранул металлорезиновых (10-30 мм) и абразивных ПТ10х10 в соотношении 3:1	Водный раствор: 1,5 % едкий натр, 2 % прогресс и 2 % кальцинированной соды	Частота колебаний рабочей камеры 33 Гц, амплитуда колебаний $A = 3$ мм.
2	Смесь металлорезиновых гранул (10-30 мм) и фарфоровых шариков (6 -12 мм) в соотношении 3:1		
3	Металлорезиновые гранулы (10-30 мм)		
4	Резиновые гранулы (10-30 мм)		
5	Резиновые гранулы прямоугольной формы (10-30 мм)		
6	Древесные гранулы (20-30 мм)		
7	Смесь резиновых гранул (10-30мм) и фарфоровых шариков (6 -12 мм) в соотношением 3:1	Na_2CO_3 , (30 г/л); NaOH (40 г/л); $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ (15 г/л)	
8		NaOH (30 г/л); $\text{NH}_2\text{SO}_2\text{OH}$ (10 г/л)	
9		Na_2CO_3 (30 г/л); Na_3PO_4 (20 г/л); прогресс (10 г/л)	
10		NaOH (20 г/л); Na_2CO_3 (30 г/л); Na_3PO_4 (15 г/л)	
11		Na_3PO_4 (25г/л); NaOH (15г/л); NaNO_3 (20г/л); $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ (5г/л)	
12		Na_2CO_3 (50г/л); $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ (15г/л)	



1-6 технологические регламенты, приведенные в табл. 1

Рисунок 6 – Зависимость степени ВМХО поршней от продолжительности обработки и вид обрабатывающей технологической жидкости



7-12 технологические регламенты, приведенные в табл. 1

Рисунок 7 – Зависимость степени ВМХО поршней от продолжительности обработки и состава обрабатывающей гранулированной среды

4 Обсуждение и заключение

Проведённый комплекс экспериментальных исследований подтвердил, что процесс очистки поверхности в условиях вибрационных технологических систем является результатом синтеза одновременно протекающих в рабочей камере под воздействием низкочастотных колебаний механических и химических эффектов.

Установлено, что увеличение амплитуды колебаний приводит к повышению силового ударно импульсного воздействия гранул на обрабатываемую поверхность и, как следствие, к росту величины удаления с неё твердых загрязнений. Увеличение частоты колебаний рабочей камеры способствует интенсификации процесса очистки, обусловленной ростом количества актов ударноимпульсно взаимодействия гранул с очищаемой поверхностью. Таким образом, управление амплитудно-частотными параметрами колебаний позволяет обосновать вид вибрационной технологической системы для выполнения операций очистки деталей от загрязнений в условиях реновационного производства, выбор наиболее рациональных режимов и производительность ВМХО.

Наилучший технологический эффект очистки от твердых загрязнений, таких как нагар, масляно-грязевые отложения, окалина, как показал сравнительный анализ, достигается при использовании в качестве обрабатывающей гранулированной среды, состоящей из резиновых гранул с металлическими сердечниками и абразивных гранул ПТ10х10. Такая комбинация обрабатывающей среды позволяет практически полностью удалить загрязнения из труднодоступных мест, а также микронеровностей обрабатываемых поверхностей деталей. Делается это без разрушения исходной шероховатости.

Предложенный и исследованный набор технологических жидкостей для ВМХО позволил выделить основные составляющие химические элементы, присутствие которых в водном растворе обеспечивает эффективную очистку поверхностей от масляных загрязнений. Представленные результаты исследований не являются исчерпывающими и в каждом конкретном случае в зависимости от свойств загрязнений и обрабатываемого материала могут быть откорректированы как по составу химических элементов, так и по их количественному содержанию, которые должны дополнительно отрабатываться путём экспериментальных и натуральных испытаний.

В заключение следует отметить, что результаты проведенных исследований и установленные на их основе закономерности являются исходной предпосылкой для разработки подготовительных технологических операций, связанных с выполнением моечно-очистных переделов реновационного производства.

Список литературы

- 1 Бабичев, А.П. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-защитной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок) / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспи и др.; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.П. Бабичева. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 289 с.
- 2 Смирнов, Н.С. Очистка поверхности стали / Н.С. Смирнов, М.Е. Простаков, Я.Н. Липкин. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с
- 3 Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивание – М.: Химия, 1974. – 416 с.
- 4 Семенов, В. И. Удаление загрязнений, прочно связанных с поверхностями деталей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 11. – С. 69-72.
- 5 Бабичев, А.П., Пастухов Ф.А., Давыдова И.В., Виброволновая очистка кардана автомобиля от эксплуатационных и производственных загрязнений / А.П. Бабичев, Ф.А. Пастухов, И.В. Давыдова, К.В. Гутета, А.М. ЭльДадуки А, О.О. Полушкин. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 5-2 (313). – С. 249-255.
- 6 Санамян, В. Г., Емцов С. Г., Хамуда Х. Виброабразивная обработка легкоповреждаемых деталей в машиностроительном и ремонтном производстве // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Материалы междунар. науч. Техн. конф. – Волжский. ВИСИ 1999. – С. 103 – 106.
- 7 Лебедев, В.А. Моделирование эффективности виброочистки поверхности изделий от загрязнений // В сборнике: Проблемы и перспективы развития машиностроения Сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвящённой 60-летию Липецкого государственного технического университета. А.М. Корнеев (ответственный редактор). – 2016. – С. 151-156.
- 8 Аля Саед Бакир. Совершенствование технологии виброабразивной обработки деталей в условиях ремонта и изготовления автотракторных двигателей.: Дис. ... канд. техн. наук. – Ростов н/Д. 1995 – 189с.
- 9 Бабичев, А. П. Вибрационная обработка в условиях ремонтных производств / А.П. Бабичев, В.Г. Санамян, Х. Хамуда и др // Высокие технологии в машиностроении: Материалы международной научн. техн. конф. Харьков, 1999. – Сс. 106 – 107.
- 10 Бабичев, А.П. Исследование технологических параметров вибрационной обработки в многовитковой рабочей камере / А.П. Бабичев, Т.В. Давыдова, В.А. Атоян // XXVII Научно-техническая конференция ААИ «Автотракторостроение. Промышленность и высшая школа». К 60-летию воссоздания МАМИ. Секция «Методы обработки, станки и инструменты»: тез. докл., 29-30 сент. – М., 1999. – С.8-9.
- 11 Бабичев, А.П. Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей // А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко и др. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 215 с.
- 12 Карагодин В. И., Митрохин Н. Н. Ремонт автомобилей и двигателей: Учеб. для студ. сред. проф. учеб. заведений. – М.: Мастерство; Высш. школа, 2001. – 496 с.
- 13 Вейсса, Г. К. Повышение эффективности технологии утилизации изделий машиностроения на основе применения виброволновых процессов (на примере изделий сельхозмашиностроения) : специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вейсса Гутета Кабета (Guteta Kabeta Weyessa). – Ростов-на-Дону, 2017. – 22 с.
- 14 Бабичев, А.П. Виброволновая очистка кардана автомобиля от эксплуатационных и производственных загрязнений / А. П. Бабичев, Ф. А. Пастухов, И. В. Давыдова [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2014. – № 4. – С. 8-14.
- 15 Бабичев, А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии: монография. 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. -694 с.

16 Бабичев, А.П. Разборка резьбовых соединений виброволновым методом в ходе восстановления и утилизации изделий машиностроения / А. П. Бабичев, Д. Эссоло, Г. К. Вейсса [и др.] // Динамика технических систем : Сборник трудов XII международной научно-технической конференции, Ростов-на-Дону, 16–17 декабря 2015 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2016. – С. 334-339.

17 Колганова, Е.Н. Способ вибрационной обработки путём комбинирования вида и состава гранулированных обрабатывающих сред / Е. Н. Колганова, Е. Ю. Крупеня, А. П. Шишкина, Е. П. Мельникова // Машиностроительные технологические системы : Сборник трудов Международной научно-технической конференции, Ростов-на-Дону, 26–29 мая 2022 года / Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2022. – С. 89-93.

18 Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко ; под общ. ред. А. Г. Суслова. – Москва : Машиностроение, 2006. – 447 с.

19 Бабичев, А.П. Разборка резьбовых соединений виброволновым методом в ходе восстановления и утилизации изделий машиностроения. / А.П. Бабичев, Д. Эссоло, Г.К. Вейсса, Ф.А. Пастухов // В сборнике: Динамика технических систем. Сборник трудов XII международной научно-технической конференции. 2016. – С. 334-339.

20 Бабичев, А.П. Использование виброволнового воздействия (вибраций) в процессах разборки неподвижных разъемных соединений в условиях ремонта и утилизации изделий машиностроения / А.П. Бабичев, Д. Эссоло, Е.Н. Коваленко // Вестник Донского государственного технического университета. – 2012. – Т. 12, № 1-1(62). – С. 50-55.

21 Малинин, А. В. Очистка деталей и агрегатов машин в современном ремонтном производстве / А. В. Малинин, О. С. Федоров // Научное обеспечение инженерно-технической системы АПК: проблемы и перспективы : Материалы Национальной научно-практической конференции. – Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. – С. 64-69.

References

1 Babichev, A.P. Application of vibration technologies in finishing and cleaning operations of parts (cleaning, washing, removal of flash and burrs, edge processing) / A.P. Babichev, P.D. Motrenko, L.K. Gillespie et al.; edited by Dr. Tech. sciences, prof. A.P. Babicheva. - Rostov n/a: Publishing center of DSTU, 2010. – 289 p.

2 Smirnov N.S. Cleaning the surface of steel / N.S. Smirnov, M.E. Prostakov, Ya.N. Lipkin. – M.: Metallurgy, 1987. – 232 p.

3 Zimon, A.D. Liquid adhesion and wetting - M.: Khimiya, 1974. - 416 p.

4 Semenov, V.I. Removal of contaminants firmly bound to the surfaces of parts // Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science. – 2013. – No. 11. – P. 69-72.

5 Babichev, A.P., Pastukhov F.A., Davydova I.V., Vibrowave cleaning of a car's cardan from operational and industrial contaminants / Babichev A.P., Pastukhov F.A., Davydova I.V., Guteta K. .V., ElDakduki A.M., Polushkin O.O.-Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2015. No. 5-2 (313). pp. 249-255.

6 Sanamyan, V. G., Yemtsov S. G., Hamuda H. Vibroabrasive processing of easily damaged parts in mechanical engineering and repair production // Abrasive processing processes, abrasive tools and materials: Materials of the international. scientific Tech. conf. - Volzhsky. VISI 1999. – p. 103 – 106.

7 Lebedev, V.A. Modeling the effectiveness of vibration cleaning of product surfaces from contamination // In the collection: Problems and prospects for the development of mechanical engineering Collection of scientific papers of the international scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of the Lipetsk State Technical University. A.M. Korneev (executive editor). 2016. pp. 151-156.

8 Alya Sayed Bakir. Improving the technology of vibroabrasive processing of parts in the conditions of repair and manufacture of automobile and tractor engines.: Dis. cand. tech. Sci. – Rostov n/a. 1995 – 189 p.

9 Babichev, A.P., Sanamyan V.G., Hamuda H. et al. Vibration processing in repair production conditions // High technologies in mechanical engineering: Materials of international scientific research. tech. conf. Kharkov, 1999. – p. 106 – 107.

10 Babichev, A.P. Research of technological parameters of vibration processing in a multi-turn working chamber / A.P. Babichev, T.V. Davydova, V.A. Atoyan // XXVII Scientific and Technical Conference of the AAI “Automotive and Tractor Engineering. Industry and Higher School”. To the 60th anniversary of the re-establishment of MAMI. Section “Processing methods, machines and tools”: abstract. report, 29-30 September. – M., 1999. – P.8-9.

11 Babichev, A.P. Application of vibration technologies to improve the surface quality and performance properties of parts // A.P. Babichev, P.D. Motrenko and others - Rostov n/d: Publishing center of DSTU, 2006. - 215 p.

12 Karagodin, V.I., Mitrokhin N.N. Repair of cars and engines: Textbook. for students avg. prof. textbook establishments. – M.: Mastery; Higher school, 2001. – 496 p.

13 Veissa, G. K. Increasing the efficiency of recycling technology for mechanical engineering products based on the use of vibration-wave processes (using the example of agricultural engineering products): specialty 02/05/08 "Mechanical Engineering Technology": abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Veissa Guteta Kabeta (Guteta Kabeta Weyessa). – Rostov-on-Don, 2017. – 22 p.

14 Vibro-wave cleaning of a car’s cardan from operational and industrial contaminants / A. P. Babichev, F. A. Pastukhov, I. V. Davydova [etc.] // News of the South-Western State University. Series: Equipment and technology. – 2014. – No. 4. – P. 8-14.

15 Babichev, A.P., Babichev I.A. Fundamentals of vibration technology: monograph. 2nd ed., revised. and additional -Rostov n/a: Publishing center of DSTU, 2008. -694 p.

16 Dismantling of threaded connections using the vibration wave method during the restoration and recycling of mechanical engineering products / A. P. Babichev, D. Essola, G. K. Weiss [etc.] // Dynamics of technical systems: Collection of proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference, Rostov -on-Don, December 16–17, 2015. – Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2016. – P. 334-339.

17 Method of vibration processing by combining the type and composition of granular processing media / E. N. Kolganova, E. Yu. Krupenya, A. P. Shishkina, E. P. Melnikova // Mechanical engineering technological systems: Collection of proceedings of the International Scientific and Technical Conference , Rostov-on-Don, May 26–29, 2022 / Don State Technical University. – Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2022. – P. 89-93.

18 Suslov, A.G. Technological support and improvement of the operational properties of parts and their connections / A. G. Suslov, V. P. Fedorov, O. A. Gorlenko; under general ed. A. G. Suslova. - Moscow: Mechanical Engineering, 2006. - 447 p.

19 Babichev, A.P., Essola D., Veissa G.K., Pastukhov F.A. Dismantling of threaded connections using the vibration wave method during the restoration and recycling of mechanical engineering products. In the collection: Dynamics of technical systems. Collection of proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference. – 2016. – P. 334-339.

20 A. P. Babichev, D. Essola, E. N. Kovalenko Use of vibration wave influence (vibrations) in the processes of disassembling fixed detachable joints in the conditions of repair and recycling of mechanical engineering products // Bulletin of the Don State Technical University. – 2012. – T. 12, No. 1-1(62). – P. 50-55.

21 Malinin, A. V. Cleaning of machine parts and assemblies in modern repair production / A. V. Malinin, O. S. Fedorov // Scientific support of the engineering and technical system of the agro-industrial complex: problems and prospects: Materials of the National Scientific and Practical Conference. – Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2020. – P. 64-69.

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-14-34



УДК 621.7.04; 621.91; 621.565.93/95

UDC 621.7.04; 621.91; 621.565.93/95

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ МЕТОДОМ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ

INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF DEFORMATION CUTTING METHOD FOR THE INNER SURFACE ENHANCING OF HEAT EXCHANGE TUBES

✉¹ **Зубков Николай Николаевич**, д.т.н., проф. кафедры инструментальной техника и технологии, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: zoubkovn@bmstu.ru

✉¹ **Zubkov Nikolai Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor of the department of instrumental engineering and technology, Bauman Moscow state technical university, Moscow, e-mail: zoubkovn@bmstu.ru

Аннотация. Представлен анализ существующих методов внутритрубной интенсификации теплообменных процессов. Предложены апробированные варианты использования метода деформирующего резания для развития внутренней поверхности теплообменных труб, включающие принципы, схемы реализации, конструкции инструментов и приспособлений. Приведены фотографии получаемых внутри труб макроструктурированных поверхностей и интенсификаторов теплообмена для повышения эффективности конвективного и конденсационного теплообмена, а также пузырькового кипения.

Annotation. The analysis of existing methods of surface enhancing for in-tube intensification of heat-exchange processes is presented. Approved variants of using the method of deformational cutting for the increasing the inner surface of heat-exchange tubes are proposed, including principles, schemes of realization, designs of tools and attachments. Photos of macrostructured surfaces and heat exchange intensifiers obtained inside the tubes to increase the efficiency of convective, condensing and boiling heat transfer is presented.

Ключевые слова: ДЕФОРМИРУЮЩЕЕ РЕЗАНИЕ, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА, ТЕПЛООБМЕННАЯ ТРУБА, ВНУТРЕННЕЕ ОРЕБРЕНИЕ, ПОВЕРХНОСТЬ КИПЕНИЯ, ПОВЕРХНОСТЬ КОНДЕНСАЦИИ.

Keywords: DEFORMATIONAL CUTTING, HEAT TRANSFER ENHANCEMENT, INNER TUBE FINNING, ENHANCED HEAT TRANSFER SURFACES.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Интенсификация теплообмена для теплообменных аппаратов на основе труб достигается развитием их теплообменных поверхностей или созданием интенсификаторов теплообменных процессов. На практике наибольшее распространение получило развитие наружной

поверхности теплообменных труб за счет оребрения. Однако, увеличение площади наружной теплообменной поверхности, при гладкой внутренней поверхности, например, в 10 раз, приводит к увеличению коэффициента теплопередачи менее, чем в два раза. Аналогичного повышения тепловой эффективности можно достичь, увеличивая одновременно в два раза площадь как наружной, так и внутренней поверхности. Внутреннее развитие поверхности труб или создание на ней интенсификаторов теплообмена является перспективным направлением повышения эффективности теплообменных аппаратов и снижения их металлоемкости, однако является сложной технологической задачей [1].

Макро- или микрорельеф на внутренней поверхности труб позволяет повысить компактность и эффективность теплообменных аппаратов. Его использование целесообразно в теплообменных аппаратах промышленных холодильных, кондиционирующих и криогенных установок, теплообменниках для химической промышленности и тепловых станций, воздухонагревателей, конденсаторов погружного охлаждения электронной техники и т.п.

Ведущие зарубежные производители теплообменной аппаратуры применяют в своих изделиях теплообменные трубы с внутренним рифлением с количеством спиральных ребер (канавок) по окружности от 2-х до 60 и углом наклона канавок к оси до 60°. Высота макрорельефа составляет обычно десятые доли миллиметра, что не позволяет увеличивать площадь внутренней теплообменной поверхности более, чем на десятки процентов. Основной целью создания такого макрорельефа является интенсификация теплообмена за счет разрушения пристеночного слоя при закручивании потока, проходящего через винтовые выступы.

Существует ограниченное количество методов получения внутреннего макрорельефа, которые можно отнести к обработке резанием и обработке давлением.

Развитие поверхности в виде оребрения методами лезвийной обработки используется крайне редко, ввиду невысокой производительности, наличием отходов в виде стружки и малым диапазоном типоразмеров получаемого внутреннего рельефа.

Получение труб с внутренним макрорельефом из лент основано на предварительной накатке макрорельефа на ленте рифлеными роликами или гофрировании ленты. В дальнейшем из ленты формируется трубная заготовка с последующей прямой или спиральной шовной сваркой. Получение труб из ленточных заготовок можно условно отнести к сборочным методам. На практике используются способы по патентам США [2-4] и др.

Для получения макрорельефа на внутренней поверхности труб в подавляющем большинстве случаев используются высокопроизводительные методы обработки давлением, однако, это обуславливает необходимость применения специализированного дорогостоящего оборудования.

При получении канавок на уже готовой трубе известно использование дорнования. Рифления на формообразующей поверхности дорна продавливают канавки на внутренней поверхности трубы. Дорн устанавливается на штанге и вытягивается из трубы.

Оригинальным является формирование внутреннего рельефа “плавающим” дорном, не требующим штанги для удержания дорна внутри трубы [5]. Дорн состоит из двух частей (рис. 1). Отсутствие осевого перемещения дорна при протягивании трубной заготовки обеспечивается гладкой частью 1 и фильерой 3, редуцирующими трубу. Рифленая часть дорна 2 совместно с фильерой 4 формирует канавки на внутренней поверхности трубы.

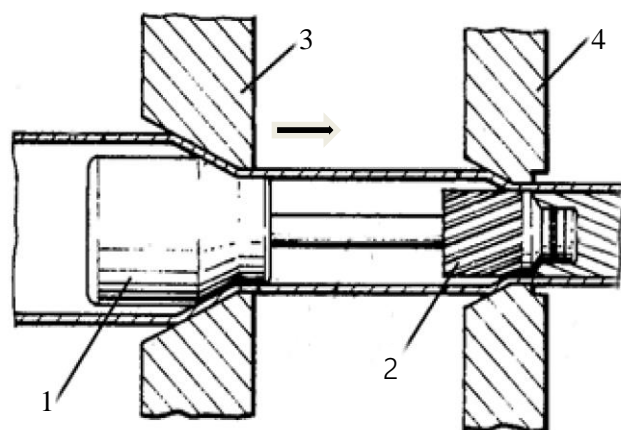


Рисунок 1 – Формирование внутреннего макрорельефа “плавающим” дорном

Силы, необходимые для протягивания трубы значительны, что требует обильной смазки. Имеются модификации этого метода, для снижения силы волочения, когда вместо фильера 3 и 4 используется обкатка шариками или роликами, расположенными в обойме. В силу ряда технологических проблем, часто приводящих к разрыву трубной заготовки, метод используется ограниченно.

Наибольшее распространение получило создание ребер на внутренней поверхности уже готовых бесшовных труб одновременно с формированием наружного оребрения. Используется метод накатки наружных ребер блоком дисковых роликов при обжатии трубы на внутреннюю оправку, имеющую винтовые углубления (рис. 2). Наиболее характерными являются способы, отраженные в патентах [6, 7].

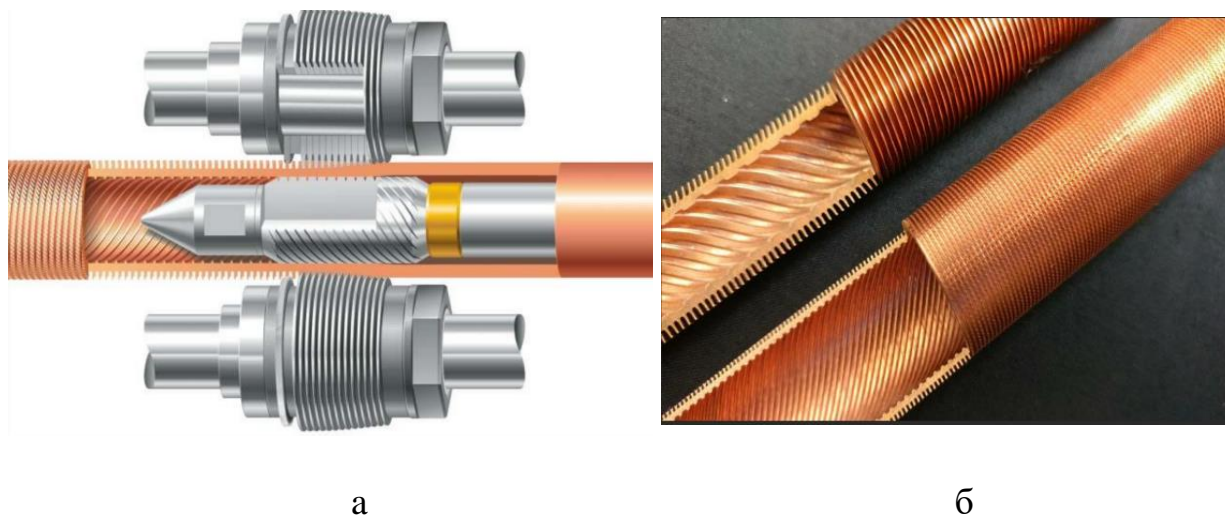


Рисунок 2 – Схема одновременного структурирования наружной и внутренней поверхности теплообменной трубы (а) и примеры получаемых рельефов (б) [8]

Также применяется прессование трубной заготовки пропусканием через фильеру с формированием продольных, реже спиральных внутренних ребер (рис. 3). Метод применим только для труб из алюминиевых сплавов [9].

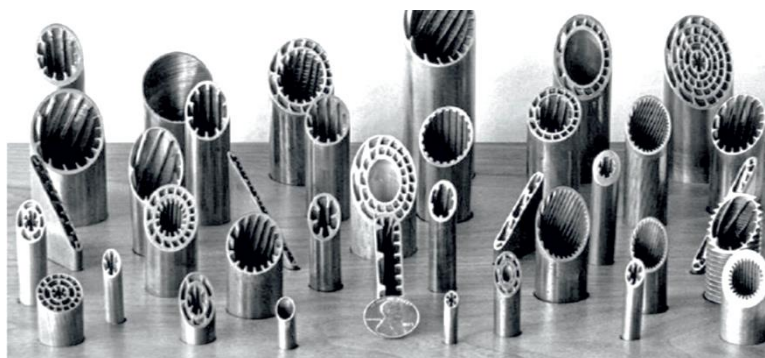


Рисунок 3 – Внутреннее оребрение алюминиевых труб, полученное экструдированием [9]

Трубы с волнистыми спиральными поверхностями формируются блоком наружных роликов [10]. Примеры спирально-профильных труб приведены на рис. 4.



Рисунок 4 – Спирально-профильные трубы

Наружные и внутренние спиральные выступы способствуют завихрению потока, ведущего к разрушению пограничного слоя, что уменьшает тепловое сопротивление и повышает коэффициент теплоотдачи [11]. Увеличение площади внутренней поверхности также повышает коэффициент теплоотдачи [12, 13].

Технологией, позволяющей варьировать параметрами получаемого макрорельефа в широком диапазоне типоразмеров, является технология деформирующего резания (ДР). Метод ДР успешно используется для наружного развития поверхности труб теплообменных аппаратов. МГТУ им. Н.Э. Баумана поставляло и поставляет монометаллические оребренные трубы из меди, титана, коррозионностойких и низколегированных сталей, мельхиора и алюминиевых сплавов десяткам предприятий, производящим теплообменную аппаратуру. Целью настоящего исследования является анализ возможностей использования метода деформирующего резания для получения теплообменного макрорельефа на внутренней поверхности теплообменных труб, а также проработка вариантов технической реализации, включающей схемы, инструмент и технологическую оснастку для осуществления предлагаемых методов.

2 Материалы и методы

Получение макрорельефов на внутренних поверхностях теплообменных труб с использованием метода ДР возможно по следующим вариантам:

2.1 Получение поперечного оребрения внутри трубы с использованием классической схемы ДР с подрезанием поверхностного слоя и его пластического деформирования в объем ранее образованной канавки. Возможности получения типоразмеров полученного оребрения будут практически соответствовать возможностям мелкошагового наружного оребрения, получаемого методом ДР [14]. Для внутреннего поперечного оребрения технологическими проблемами являются нежесткость инструмента, расположенного внутри трубы, и нерешенность технической реализации ввода и вывода инструмента на заданную глубину резания в процессе обработки внутренней поверхности для получения неоребранных участков в начале и конце трубы.

2.2 Использование метода ДР для получения продольного или спирального многозаходного оребрения внутри труб. В этом случае классический вариант использования метода ДР требует многозубого инструмента в виде протяжки. Количество режуще-деформирующих зубьев с геометрическими параметрами инструмента для ДР должно соответствовать требуемому количеству продольных канавок по длине окружности внутреннего диаметра. Проблемой также является возможность получения неоребранных участков а начале и конце трубы, а также большие осевые усилия на инструмент и заготовку от воздействия одновременно работающих режуще-деформирующих зубьев.

2.3 Формирование методом пластического деформирования неглубоких продольных рисок с последующим формированием поперечного оребрения внутри трубы. Неглубокие риски глубиной около 0,1 мм являются концентраторами напряжения, что приводит в процессе ДР к разрыву ребра по его длине с формированием теплообменной поверхности в виде штырьков. Штырьковые структуры перспективны как для интенсификации конвективного теплообмена, так и для повышения коэффициента теплоотдачи при конденсации на них паров теплоносителя.

2.4 Формирование методом пластического деформирования выступов с последующим формированием методом ДР поперечного оребрения внутри трубы, что приводит к формообразованию полноценной штырьковой структуры.

2.5 Использование ленты, оребренной методом ДР для последующего формирования герметичной трубы с внутренним микрорельефом.

2.6 Формирование одного или нескольких винтовых выступов-нарезов принудительно вращающимся или самовращающимся инструментом для ДР.

3 Результаты исследований

Рассмотрим более подробно технические особенности реализации вышеозначенных пунктов.

Получение поперечного внутреннего оребрения методом ДР по пункту 2.1 имеет ограниченное практическое значение для конвективного теплообмена, поскольку достаточно узкий межреберный зазор расположен перпендикулярно течению теплоносителя, который физически не может огибать боковые стороны ребер. Однако, в случае использования такой поверхности для внутритрубного кипения, поперечное оребрение может дать существенные преимущества, в первую очередь, связанные с многократным увеличением площади поверхности кипения и деформацией паровых пузырей в узком межреберном зазоре, значительно увеличивая коэффициент теплоотдачи и критические плотности теплового потока.

Этот вариант достаточно прост в реализации как для одно-, так и для многовершинного инструмента при ДР с получением одно- или многозаходного оребрения. Особенности получения многозаходного наружного оребрения описаны в работе [15]. На рис. 5 представлены

варианты одно-, двух- и четырехвершинного инструмента для получения внутреннего поперечного оребрения. Каждая из вершин режуще-деформирующей пластины заточена с геометрией инструмента для ДР. В качестве заготовок для заточки инструмента предлагается использовать стандартные сменные многогранные твердосплавные пластины. Э

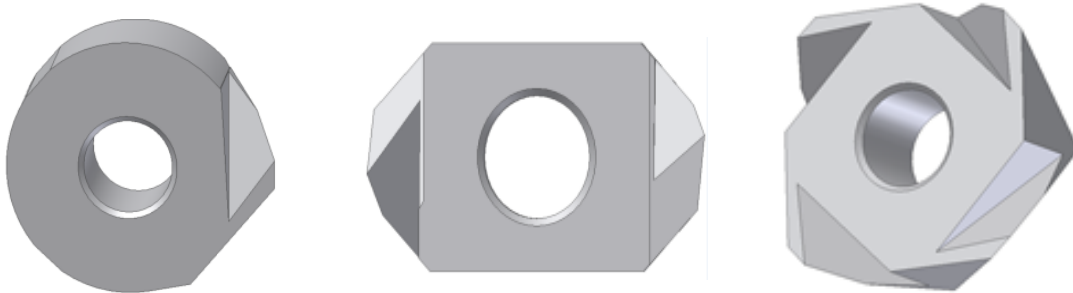


Рисунок 5 – Одно-, двух- и четырехвершинный инструмент ДР для внутреннего поперечного оребрения

Технически поперечное внутреннее оребрение для коротких трубных заготовок может быть реализовано при вращении трубной заготовки в шпинделе токарного станка и закреплении штанги с инструментом для ДР в пиноли задней бабки. Движение подачи инструмента осуществляется продольным суппортом, отодвигающим незакрепленную заднюю бабку.

Для длинномерных труб целесообразно движение подачи осуществлять трубной заготовкой при вращательном движении штанги с инструментом. На рис. 6 представлена такая схема реализации получения поперечного однозаходного оребрения 1 внутри трубной заготовки 2 одновершинным инструментом 3. Трубная заготовка 2 получает поступательное движение от ведущих роликов 4. Инструмент 3 для ДР имеет вращательное движение через штангу 5 от отдельного привода с регулируемым числом оборотов. Опорная втулка 6 со скользящей посадкой по внутреннему диаметру трубной заготовки компенсирует радиальные усилия при ДР, обеспечивая постоянство глубины ДР.

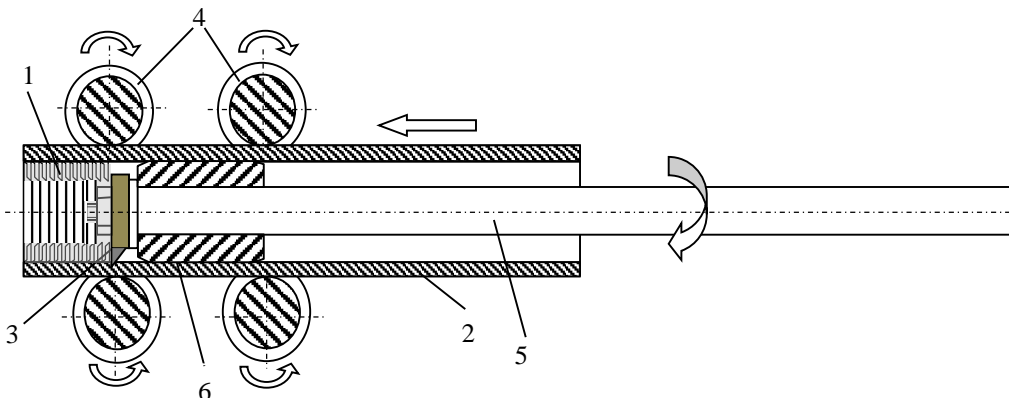


Рисунок 6 – Схема получения поперечного внутреннего оребрения внутри трубы.

Проработана принципиальная схема устройства подачи трубной заготовки с двумя парами металлических обрезиненных роликов, представленная на рис. 7. Привод состоит из электродвигателя 1, червячного редуктора 2, двух пар роликов 3 и двух пневмоцилиндров 4 осуществляющих сжатие роликами трубной заготовки.

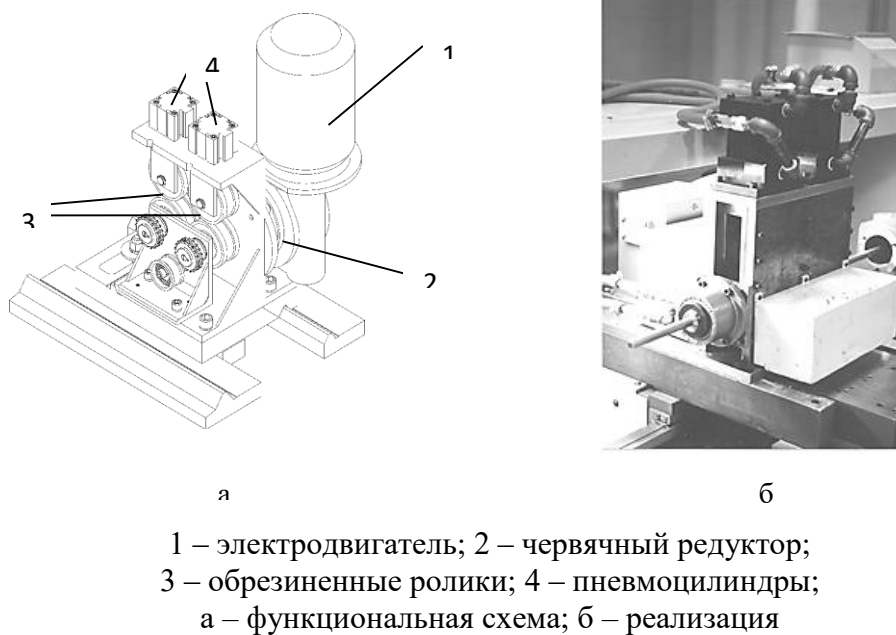
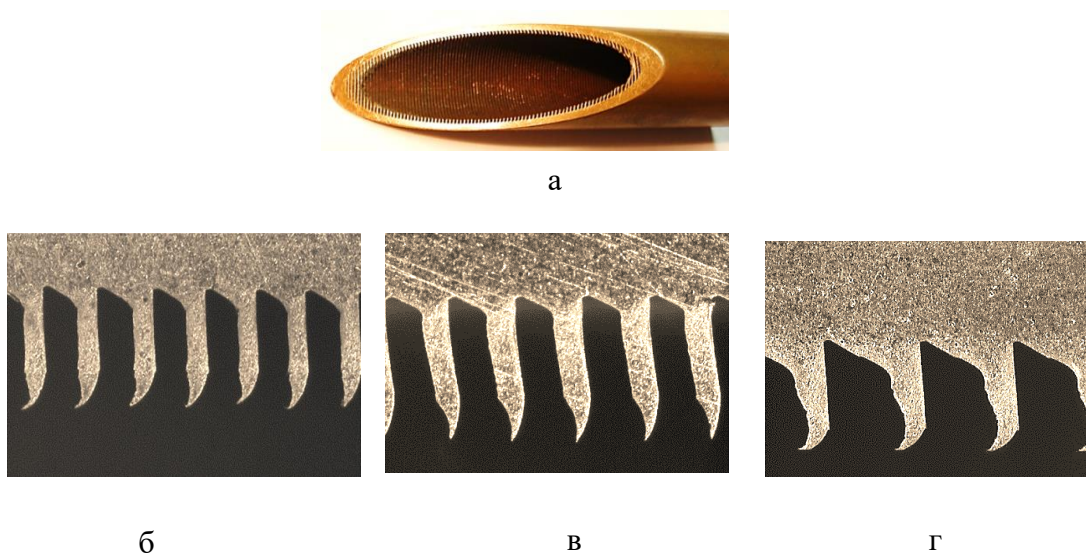


Рисунок 7 – Устройство подачи трубной заготовки с двумя парами металлических обрешенных роликов

Фотографии внутриорешенной трубы и срезов поперечного внутреннего однозаходного орешения представлены на рис. 8. Увеличение площади внутренней теплообменной поверхности после обработки составило 5,9 (рис. 8, б) и 5,3 раза (рис. 8, в).



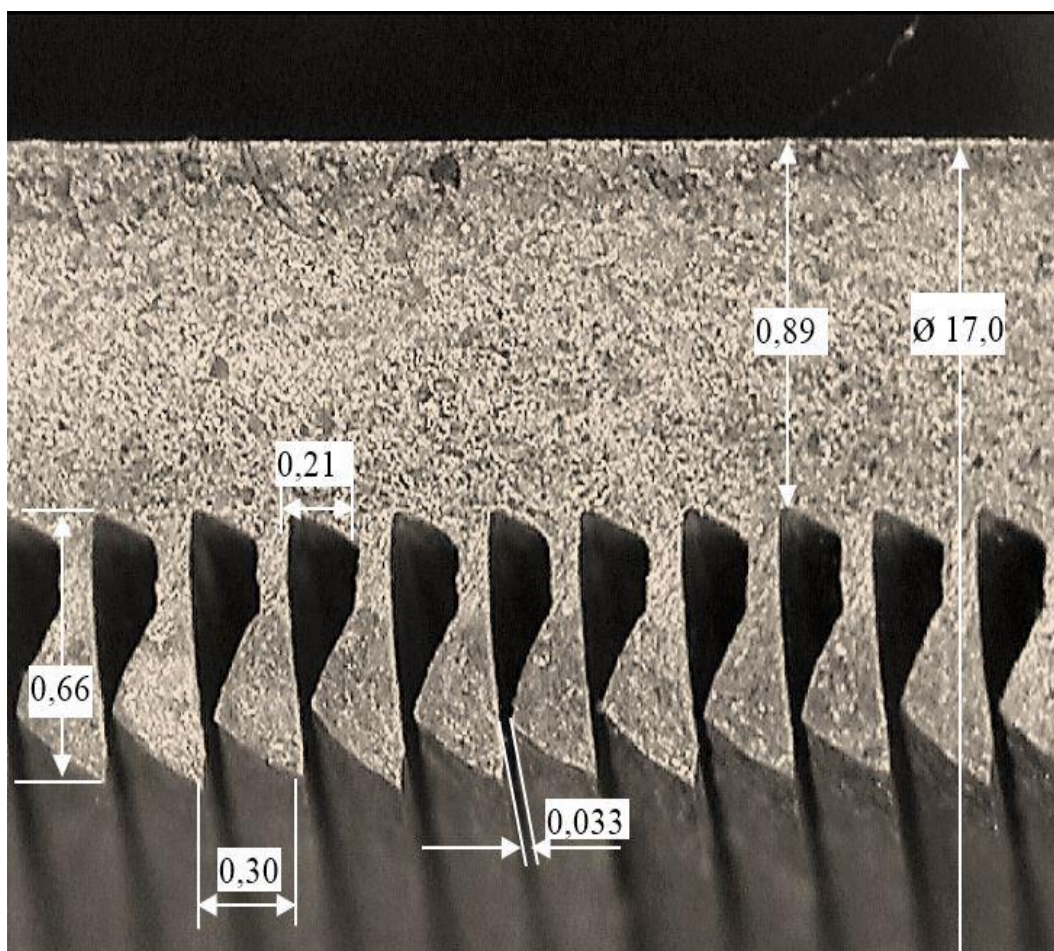
- а) наружный диаметр трубы 19,0 мм, шаг орешения 0,5 мм;
 высота ребер 0,8 мм;
б) шаг ребер 0,42 мм, высота ребер 1,0 мм;
в) шаг ребер 0,6 мм, высота ребер 1,3 мм;
г) шаг ребер 0,85 мм, высота ребер 1,0 мм

Рисунок 8 – Срезы внутреннего поперечного орешения, полученные методом ДР по п. 2.1 на меди М2

Для интенсификации пузырькового кипения перспективным является использование оребрения с внутренними подповерхностными полостями [16, 17]. Принципы получения подповерхностных полостей методом ДР описаны в [18]. Одним из вариантов является их получение инструментом со ступенчатой режущей кромкой. Вариант внутреннего оребрения использования такого инструмента для получения подповерхностных полостей представлен на рис. 9.

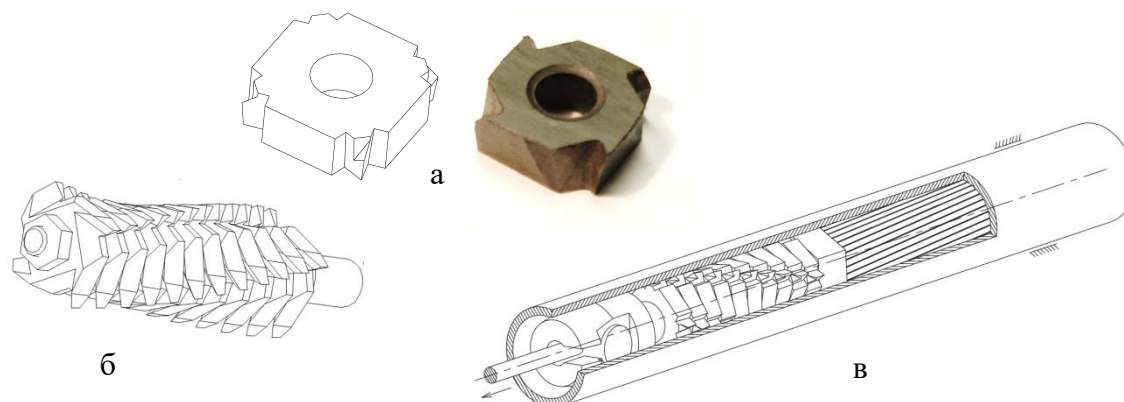
Для получения внутри трубы продольных или спиральных ребер методом ДР по пункту 2.2 предлагается использовать сборную многозубую режуще-деформирующую протяжку (рис. 10) с геометрическими параметрами режущего клина инструмента для ДР. В качестве заготовок для заточки режцовых частей протяжки предложено также использование стандартных четырехгранных твердосплавных пластин. Основой данного инструмента является сборка четырехзубых пластин, закрепленных на оправке. Все режущие элементы в данном инструменте имеют идентичную геометрию и повернуты на один и тот же угол относительно друг друга. Таким образом, обеспечивается равномерность распределения получаемых ребер по внутренней поверхности трубы.

Апробирована протяжка из 12 режуще-деформирующих четырехзубых пластин, которая позволяет получать на внутренней поверхности трубы с 48 ребрами по длине окружности при однократном осевом перемещении протяжки внутри трубы.



Медь М1. Начальная толщина стенки трубной заготовки 1,2 мм

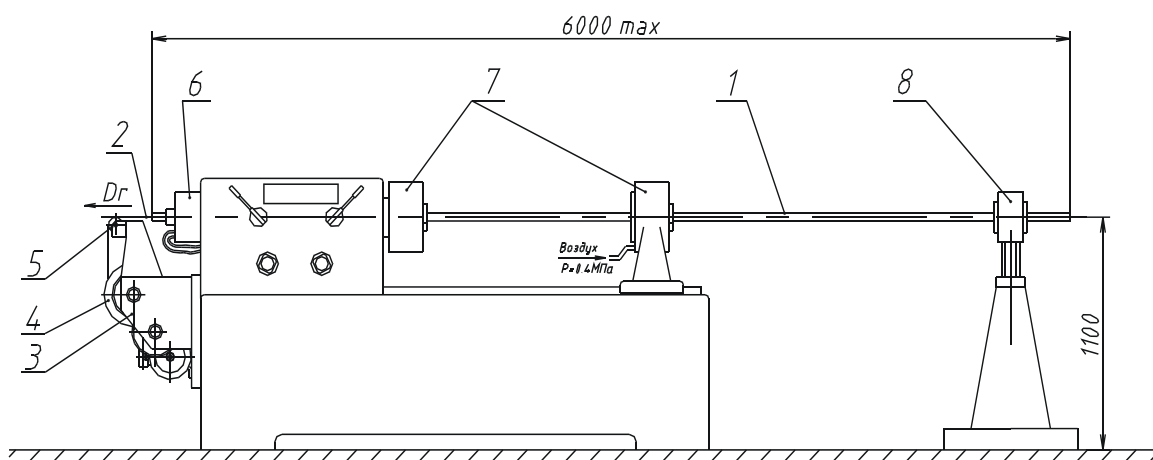
Рисунок 9 – Подповерхностные паровые полости для интенсификации пузырькового кипения на внутренней стороне трубы [18]



- а) модель и реальный режуще-деформирующий элемент протяжки;
 б) блок режуще-деформирующих элементов протяжки в сборе;
 в) формирование продольных ребер внутри трубы протяжкой

Рисунок 10 – Протяжка для получения продольных или спиральных ребер внутри трубы

Движение протяжки внутри трубы предлагается осуществлять тросом, пропущенным внутри трубы. Схема обработки показана на рис. 11. Установка выполнена на базе токарного станка и использует большую часть его элементов. Данный выбор был сделан ввиду широкой распространенности токарных станков, как вида оборудования и отсутствия необходимости кардинальной переделки токарного станка для использования его в качестве основы для установки внутреннего оребрения труб.



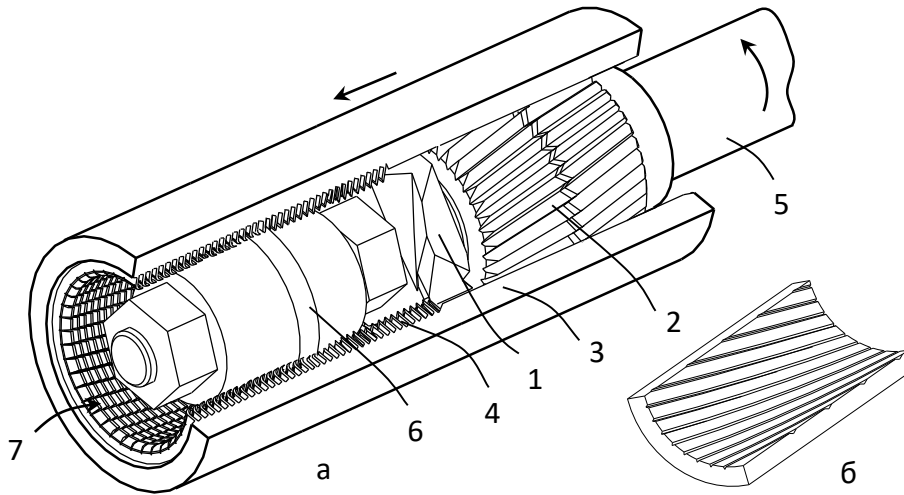
- 1 – трубная заготовка; 2 – трос; 3 – привод барабана; 4 – намоточный барабан;
 5 – ролик; 6 – пневмоцилиндр цангового патрона; 7 – цанговые зажимы;
 8 – поддерживающая стойка

Рисунок 11 – Принципиальная схема устройства для получения продольных или спиральных внутренних ребер режуще-деформирующей протяжкой

Трубная заготовка 1 закрепляется в цанговом зажиме 7, установленном в шпинделе станка. Цанговый зажим приводится в действие пневмоцилиндром 6. Для более надежной фиксации может использоваться второй пневматический цанговый зажим, расположенный на противоположном от шпинделя конце направляющих станка. При обработке длинномерных

труб (больше 4 метров), необходимо использовать стойку 8, которая предотвратит изгиб трубной заготовки под действием собственного веса. С левой стороны передней бабки крепится привод 3, состоящий из электромотора, редуктора и намоточного барабана 4.

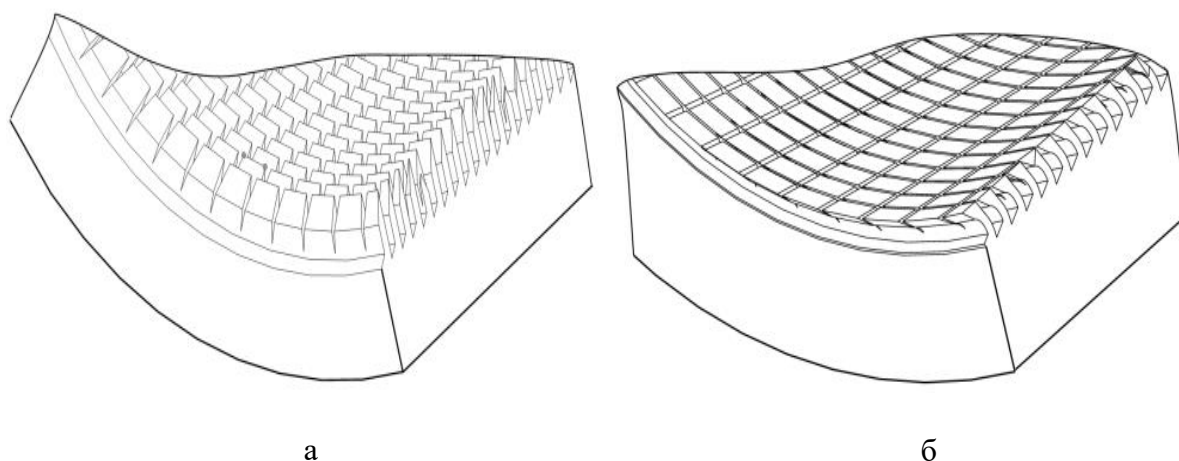
Метод ДР по пункту 2.3, сочетающий формирование продольных рисок и последующее деформирующее резание запатентован в США [19] и других странах. Риски, являясь концентраторами напряжений приводят к разрывам по длине образующегося при ДР ребра, формируя штырьковую структуру. Техническая сущность способа и инструментарий для его реализации поясняется на рис. 12.



а) модель процесса; б) поверхность трубной заготовки после деформирующей протяжки

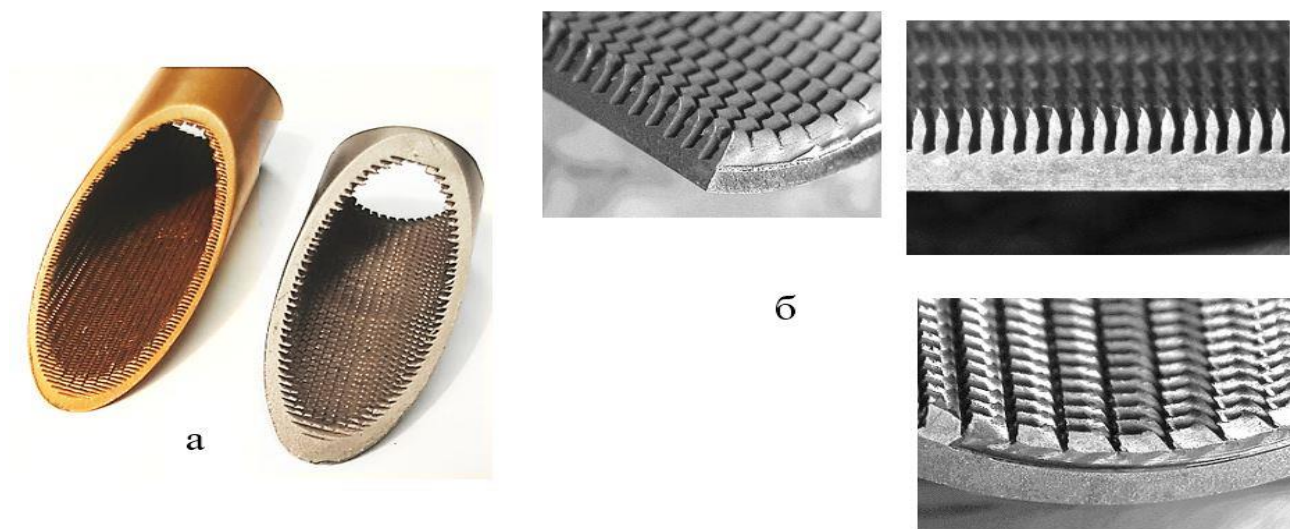
Рисунок 12 – Инструмент для формообразования развитой внутренней поверхности по методу ДР (пункт 2.3) [19]

На конце вращающейся внутри трубы 3 штанги 5 закреплен инструмент для ДР 1. На рис. 12 он показан одновершинным, хотя может быть многовершинным для повышения производительности. Перед инструментом установлена бочкообразная деформирующая протяжка 2 с наружными заостренными продольными или спиральными выступами треугольного профиля. Деформирующая протяжка имеет возможность свободного вращения на штанге 5. Диаметр по вершинам зубьев протяжки на десятые доли миллиметра больше внутреннего диаметра трубной заготовки. Результатом действия деформирующего инструмента является формирование неглубоких впадин на внутренней стороне трубной заготовки (рис.12, б). Треугольные выступы на деформирующем инструменте могут быть не параллельны оси трубы, что позволяет формировать наклонные канавки. Инструмент для ДР 1 подрезает поверхностный слой металла внутри трубы. Насечки, полученные деформирующим инструментом 2, являются концентраторами напряжения при образовании ребра методом ДР и обеспечивают его разрыв по длине, образуя штырьковую структуру 7 внутри трубы (рис. 13, а). Поверхность штырьковых структур эффективна для конденсации паров, поскольку острые вершины штырьков растягивают пленку конденсата, повышая коэффициент теплоотдачи [20]. Фотографии полученных по методу ДР (пункт 2.3) профилей поверхностей показаны на рис. 14.



а – штырьковые поверхности для конденсации, получаемые без использования выглаживателя;
б – поверхности пузырькового кипения, получаемые с использованием выглаживателя

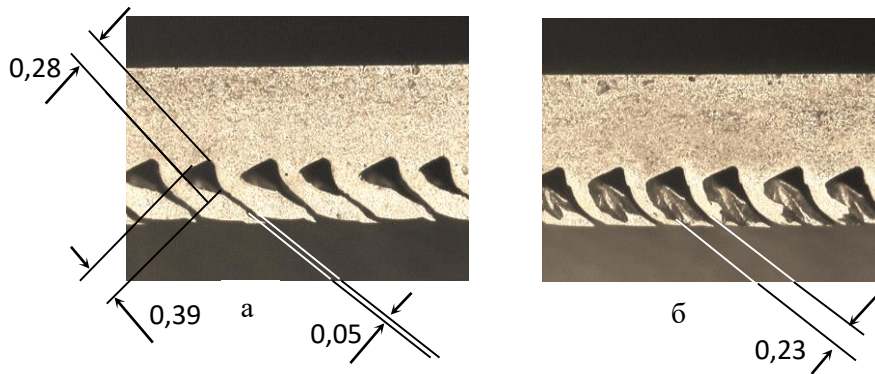
Рисунок 13 – Модели структур теплообменных, полученных по методу ДР (пункт 2.3)



Шаг ребер – 0,5 мм; высота рельефа – 1,2 мм;
а) медь М1 и мельхиор МНЖМц 30-1-1; б) срезы структур

Рисунок 14 – Теплообменная штырьковая поверхность, полученная по методу ДР (пункт 2.3)

Выглаживатель 6 (рис. 12) используется при необходимости получения полузамкнутых подповерхностных полостей, интенсифицирующих пузырьковое кипение. Модель такой поверхности показана на рис. 13, б, а срез структуры с характерными размерами показан на рис. 15.

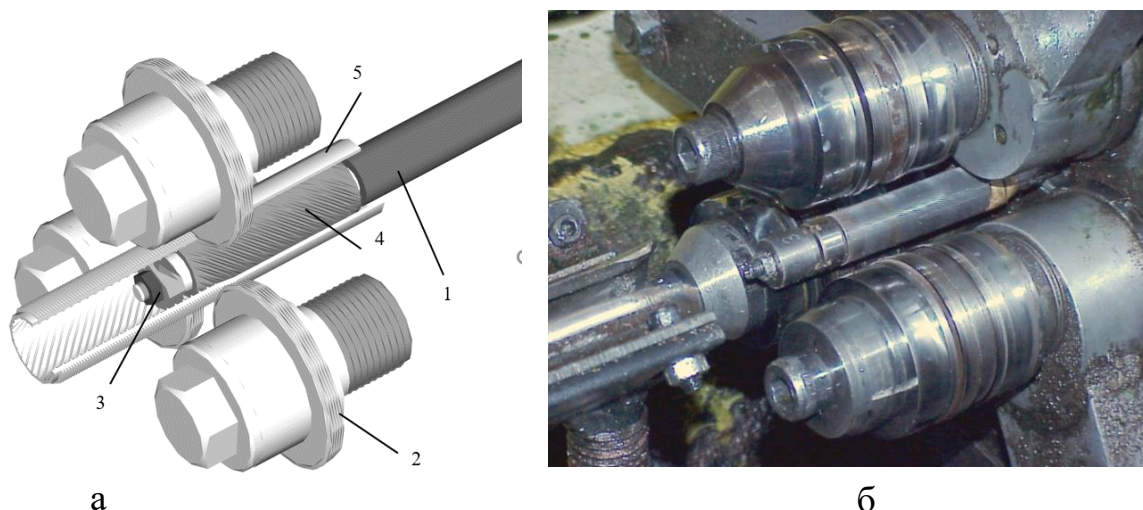


Материал – медь М1; шаг структуры – 0,53 мм, высота структуры – 0,58 мм;
 продольное сечение структуры: а) по подповерхностным полостям;
 б) в месте выхода пара

Рисунок 15 – Подповерхностные полости для интенсификации пузырькового кипения, полученные по методу ДР (пункт 2.3) с выглаживателем

По методу ДР (пункт 2.4) разработан способ, изображенный на рис. 16 [21]. На неподвижной штанге 1, расположенной внутри трубы 5 размещена свободно вращающаяся оправка 4 с винтовыми канавками. Воздействием снаружи трех вращающихся роликов 2 производится редуцирование диаметра трубы 5, при этом на внутренней поверхности трубы образуются выступы, соответствующие форме канавок оправки 4. Вращающиеся ролики 2 приводят также к вращению трубной заготовки 5. Инструмент для ДР 3, расположен на конце штанги 1. При вращении трубной заготовки 5 инструмент для ДР формирует из материала выступов штырьковую структуру.

Апробировано получение внутренних штырьковых поверхностей с различным количеством предварительно полученных выступов и шагом ДР.



а) модель процесса; б) фотография устройства реализации

Рисунок 16 – Реализация формирования штырьковых внутренних поверхностей по методу ДР (пункт 2.4)

Поверхность, полученная предлагаемым методом обработки, показана на рис. 17.

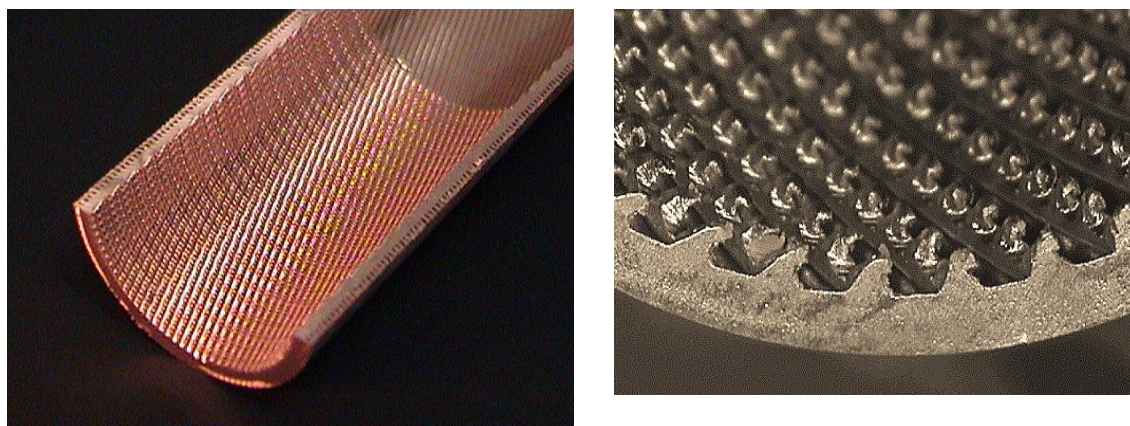
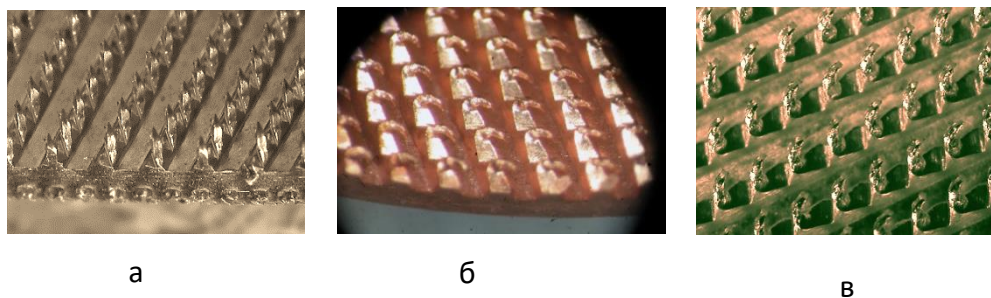


Рисунок 17 – Микроструктурированная штырьковая внутритрубная теплообменная поверхность, полученная методом ДР (пункт 2.4)

Форма штырьков управляема. Возможно получение прямых (игольчатых), крючкообразных штырьков и штырьков винтового типа (рис. 18). Принципы управления формой штырьков, получаемых ДР, изложены в работе [22].



а

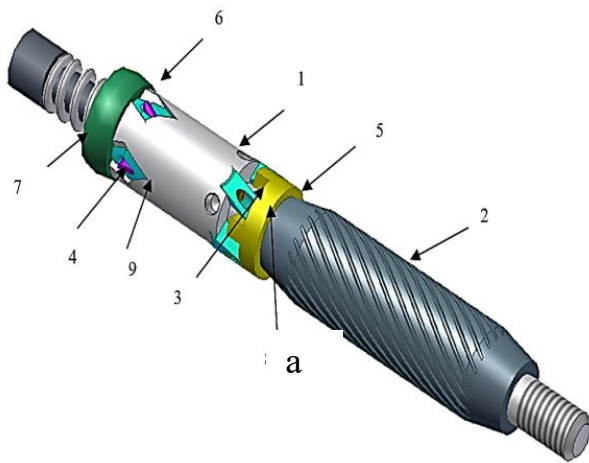
б

в

а) прямые (игольчатые); б) крючкообразные; в) винтовые

Рисунок 18 – Формы штырьков, получаемых методом ДР (пункт 2.4)

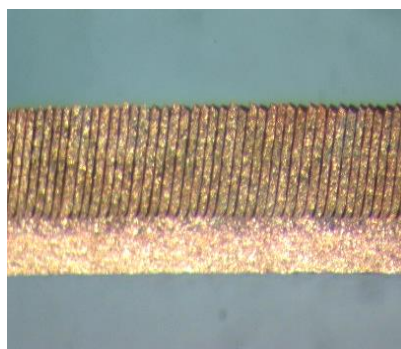
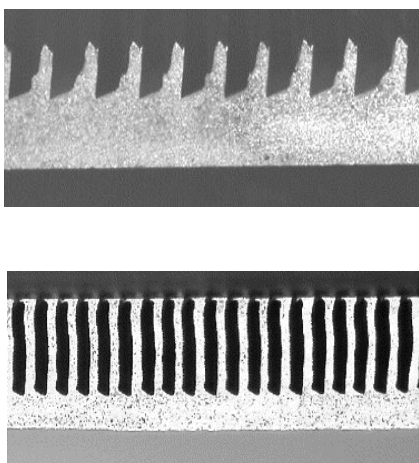
Инструмент, представленный на рис. 16, не позволяет оставлять гладкими начальный и конечный внутренний участок трубы, что необходимо в случае крепления труб в трубных досках развальцовкой. Разработан и запатентован инструмент для формирования штырьковой внутритрубной поверхности методом ДР по пункту 2.4 с возможностью выдвижения инструментов на глубину резания [23]. Основной особенностью разработанного инструмента (рис. 19) является автоматическое выдвижение режуще-деформирующих резовых вставок на требуемую глубину резания. Это осуществляется при сжатии трубы наружными вальцующими роликами, редуцирующими трубную заготовку. Сжатие наружных роликов приводит к торможению осевого перемещения оправки 2, что создает осевую силу, воздействующую на толкатель 5 державок 3 инструментов 9. Осевое перемещение державок 3 в силу их наклонного расположения по отношению к оси корпуса 1 приводит к увеличению диаметральных размеров инструмента для ДР 9, который осуществляет работу по формированию микроштырьков из ранее полученных спиральных выступов.



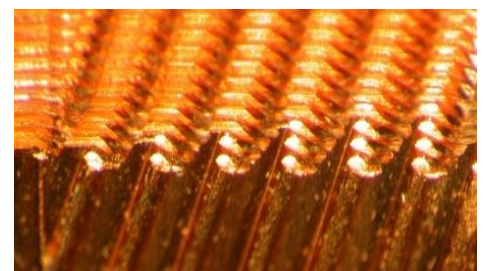
а) модель инструмента; б) инструмент в разобранном виде

Рисунок 19 – Инструмент с выдвижными резцами для формирования штырьковых внутренних поверхностей методом ДР по пункту 2.4

Получение микроструктурированной внутритрубной поверхности методом ДР по пункту 2.5 основано на формировании микрорельефа данным методом в виде ребер или штырьков на ленте с последующей вальцовкой ленты в трубу и герметизацией стыка сваркой или пайкой. Варианты оребренных и микроштырьковых структур на ленте показаны на рис. 20. Фотография готовой трубы после пайки приведена на рис. 21. Помимо интенсификации внутритрубного теплообмена, продольные внутренние микроканалы на стенке трубы могут быть использованы в качестве капиллярно-пористых структур тепловых труб (рис. 21). Апробировано получение межреберных зазоров от 3 мкм, способных поднимать жидкость на высоту до 500 мм при минимальном гидравлическом сопротивлении [24].



а



б

а) микрооробренные; б) микроштырьковые

Рисунок 20 – Структуры на ленте, полученные ДР (пункт 2.5)

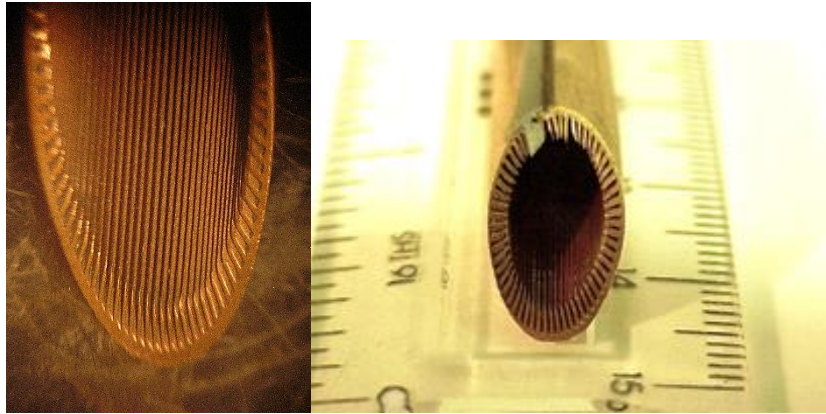
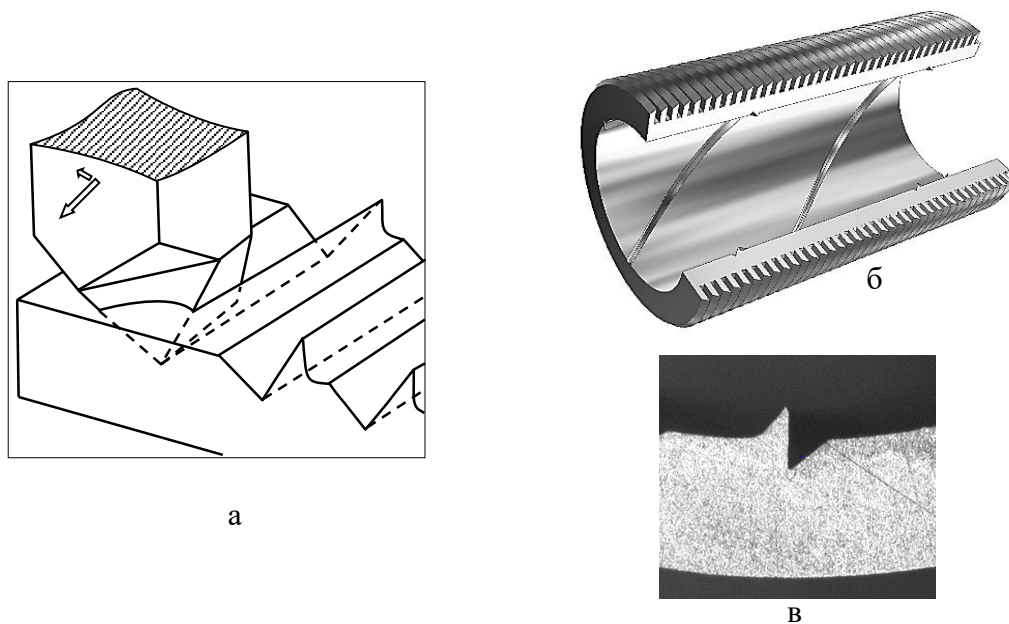


Рисунок 21 – Тепловая труба с внутренним продольным оребрением, полученная из оребренной ленты

Винтовые выступы-нарезы, полученные методом ДР по пункту 2.6, на внутренней поверхности трубы практически не увеличивают площадь теплообменной поверхности, но закручивая поток, значительно увеличивают коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы к теплоносителю за счет разрушения пристеночного слоя. Иллюстрация принципа получения выступов-нарезов, выступы-нарезы на внутренней стороне наружно-оребренной трубы и форма сечения выступа-нареза приведены на рис. 22.



а – схема формирования выступов-нарезов; б – выступы-нарезы на внутренней поверхности наружно-оребренной трубы; в – поперечное сечение выступа-нареза

Рисунок 22 – Получение выступов-нарезов

Форма и размеры выступов-нарезов управляются выбором геометрических параметров инструмента для ДР и глубиной деформирующего резания (рис. 23). Более подробно об особенностях ДР при работе инструмента с выдавкой подрезанного слоя на обрабатываемую поверхность изложено в работе [25].

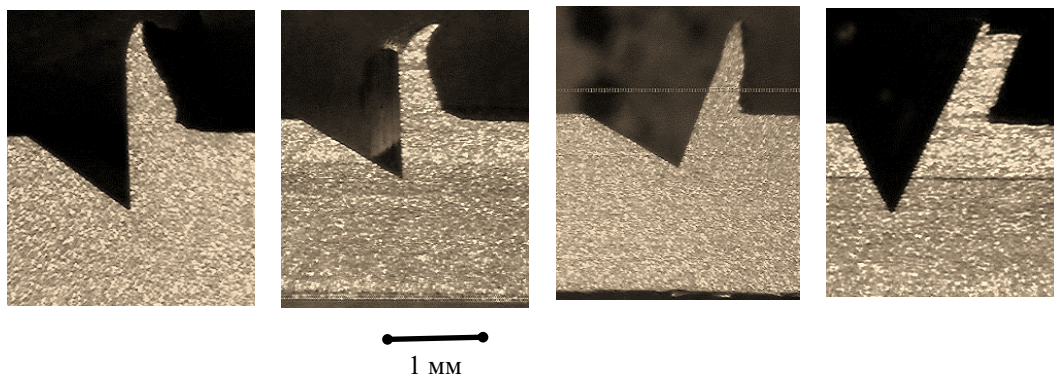


Рисунок 23 – Варианты форм выступов-нарезов на внутренней стенке теплообменной трубы

Получение одного или нескольких винтовых выступов-нарезов на внутренней стороне трубы методом ДР по пункту 2.6 предполагает необходимость движения инструмента относительно заготовки по винтовой линии, что осуществляется сочетанием относительного линейного и вращательного движений.

Требуемый угол подъема винтовой линии ребер-нарезов может обеспечиваться двумя вариантами:

– согласованное принудительное вращательно-поступательное движение заготовки относительно инструмента, либо инструмента относительно заготовки. Данный вариант обеспечивает строго заданный угол подъема винтовой линии при возможности его регулирования во всем возможном диапазоне, т.е. от нуля до практически 90° .

– использование несимметричности силовых нагрузок на режуще-деформирующий клин, которые при относительном поступательном движении будут обеспечивать самовращение осесимметричного инструмента с получением траектории относительного движения на внутренней стороне трубы в виде винтовой линии. Данный подход представляет несомненный интерес с технологической точки зрения, поскольку существенно упрощает техническую реализацию получения выступов-нарезов за счет отказа от привода вращательного движения, оставив только привод относительного поступательного движения. Однозначны также и недостатки данной схемы реализации: угол подъема винтовой линии будет зависеть от технологических параметров процесса деформирующего резания, которые определяют силовое взаимодействие инструмента и заготовки.

Согласованное принудительное вращательно-поступательное движение заготовки относительно инструмента можно осуществить любым из следующих вариантов:

– заготовка неподвижна, инструмент на штанге вращается и имеет движение подачи вдоль трубной заготовки. Привод вращения инструмента устанавливается на тянущее устройство. Схема рекомендуется для обработки длинномерных заготовок.

– инструмент неподвижен, трубная заготовка вращается и движется вдоль оси. Схема перспективна, особенно, для обработки длинномерных заготовок. Одновременное вращение и линейное перемещение трубной заготовки можно осуществить приводом из трех скрещиваю-

щихся роликов. Угол скрещивания роликов определяет соотношение вращательного и поступательного движения, т.е. угол подъема винтовой линии выступов-нарезов. Существенным недостатком схемы является сложность кинематики привода скрещивающихся ведущих валов.

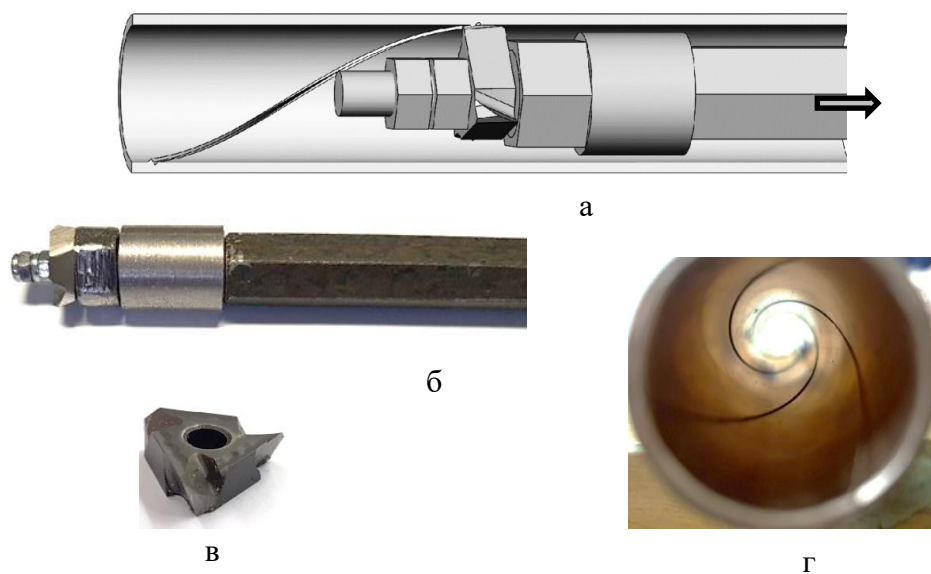
– вращается только инструмент, заготовка имеет линейное перемещение. Данная схема также перспективна для обработки длинномерных заготовок. Необходим привод линейного перемещения трубной заготовки, аналогичный показанному на рис. 11 и неподвижный привод вращения штанги с инструментом.

– вращается только заготовка, инструмент линейно перемещается. Схема наиболее технологична для обработки коротких труб непосредственно на токарном станке. Труба зажимается в кулачках патрона, штанга с инструментом закрепляется в задней бабке, которая отодвигается продольным суппортом на автоматической подаче, вытягивая инструмент из трубы.

Каждая из рассмотренных схем имеет свои преимущества и недостатки и имеет право на реализацию в зависимости от серийности производства, длины труб, необходимости одновременной обработки наружной поверхности и других факторов.

Помимо использования схемы с принудительным вращательным движением инструмента и/или заготовки апробирован вариант получения выступов-нарезов за счет самовращения инструмента для ДР. Данный вариант не требует принудительного вращения инструмента или трубной заготовки. Инструмент имеет скользящую посадку на оправке и за счет несимметричности нагрузок на передней и задней поверхностях инструмента автоматически поворачивается при его движении вдоль трубы, создавая винтовой нарез-выступ. Управление несимметричностью нагрузки (углом подъема винтовой линии) осуществляется изменением положения передней и/или задней поверхности. На практике наиболее простым способом оказалось управление за счет изменения заднего угла. Данная схема имеет существенные преимущества по простоте реализации, однако, угол подъема винтовой линии ограничен величиной 20° к оси трубы.

На рис. 24 показан инструментарий для реализации получения выступов-нарезов самовращающимся трехзубым инструментом.



глубина нарезов равна высоте выступов – 0,5 мм;
 а) модель процесса; б) оправка с инструментом; в) режуще-деформирующая пластина; г) результат обработки на медной трубе

Рисунок 24 – Реализация получения трехвинтовых выступов-нарезов самовращающимся инструментом

Схема реализована на коротких трубах с закреплением трубной заготовки в патроне и закреплением штанги с инструментом в резцедержателе. Движение инструмента осуществлялось ускоренной подачей продольного суппорта без вращения шпинделя. Исследованиями [26] доказана тепловая эффективность получаемых выступов-нарезов при интенсификации внутритрубного теплообмена при незначительном увеличении их гидравлического сопротивления [27].

4 Обсуждение и заключение

Анализ существующих схем увеличения площади внутренней поверхности теплообменных труб или создания внутри труб интенсификаторов теплообменных процессов показывает обоснованную целесообразность и перспективность использования метода деформирующего резания для создания внутритрубных развитых поверхностных структур. Метод ДР сочетает лезвийную обработку для получения на обрабатываемой поверхности подрезанных слоев металла без их отделения от основы и их одновременное пластическое деформирование. Возможности метода ДР заключаются в получении множества вариантов, в том числе представленных в работе, формирования на внутренней поверхности теплообменных труб макроструктуры в виде оребрения, микроштырьков и выступов-нарезов треугольного профиля с управляемыми геометрическими параметрами. Это обеспечивает возможность увеличения площади внутренней поверхности труб на величину до 5,9 раз. Предложено использование метода ДР для внутритрубной интенсификации конвективного, испарительного и конденсационного теплообмена, что актуально для теплообменных аппаратов на основе труб. Качественно проанализированы важные вопросы технологичности методов ДР, при этом представляет большой интерес количественная оценка трудоемкости и др. показателей данных методов, что может быть раскрыто в дальнейших исследованиях.

Список литературы

- 1 Luanfang D., Xiang L., Hao P. Flow and heat transfer characteristics of a double-tube structure internal finned tube with blossom shape internal fins. *Applied Thermal Engineering*, 2018. vol. 128. P. 1102–1115. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.026.
- 2 Pat. US 5,975,196. Heat transfer tube / D. Gaffaney, S. Spencer, D. Bennett et al. 1999.
- 3 Pat. US 6,176,301. Heat transfer tube with crack-like cavities to enhance performance thereof / D. Bennett, L. Tang. 2001.
- 4 Pat. US 6,883,597. Heat transfer tube with grooved inner surface / P. Thors, R. Narayanamurthy. 2005.
- 5 Pat. US 4733698. Heat transfer tube / Y. Sato. 1988.
- 6 Pat. US 5781996. Method of manufacturing heat transfer tube / Steven J. Spencer. 1998.
- 7 EP 2216615. Heat transfer tube and method for its production / A. Beutler, J. Hajal, 2014.
- 8 Compact and Efficient Solutions with Enhanced Heat transfer Surfaces. J. Moreno, Wieland Thermal Solutions. Presentations from the I-ThERM workshop in Industrial Thermal Energy Recovery, Conversion and Management, 24 October 2017, Brunel University, UK. http://www.itherm-project.eu/wp-content/uploads/2017/11/08_JesusMoreno_Brunel-London-2017.pdf.
- 9 Афанасьева, И. В. Перспективные методы оребрения теплообменных аппаратов // Современные наукоемкие технологии. 2019. – з № 7. – с.114-121.
- 10 Вайцехович, С. М. Спирально-профильные трубы: преимущества и перспективы применения в теплообменных аппаратах // Технология машиностроения. 2011. – № 12. – С. 31–37.
- 11 Rohit S.N., Balaji C. Synergistic analysis of heat transfer characteristics of an internally finned two phase closed thermosiphon. *Applied Thermal Engineering*. 2016. vol. 101. P. 720–729. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.084.

- 12 Swastik A., Sukanta K.D. Natural convection heat transfer from a horizontal hollow cylinder with internal longitudinal fins. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. vol. 134. P. 40–53. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.039.
- 13 Luanfang D., Xiang L., Hao P. Flow and heat transfer characteristics of a double-tube structure internal finned tube with blossom shape internal fins. *Applied Thermal Engineering*, 2018. vol. 128. P. 1102–1115. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.026.
- 14 Зубков Н.Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев // *Новости теплоснабжения*. – 2005. – № 4. – С. 51-53.
- 15 Zubkov N. Multitool deformation and cutting in applying fins to heat-exchanger pipe. // *Russian Engineering Research*. 2015. – V. 35, Issue 11, – pp 859-863.
- 16 Kim N., Choi K. Nucleate pool boiling on structured enhanced tubes having pores with connecting gaps // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2001. – No.44. – С. 17–28.
- 17 Володин, О. А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // *Теплофизика высоких температур*, 2021. - Т. 59. – № 2. - с.280-312. DOI: 10.31857/S0040364421020149.
- 18 Зубков, Н.Н. Получение подповерхностных полостей деформирующим резанием для интенсификации пузырькового кипения // *Вестник машиностроения*. – 2014. – № 11. –С. 75-79.
- 19 Pat.US 8573022. Method for making enhanced heat transfer surfaces / P.Thors, N. Zoubkov. 2013.
- 20 Попов И. А., Махьянов Х. М., Гуреев В. М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена // *Казань: Центр инновационных технологий*. – 2009. – 560 с.
- 21 Pat US 7637012. Method of forming protrusions on the inner surface of a tube / P.Thors, N. Zoubkov. 2009.
- 22 Получение штырьковых структур для кипения азота. / Зубков Н.Н., Трофимович А.С., Овчинников А.И. и др. // *Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: машиностроение*. – 2013. – Т.1, № 1. – С. 100-109.
- 23 Pat. US 7509828. Tool for making enhanced heat transfer surfaces / P.Thors, N. Zoubkov; 2009.
- 24 Zubkov N, Yakomaskin A. Microgrooved Wicks for Heat Pipes Made by Edge Cutting Machining // *Second International Conference “Heat Pipes for Space Application” [Электронный ресурс]: материалы конф. – Электрон. дан. — Москва: 2014. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM), – Загл. с этикетки диска. – ISBN 978-5-9901909-2-4 – 6 стр.*
- 25 Зубков Н.Н. Однопроходное формирование резьб на пластичных металлах деформирующим резанием // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 6–17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-6-17.
- 26 Thermohydraulic Efficiency of Tubes with Internal Spiral Finning / Skrypnik A.N., Shchelchikov A.V., Popov I. A. et al. // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2018. – Vol.91, No. 1. – pp. 52-63. DOI 10.1007/s10891-018-1718-y.
- 27 Hydraulic resistance of tubes with internal helical finning designed by deforming cutting. I.A. Popov, A.V. Shchelchikov, A.N.Skrypnik, et al. // *Journal of physics: conference series*. – 2018. – V. 980. – 012004. doi:10.1088/1742-6596/980/1/012004.

References

- 1 Luanfang D., Xiang L., Hao P. Flow and heat transfer characteristics of a double-tube structure internal finned tube with blossom shape internal fins. *Applied Thermal Engineering*, 2018. vol. 128. P. 1102–1115. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.026.
- 2 Pat. US 5,975,196. Heat transfer tube / D. Gaffaney, S. Spencer, D.Bennett et al. 1999.
- 3 Pat. US 6,176,301. Heat transfer tube with crack-like cavities to enhance performance thereof / D. Bennett, L. Tang.2001.

- 4 Pat. US 6,883,597. Heat transfer tube with grooved inner surface / P. Thors, R. Narayana-murthy. 2005.
- 5 Pat. US 4733698. Heat transfer tube / Y. Sato. 1988.
- 6 Pat. US 5781996. Method of manufacturing heat transfer tube / Steven J. Spencer. 1998.
- 7 EP 2216615. Heat transfer tube and method for its production / A. Beutler, J. Hajal, 2014.
- 8 Compact and Efficient Solutions with Enhanced Heat transfer Surfaces. J. Moreno, Wieland Thermal Solutions. Presentations from the I-ThERM workshop in Industrial Thermal Energy Recovery, Conversion and Management, 24 October 2017, Brunel University, UK. http://www.itherm-project.eu/wp-content/uploads/2017/11/08_Jesus_Moreno_Brunel-London-2017.pdf.
- 9 Afanas'yeva I.V. Perspektivnyye metody orebreniya teploobmennyykh apparatov (Promising methods of finning heat exchangers). *Sovremennyye naukoymekkiye tekhnologii*. 2019. № 7. с.114-121. (In Russian).
- 10 Vaytsekhovich S. M. Spirallyno-profil'nyye trubyy: preimushchestva i perspektivy primeneniya v teploobmennyykh apparatakh (Spiral profile pipes: advantages and prospects of application in heat exchangers) // *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2011, № 12. S. 31–37. (In Russian).
- 11 Rohit S.N., Balaji C. Synergistic analysis of heat transfer characteristics of an internally finned two phase closed thermosiphon. *Applied Thermal Engineering*. 2016. vol. 101. P. 720–729. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.084.
- 12 Swastik A., Sukanta K.D. Natural convection heat transfer from a horizontal hollow cylinder with internal longitudinal fins. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. vol. 134. P. 40–53. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.039.
- 13 Luanfang D., Xiang L., Hao P. Flow and heat transfer characteristics of a double-tube structure internal finned tube with blossom shape internal fins. *Applied Thermal Engineering*, 2018. vol. 128. P. 1102–1115. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.026.
- 14 Zubkov N.N. Orebreniye trub teploobmennyykh apparatov podrezaniyem i otgibkoy poverkhnostnykh slojev (Finning of heat exchanger tubes by undercutting and bending of surface layers) // *Novosti teplosnabzheniya*. – 2005. – № 4. – S. 51-53. (In Russian).
- 15 Zubkov N. Multitool deformation and cutting in applying fins to heat-exchanger pipe. // *Russian Engineering Research*. 2015. – V. 35, Issue 11, – pp 859-863. (In Russian).
- 16 Kim N., Choi K. Nucleate pool boiling on structured enhanced tubes having pores with connecting gaps // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2001. – No.44. – C. 17–28.
- 17 Volodin O A, Pecherkin N.I., Pavlenko A.N. Intensifikatsiya teploobmena pri kipenii i isparenii zhidkostey na modifitsirovannykh poverkhnostyakh (Intensification of heat exchange during boiling and evaporation of liquids on modified surfaces) // *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2021, T. 59, № 2, s.280-312. DOI: 10.31857/S0040364421020149. (In Russian).
- 18 Zubkov N.N. Polucheniye podpoverkhnostnykh polostey deformiruyushchim rezaniyem dlya intensivatsii puzyr'kovogo kipeniya (Obtaining subsurface cavities by deformational cutting to intensify bubble boiling) // *Vestnik mashinostroyeniya*. – 2014. – № 11. –S. 75-79. (In Russian).
- 19 Pat.US 8573022. Method for making enhanced heat transfer surfaces / P.Thors, N. Zoubkov. 2013.
- 20 Popov I. A., Makhyanov KH. M., Gureyev V. M. Fizicheskiye osnovy i promyshlennoye primeneniye intensivatsii teploobmena (Physical basis and industrial application of heat exchange intensification) // *Kazan': Tsentri innovatsionnykh tekhnologiy*. – 2009. – 560 s. (In Russian).
- 21 Pat US 7637012. Method of forming protrusions on the inner surface of a tube / P.Thors, N. Zoubkov. 2009.
- 22 Polucheniye shtyr'kovykh struktur dlya kipeniya azota (Obtaining pin-fin structures for nitrogen boiling) / Zubkov N.N., Trofimovich A.S., Ovchinnikov A.I. i dr. // *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: mashinostroyeniye*. – 2013. – T.1, № 1. – C. 100-109. (In Russian).
- 23 Pat. US 7509828. Tool for making enhanced heat transfer surfaces / P.Thors, N. Zoubkov; 2009.

24 Zubkov N, Yakomaskin A. Microgrooved Wicks for Heat Pipes Made by Edge Cutting Machining // Second International Conference “Heat Pipes for Space Application” [Elektronnyy resurs]: materialy konf. – Elektron. dan. — Moskva: 2014. — 1 elektron. opt. disk (CD-ROM), – Zagl. s etiketki diska. – ISBN 978-5-9901909-2-4 – 6 p.

25 Zubkov N.N. Single pass formation of threads on ductile metals by deformational cutting. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 6–17. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-6-17. (In Russian).

26 Thermohydraulic Efficiency of Tubes with Internal Spiral Finning / Skrypnik A.N., Shchelchkov A.V., Popov I. A. et al. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2018. – Vol.91, No. 1. – pp. 52-63. DOI 10.1007/s10891-018-1718-y.

27 Hydraulic resistance of tubes with internal helical finning designed by deformational cutting. I.A. Popov, A.V. Shchelchkov, A.N.Skrypnik, et al. // Journal of physics: conference series. – 2018. – V. 980. – 012004. doi:10.1088/1742-6596/980/1/012004.

© Зубков Н.Н., 2023

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-35-48



УДК 621.03

UDC 621.03

2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

2.5.6 – Технология машиностроения

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ СТРУИ НА ПОВЕРХНОСТЬ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

ANALYSIS OF MORPHOLOGY UNDER THE INFLUENCE OF AN ELECTROLYTIC JET ON THE SURFACE OF STAINLESS STEEL

✉¹ Попов Александр Иннокентьевич, к.т.н., доцент, Высшая школа машиностроения, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, e-mail: popov_ai@spbstu.ru

✉¹ Popov Alexander Innokentievich, ph.d., associate professor, higher school of mechanical engineering, Peter the great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, e-mail: popov_ai@spbstu.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию воздействия электролитической струи на поверхность металлического анода. Исследования проводили в режиме электролиза с исследованием перехода к режиму электролитно-плазменной обработки. Особое внимание в работе уделено механизмам формирования морфологии поверхности нержавеющей стали 08X18H9T, AISI 301, AISI 304. Показано, что для разных сталей процесс электрохимического растворения материала анода сопровождается разными механизмами растворения микронеровностей микропрофиля. Исследованы вольт-амперные характеристики процесса в диапазоне напряжений в интервале 20–250 В. Рассмотрено влияние убыли массы материала анода от величины тока. Исследована морфология сталей при разных технологических режимах и в разных точках контакта электролитической струи с поверхностью. Рассмотрены критерии, сопровождающие переход к электролитно-плазменному режиму от режима электролиза. Исследовано влияние электролитической струи на сформированные механической обработкой риски на поверхности анода. Рассмотрено влияние напряжения на формируемый параметр шероховатости поверхности Ra. Выполнен расчет

Annotation. This article is devoted to the study of the effect of an electrolytic jet on the surface of a metal anode. The studies were carried out in the electrolysis mode with a transition to the electrolyte-plasma treatment mode. Particular attention in the work is paid to the mechanisms of formation of the surface morphology of stainless steels 08X18H9T, AISI 301, AISI 304. It has been shown that for different steels the process of electrochemical dissolution of the anode material is accompanied by different mechanisms of dissolution of microirregularities in the microprofile. The current-voltage characteristics of the process were studied in the voltage range from 20–250 V. The influence of the rate of loss of the mass of the anode material on the current value was considered. The surface morphology was studied under different technological conditions and at different points of the electrolytic jet. The criteria that accompany the transition to the electrolyte-plasma mode from the electrolysis mode are considered. The influence of an electrolytic jet on the marks formed by mechanical processing on the anode surface was studied. The influence of stress on the formed surface roughness parameter Ra is considered. The electric field strength for surface nanodefects was calculated

напряженности электрического поля для нанодефектов поверхности в программе Comsol Multithysics. Результаты данной работы могут быть использованы для развития технологии обработки турбинных лопаток, электрохимической резки и нанообработки материалов.

using the Comsol Multithysics program. The results of this work can be used for the development of technology for processing turbine blades, electrochemical cutting and nanoprocessing of materials.

Ключевые слова: НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ, ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКАЯ СТРУЯ, МОРФОЛОГИЯ, ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ, УБЫЛЬ МАССЫ, ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Keywords: STAINLESS STEEL, ELECTROLYTIC JET, MORPHOLOGY, SURFACE ROUGHNESS, WEIGHT LOSS, ELECTROSTATIC MODELING.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Развитие новых технологических методов размерной и финишной обработки во многом осуществляется на базе уже состоявшихся технологий и стимулируется активным поиском инновационных решений для обеспечения технологического рывка России [1-3]. Среди таких базовых технологий размерной обработки электрохимическая обработка изделий в электролитической ванне занимает значительное место. Она характеризуется низкими напряжениями в интервале $U = 3 \dots 60$ В, большими величинами применяемых токов ($I = 10000$ А) и, следовательно, высокими скоростями удаления материала анода [4-8]. Размерная электрохимическая обработка является конкурирующим методом лезвийной обработки материалов, к которой относятся точение, фрезерование, строгание, долбление, шлифование и др. Кроме этого, она может являться конкурирующей обработкой для раскрытия материала такими методами как плазменная, газопламенная, лазерная резка, комбинированная струйно-абразивная обработка [9-11]. Однако методы струйной обработки на сегодня недостаточно изучены. Известно о применении электролитической струи при выполнении операций прошивания отверстий и поверхностной обработке [12-15]. Однако мало сведений об использовании струи электролита в диапазоне напряжений $U = 60 \dots 200$ В для размерной обработки и резки материалов [16-18]. На наш взгляд, заполнение вакуума информации в этой области может привести к формированию нового метода размерной и раскройной технологий обработки материалов. Целью исследования является изучение механизмов воздействия электролитической струи на поверхность материала анода. Задачами работы являются построение вольтамперной характеристики (ВАХ) при разных объемных расходах электролита, оценка морфологии поверхности, оценка убыли массы образцов в процессе струйной обработки, выявление границ перехода от процессов электролиза к электролитно-плазменной обработке

2 Материалы и методы

В качестве установки для исследований мы применяли прототип установки струйной обработки [19]. Принципиальная схема установки приведена на рис.1. В качестве анода использовали образцы $40 \times 50 \times 1$ мм из нержавеющей сталей 08X18H9T, AISI 301 и AISI 304 с исходным параметром шероховатости $Ra = 0,8 \dots 12$ мкм. Межэлектродный зазор h между полым катодом (медной трубкой с внутренним диаметром $\varnothing 3$ мм и наружным $\varnothing 5$ мм) и анодом (пластиной из нержавеющей стали) составил $1 \dots 4,5$ мм. Исследования проводили при перемещении полого катода с подачей, равной $S = 180 \dots 500$ мм/мин. Исходная температура

подаваемого в полый катод электролита была $T = 20^\circ \text{C}$. Определение вольт-амперной характеристики проводили при разных объемных расходах электролита. Для свободнопадающей струи электролита объемный расход составил $Q = 33$ л/ч, а при подаче электролита под давлением с использованием лопастного насоса объемный расход составил $Q = 88$ л/ч. Время исследований для опытов составляло 60, 120, 180 с. В качестве электролита использовался раствор K_2SO_4 с концентрацией $K = 5$ г/л и раствор нитрата аммония NH_4NO_3 с концентрацией до $K = 20 \dots 40$ г/л. Измерение объемного расхода электролита проводили с помощью мерного стакана (ГОСТ 1770–74). Время прохождения электролита фиксировалось секундомером. Рабочее напряжение варьировали в интервале $U = 20 \dots 300$ В. Напряжение контролировали щитовым вольтметром Omix DV–1–0.5. Величину тока измеряли токовыми клещами UT210D.

Расчет напряженности электрического поля производили при использовании программы Comsol Multithysics.

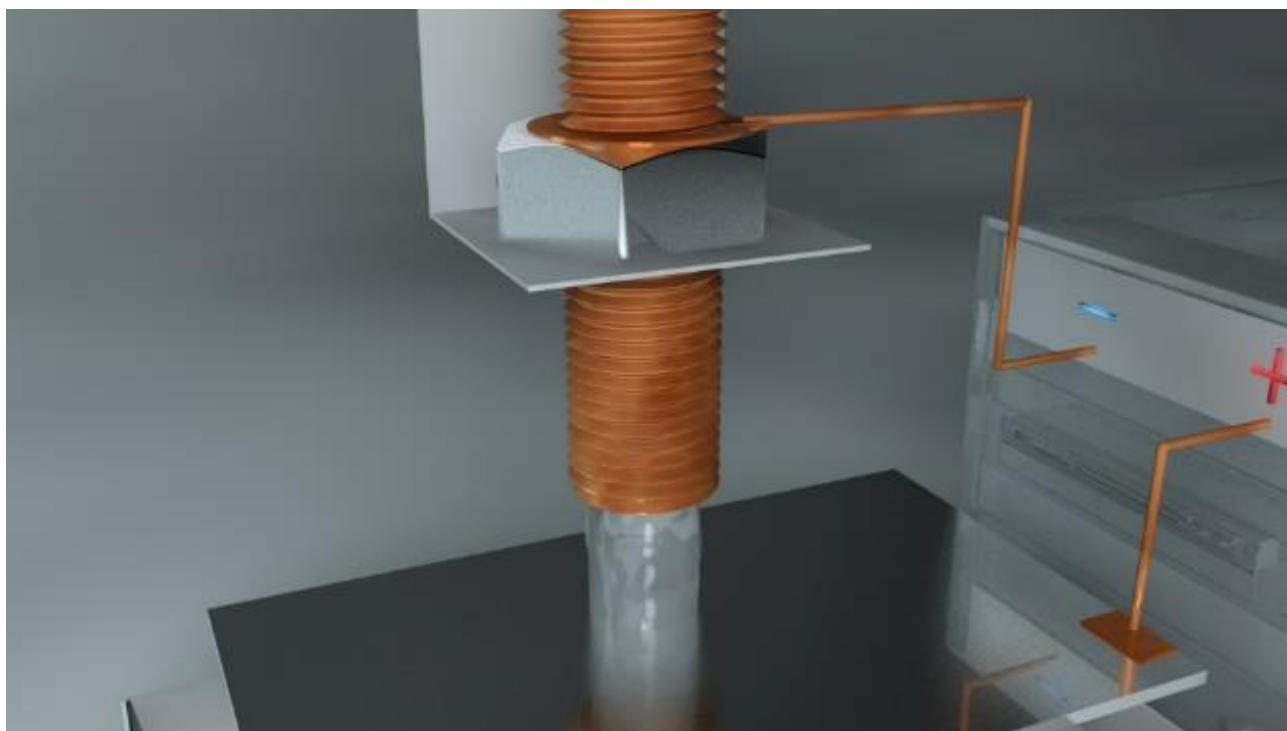
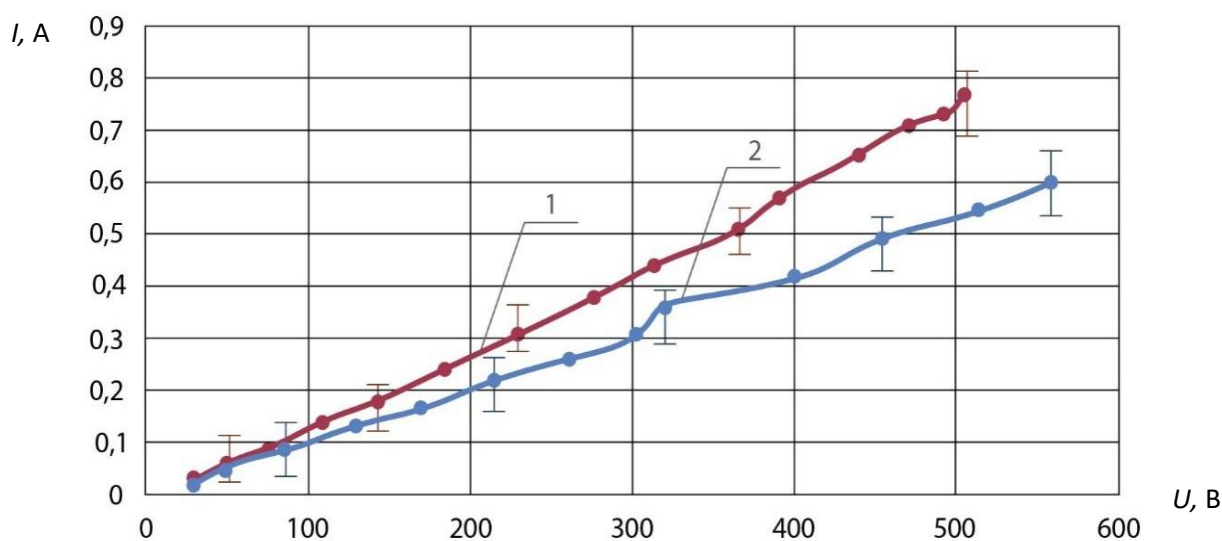


Рисунок 1 – Принципиальная схема прототипа струйной электролитно-плазменной установки

3 Результаты исследований

Вольтамперная характеристика (ВАХ) является важнейшим информативным показателем процесса электрохимической и электрофизической обработки (рис. 2). Исследование проводили при разных объемных расходах электролита и при фиксированной температуре электролита на входе в полый катод, равной $T = 20^\circ \text{C}$. Результаты измерений показывают, что при разных расходах электролита при данной температуре ВАХ имеет фактически линейный характер. Это может говорить о том, что на этом отрезке сопротивление межэлектродного промежутка является величиной постоянной. К тому же можно предположить, что, если зависимость имеет линейный характер, то она соответствует режиму электролиза и подчиняется второму закону Фарадея.



1 – $Q = 33$ л/ч; 2 – $Q = 88$ л/ч

Рисунок 2 – Вольтамперная характеристика процесса струйной обработки при разных расходах электролита K_2SO_4 ($K = 5$ г/л)

Принято считать, что убыль массы образцов при обработке в режиме электролиза описывается вторым законом Фарадея [20]:

$$m = k \cdot \eta a \cdot I \cdot t, \quad (1)$$

где, k – электрохимический эквивалент вещества, численно равный массе вещества, выделившегося при прохождении через электролит единичного электрического заряда; ηa – коэффициент выхода по току; I – величина силы тока, А; t – время электролиза, с.

Однако исследования Фарадея наиболее справедливы для режима массопереноса в электролитической ванне (до $U = 60$ В) [21]. Для понимания того, насколько эффективно работает данный закон для более высоких напряжений, и выявления его соответствия при струйной обработке для более высоких напряжений, мы провели исследование потери массы образца в диапазоне напряжений до $U = 200$ В. График убыли массы образцов представлен на рис. 3. Анализ показывает, что увеличение напряжения в цепи при постоянной концентрации и объемном расходе электролита ведет к увеличению убыли массы. Так, средний коэффициент съема металла ($K_c = d\Delta / dU$) при расходе электролита $Q = 88$ л/ч и межэлектродном зазоре $h = 4,5$ мм (кривая 1) на участке напряжений 60 ... 100 В составляет $1 \cdot 10^{-4}$ мг/В, а на участке 100 ... 200 В – $1,3 \cdot 10^{-4}$ мг/В, при этом на участке 80 ... 120 В он практически не меняется на уровне $\sim 0,25 \cdot 10^{-4}$ мг/В. Это может говорить о том, что для данного диапазона изменяется коэффициент выхода по току ηa . Возможно, это связано с тем, что при данных объемных расходах электролита ($Q = 33 \dots 88$ л/ч), межэлектродных промежутках (1 ... 4.5 мм) и выделяемой мощности температура струи в период воздействия ее на металлический анод является относительно постоянной, около 25 ... 27 °С, за счет высокой скорости потока электролита. При дальнейшем увеличении напряжения ($U = 60 \dots 200$ В) температура электролита в указанном диапазоне растет до 35 ... 43°С при активном выделении Джоулева тепла:

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

где dQ – количество теплоты, выделяемое за промежуток времени dt , Дж/с;

I – величина силы тока, А;

R – сопротивление, Ом.

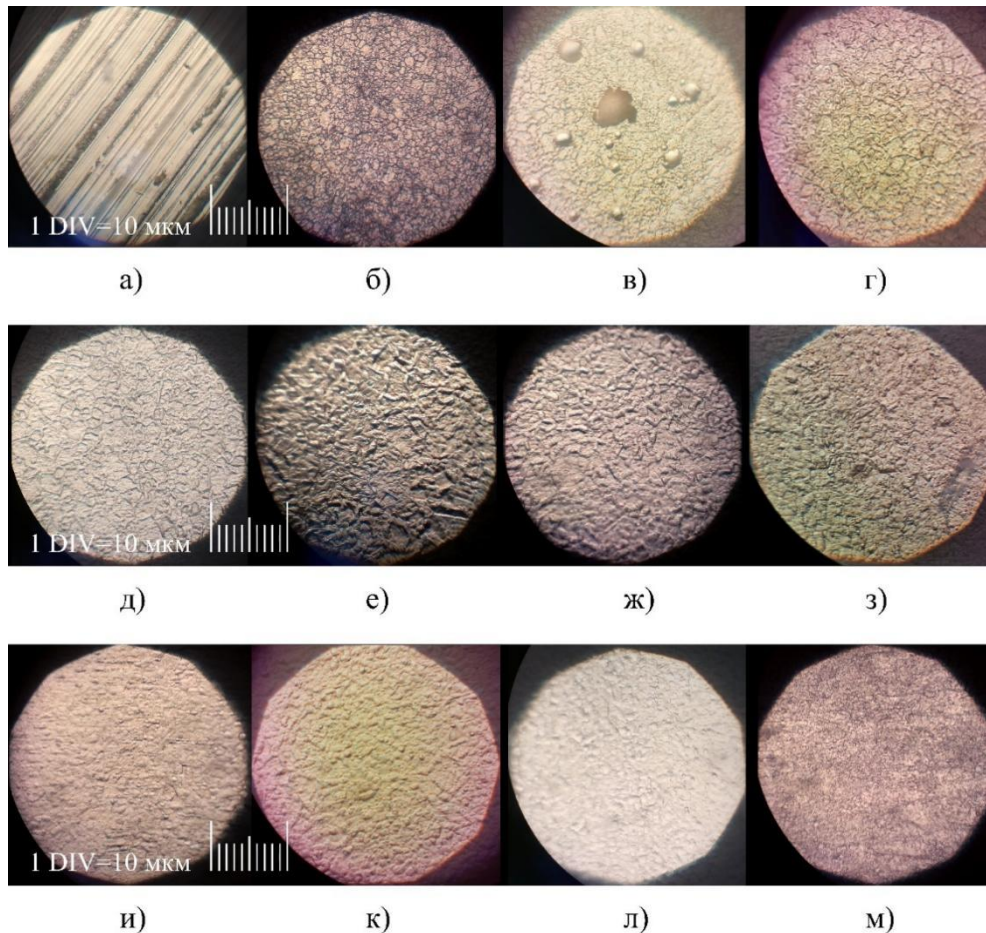
Очевидно, что это ускоряет и активизирует процессы в электролите и на поверхности анода, и ведет к увеличению съема металла анода, но не приводит к вскипанию электролита и переходу к процессу электролитно-плазменной обработки с формированием электролитно-плазменного слоя на поверхности анода. Стремление увеличить съем материала за счет поднятия напряжения в цепи сопровождается проблемой, связанной с возникновением в межэлектродном промежутке искровых разрядов, переходящих в дуговые. Так, для объемных расходов электролита $Q = 33$ л/ч и межэлектродного промежутка 1 мм этот предел фиксируется при $U = 140 \dots 200$ В, а при межэлектродном промежутке $h = 4,5$ мм он составляет $U = 160 \dots 200$ В.



1 – $h = 4,5$ мм, $Q = 88$ л/ч; 2 – $h = 1$ мм, $Q = 33$ л/ч

Рисунок 3 – Зависимость величины убыли массы образца при изменении напряжения между токоподводами (сталь 08Х18Н9Т).

Анализ морфологии поверхности в процессе струйной электролитно-плазменной обработки показывает, что при разных технологических режимах для одних и тех же материалов формируются общие закономерности, связанные с растворением материала анода струей электролита (рис. 4). Эти закономерности присущи как при падении свободной струи, так и для струи, подаваемой под давлением. Рассмотрим исходную поверхность (рис. 4, а). При рассмотрении поверхности при большом увеличении фиксируется развитый рельеф, сформированный абразивными зёрнами шлифовального круга. При этом хорошо различимыми являются отдельные зёрна металла образца, включенные в состав гребней микрорельефа. При подаче электролита и напряжения в цепи рельеф начинает изменяться. Для разных металлов наблюдается два основных механизма изменения морфологии поверхности и две особенности формирования рельефа при струйной обработке.



а) исходное состояние поверхности (сталь AISI 301); б) область воздействия периферии струи, выявление зерен микроструктуры (сталь AISI 301); в) зона возникновения искрового разряда, сталь AISI 301; г) увеличенный съем зерен; д) ускоренное растворение зерен; е) возникновение угловатой структуры (сталь 08X18H9T); ж) развитие валиков межзеренного пространства; з) начало дробления валиков межзеренного пространства; и) область сглаживания регулярного микрорельефа поверхности (сталь 08X18H9T); к) центральная зона струи (сталь 08X18H9T); л) развитие инверсии съема (вогнутая поверхность локальных зон обработки; м) морфология поверхности стали AISI 301

Рисунок 4 – Изменение морфологии поверхности нержавеющей сталей под влиянием электролитической струи

Первый механизм – преимущественное растворение поверхности зерен металла. Второй механизм - преимущественное растворение межзеренного пространства.

Каждый из них можно разделить на пять основных стадий. Стадии механизма преимущественного растворения поверхности зерен металла:

- четкое выявление границ зерен на поверхности (рис. 4, б);
- ускоренное растворение площади зерен и уменьшенное растворение межзеренного пространства (рис. 4, б, в, г, д);
- формирование явно выраженного рисунка из площадок зерен и валиков, разделяющих эти зерна (рис. 4, б, в, г, д);
- укрупнение валиков зерен и уменьшение межзеренного пространства (рис. 4, е, ж, з);
- дробление валиков на мелкие отдельные составляющие и относительное выравнивание рельефа поверхности (рис. 4, з, и, к).

Стадии механизма преимущественного растворения межзеренного пространства:

- четкое выявление границ зерен на поверхности и обозначение зерен на поверхности микронеровностей;
- ускоренное растворение межзеренного пространства и прорезание в разных направлениях канавками гребней микронеровностей в виде микронеровностей шероховатости;
- формирование явно выраженного рисунка из площадок зерен и валиков, разделяющих эти зерна;
- рост канавок границ зерен в разных направлениях, почти полное удаление гребней микропрофиля и уменьшение площадей зерен;
- дробление остатков зерен на мелкие отдельные составляющие и выравниванию рельефа поверхности с получением чешуйчатой структуры (рис. 4, и, л).

Исследования морфологии поверхности от напряжения ($U = 20 \dots 200$ В) показывают, что для стали AISI 304 (табл.) имеется ряд особенностей.

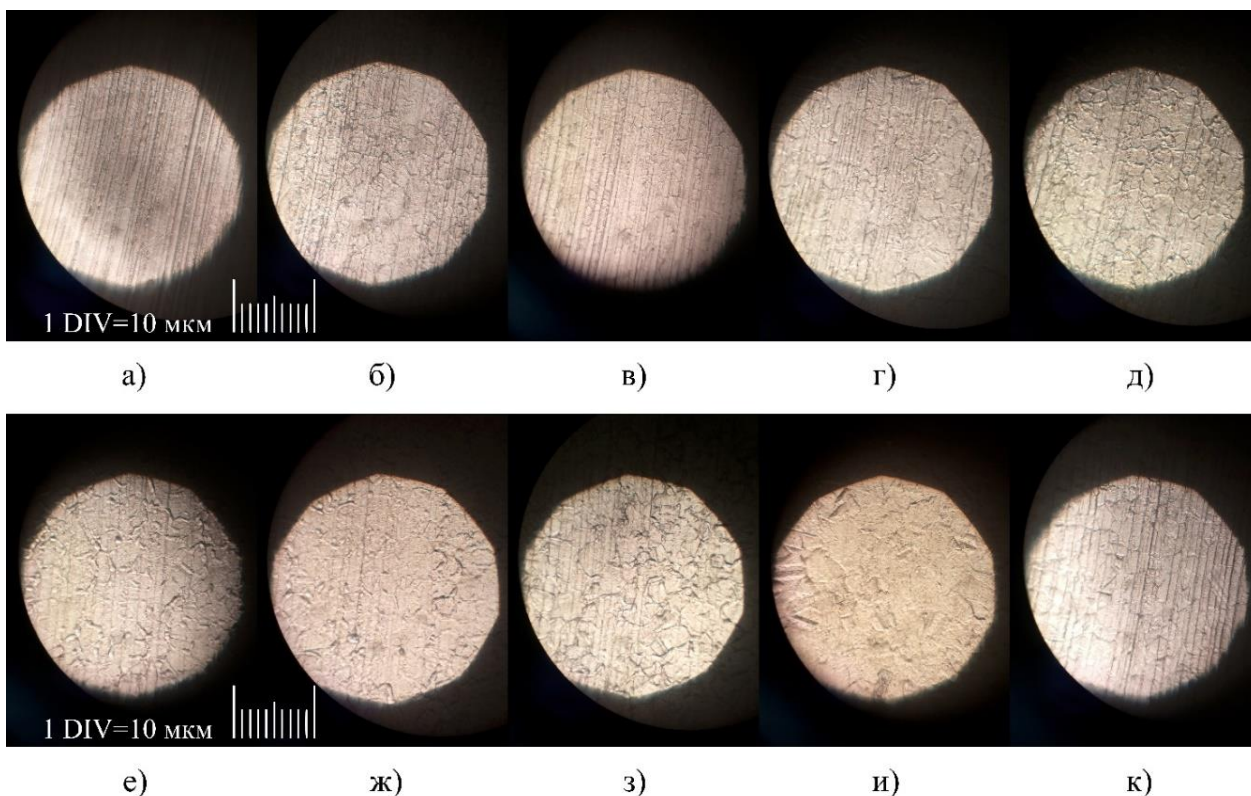
Таблица – Анализ морфологии поверхности нержавеющей стали AISI 304 в процессе обработки электролитической струей ($Q = 33$ л/ч)

Элементы морфологии	Напряжение, В									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Скругление вершин микрорельефа	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Эрозия поверхности граней микрорельефа	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Выравнивание поверхности	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+
Уменьшение межзеренного пространства	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Увеличение межзеренного пространства	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-
Сглаживание рисков	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
Эрозия всей поверхности	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Травление всей поверхности	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Наличие следов от искровых разрядов	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Наличие блеска	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
Температура электролита на входе в полый катод, °С	20	20	20	20	20	20	22	25	35	36
Ярко выраженные признаки элементов морфологии: «-» – отсутствие признака; «+» – наличие признака										

Морфология поверхности после струйной обработки представлена на рис. 5. Анализ показывает разнообразный микрорельеф с характерными особенностями. Среди них эрозия поверхности граней и скругление вершин микрорельефа наиболее характерны для низких напряжений, выравнивание поверхности происходит в разной степени для всех видов напряжений, увеличение межзеренного пространства фиксируется в основном для малых напряжений, сглаживание рисков происходит при более высоких напряжениях, травление всей поверхности происходит при самом высоком напряжении и минимальном съеме в каждой точке поверхности образца. Важным является тот факт, что на поверхности с напряжением $U = 120 \dots 200$ В фиксируются следы от искровых микроударов. Это может говорить о том, что начиная с напряжения $U = 120$ В массоперенос с анода в виде отдельных ионов металла дополняется массопереносом за счет искровых разрядов, разрушающих поверхность расплавлением в

локальных областях и вырывания из нее расплавленной части металла. Наиболее характерным является напряжение цепи в $U = 200$ В. В этом случае наблюдается комбинированное воздействие на поверхность двух механизмов съема материала – электрохимическое растворение и электролитно-плазменная обработка с преобладанием последней. При электрохимическом растворении наблюдается рост выделяемой мощности и увеличение съема, при электролитно-плазменном наблюдается обработка поверхности разрядами с малой энергией. Это обеспечивает мельчайшую проработку и выявление всех элементов поверхности. При увеличении напряжения в цепи до $U = 200$ В температура электролита достигает $T = 35 \dots 43^\circ \text{C}$, а напряженность поля – $E = 7,48 \times 10^5$ В/м. Очевидно, что в этом случае температуры и напряженности поля достаточно для частичной ионизации межэлектродного промежутка и возникновения процесса струйной электролитно-плазменной обработки.

Среди особенностей формирования морфологии поверхности можно отметить наличие инверсии при обработке струей электролита. В одном случае поверхность формируется в виде выпуклых полусфер, в другом случае наоборот поверхность формируется в виде вогнутых сферических поверхностей. Условия получения данной морфологии требуют дальнейших исследований.



а) $U = 20$ В; б) $U = 40$ В; в) $U = 60$ В; г) $U = 80$ В; д) $U = 100$ В; е) $U = 120$ В;
ж) $U = 140$ В; з) $U = 160$ В; и) $U = 180$ В; к) $U = 200$ В

Рисунок 5 – Изменение морфологии поверхности нержавеющей стали AISI 304 под влиянием электролитической струи при разных напряжениях

Нами было исследовано изменение параметра шероховатости поверхности R_a при изменении напряжения в цепи. Зависимость (рис. 6) показывает рост параметра шероховатости поверхности R_a в интервале $U = 20 \dots 40$ В и плавное уменьшение до $U = 100$ В. Это происходит при увеличении общей мощности разряда и увеличении скорости съема материала анода.

Анализ напряженности электрического поля, проводили в соответствии с уравнением:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad}U) = -\rho, \quad (1)$$

где U – потенциал электростатического поля; ε – диэлектрическая проницаемость; ρ – плотность объемных свободных зарядов.

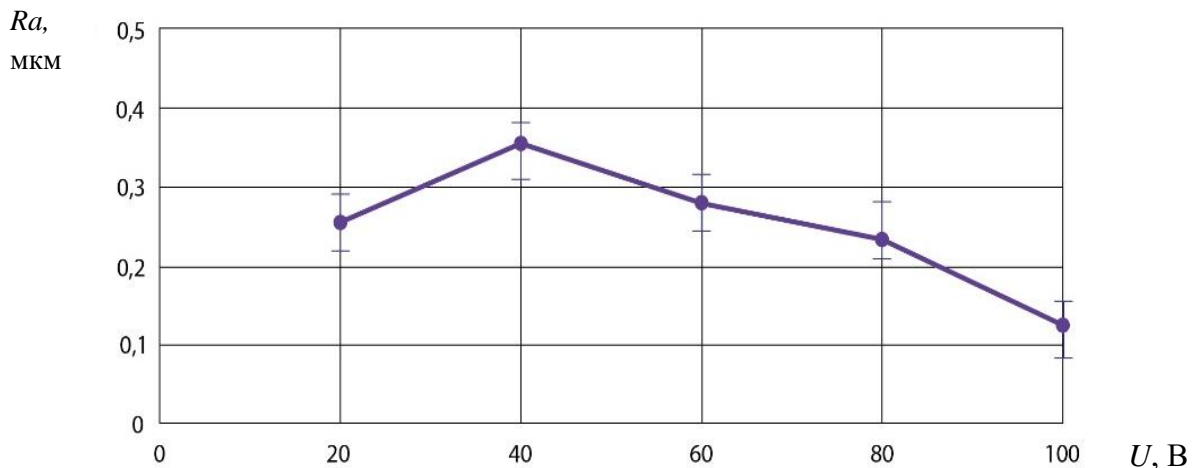


Рисунок 6 – Зависимость изменения параметра шероховатости Ra от напряжения при струйной электролитно-плазменной обработке

Учитывая, что плотность объемного заряда равна:

$$\rho = 0. \quad (2)$$

Оценку потенциала записываем с использованием векторного дифференциального оператора набла ∇ :

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla U) = -\rho, E = -\nabla U, \quad (3)$$

где ∇ – векторный дифференциальный оператор набла; E – вектор напряженности электрического поля.

При использовании осесимметричной модели выражение (3) можно записать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}. \quad (4)$$

Расчет напряженности электрического поля показывает, что данная величина при напряжении $U = 60$ В, высоте межэлектродного промежутка $h = 3$ мм составляет $E = 3,57 \times 10^5$ В/м, а для $U = 200$ В – соответственно $E = 7,43 \times 10^5$ В/м. Расчет, проведенный в программе Comsol Multithysics показывает, что между наружным и внутренним срезом медной трубки полого катода и поверхностью анода из нержавеющей стали формируется электрическое поле с потенциалом $U = 60$ В (рис. 7, а).

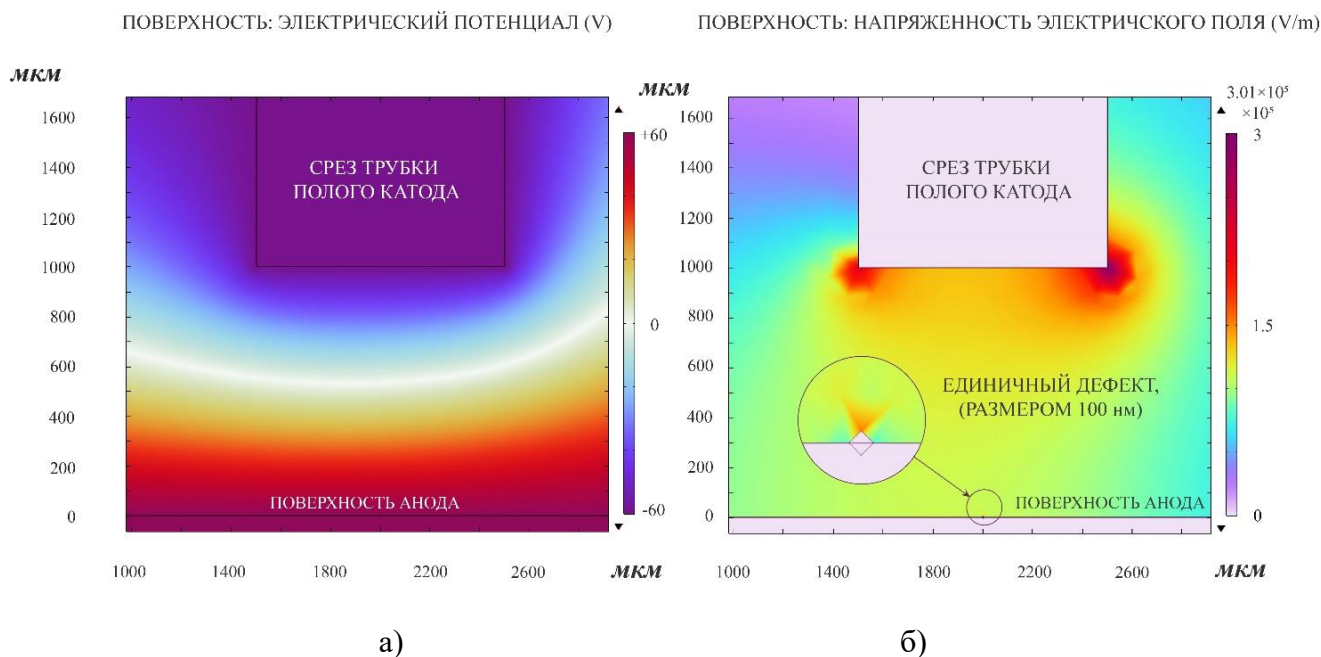


Рисунок 7 – Результаты расчета в программе Comsol Multiphysics распределения электрического потенциала (а) и распределения напряженности электрического поля для поверхности с нанodefектом (б)

При этом возникает большая напряженность электрического поля не только на вершинах микронеровностей, острых краях трубки полого катода, но и на микродефектах поверхности, полученных процессами шлифования (рис. 7, б). Нанodefекты порядка 100 нм и более, сформированные абразивными зернами, локализуют на себя электрическое поле и формируют высокую напряженность $E = 3,57 \times 10^5$ В/м, сопоставимую с вершинами микронеровностей. Поэтому за счет высокой неоднородности электрического поля на вершинах микро- и макродефектов поверхности максимальный съем происходит именно в этих местах, сглаживая развитую поверхность металлического анода как на пиках, так и во впадинах материала.

4 Обсуждение и заключение

Изменение энергии частиц и напряженности поля от оси электролитической струи приводит к изменению морфологии в разных точках ее взаимодействия с поверхностью анода.

В процессе электрохимической обработки в исследуемом диапазоне эффективно удаляются множественные микронеровности поверхности, характеризующие параметр шероховатости Ra 0,8 ... 1,6 мкм.

Электростатические расчеты показывают, что при электрохимической обработке струей электролита между срезом полого катода и поверхностью металлического анода возникает высокая напряженность электрического поля до $E = 3,57-7,43 \times 10^5$ В/м.

На дефектах поверхности порядка 100 нм, расположенных во впадинах, возникает напряженность электрического поля, сопоставимая с напряженностью на пиках микронеровностей, что ведет к конкурентному растворению этих областей.

Для изменения морфологии поверхности характерна повторяемость ее рисунка для разных напряжений.

Процесс электрохимического растворения (электролиза) при повышении напряжения и уменьшении межэлектродных зазоров ограничивается повышением температуры

струи до $T = 35 \dots 43$ °С, вследствие чего происходит переход к локальной ионизации межэлектродного промежутка и возникновение искровых разрядов, переходящих в дуговые.

При струйной обработке с объемными расходами электролита $Q = 33 \dots 88$ л/ч граница процесса электролиза смещается с $U = 30 \dots 80$ В, характерной для обработки в электролитической ванне, до $U = 140 \dots 200$ В для обработки электролитической струей.

Для напряжения $U = 60 \dots 200$ В классический процесс электролиза отличается увеличенным коэффициентом выхода по току и наличием в струе искровых разрядов малых энергий.

Благодарность. Автор выражает благодарность графическому дизайнеру Диане 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 Принципы построения автоматизированных систем поддержки жизненного цикла инновационных продуктов / А. И. Надеев, А. И. Попова, А. В. Сурина, Ю. К. Свечников // Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 59-63. – EDN KWMQTP.

3 Попова, А. И. Инфраструктурный комплекс поддержки предпринимательства / А. И. Попова // Право, экономика и управление: теория и практика: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 02 декабря 2021 года / Гл. редактор Э.В. Фомин. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2021. – С. 148-150. – EDN XXJRQM.

4 Епрынцева, Д. В. Электрохимическая анодная обработка деталей для ракетной техники / Д. В. Епрынцева, И. М. Винокурова, В. И. Федянин // Актуальные проблемы инновационных систем информатизации и безопасности: Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 28–31 марта 2010 года. Том Часть 2. – Воронеж, 2010. – С. 311-315. – EDN UXLQOJ.

5 Shvaleva, N. A. Analysis of the design of a slotted cathode tool for the electrochemical machining of thin-walled parts / N. A. Shvaleva, A. A. Fadeev // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. – No. 29. – P. 14-18. – DOI 10.26160/2474-5901-2022-29-14-18. – EDN FKLXMY.

6 Бухта, С. Н. Решение технических задач при внедрении окончательной обработки лопаток ГТД методом электрохимической обработки (эхо) / С. Н. Бухта, Л. А. Пет // Наука - производству: Ежегодный научно-технический сборник / Под общей редакцией В.Л. Юрьева. Том Выпуск 10. – УФА: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2017. – С. 54-68. – EDN ZWKAHT.

7 Шеханов, Р. Ф. Электрохимическое маркирование нержавеющей сталей / Р. Ф. Шеханов, М. Г. Донцов, И. В. Братков // Современные проблемы теоретической и прикладной электрохимии. Электрохимия в настоящем и будущем: XIV Плесская международная научная конференция, тезисы докладов, Плещ, 03–07 июля 2023 года. – Иваново: Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, 2023. – С. 72. – EDN XGPXSF.

8 Сокольников, В. Н. Технологические особенности анодного растворения в комбинированной упрочняющей обработке при доводке высокооборотных роторов / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17, № 12(204). – С. 555-557. – DOI 10.36652/1813-1336-2021-17-12-555-557. – EDN XOKLFJ.

9 High-energy laser treatment of plasma coatings from materials based on oxide ceramics / F. I. Panteleenko, V. A. Okovity, O. G. Devoino [et al.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2022. – No. 3(78). – P. 83-88. – EDN TERAJD.

10 Sergeev, N. & Minaev, I. & Tikhonova, I. & Gvozdev, A. & Kolmakov, A. & Sergeev, A. & Kutepov, S. & Malii, D. (2020). Selecting Laser Cutting Modes for Engineering Steel Sheets

Aiming at Provision of the Required Properties of Surface Quality. *Inorganic Materials: Applied Research*. 11. 815-822. 10.1134/S2075113320040358.

11 Гарагуля, Д. В. Преимущества гидроабразивной резки при раскрое листового металла / Д. В. Гарагуля // *Морской вестник*. – 2017. – № 4(64). – С. 37-38. – EDN ZUQMKL.

12 Фомин, В. В. Профилирование высокоточных отверстий / В. В. Фомин // *Студенческая наука - первый шаг к цифровизации сельского хозяйства : Материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ, в 3 ч., Чебоксары, 15 октября 2021 года. Том Ч. 2. – Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2021. – С. 398-399. – EDN ETWWSL.*

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

14 Рахимьянов, Х. М. Технологические ограничения в электрохимической прошивке отверстий малого диаметра / Х. М. Рахимьянов, С. И. Василевская, К. Х. Рахимьянов // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2018. – № 4(128). – С. 5-16. – DOI 10.26730/1999-4125-2018-4-5-15. – EDN YTRYMP.

15 Рахимьянов, Х. М. Оценка перспектив введения высоковольтных импульсов в процесс электрохимической прошивки отверстий малого диаметра / Х. М. Рахимьянов, С. И. Василевская // *Инновации в машиностроении: Сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Кемерово, 26–29 ноября 2019 года / Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. – С. 17-22. – EDN KAITES.*

16 Гайсин А.Ф. Парогазовый разряд между струйным электролитическим и металлическим электродами в технологических процессах Школа по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ https://main.isuct.ru/files/konf/plasma/SECTION5/Gaisin_Kazan.html

17 Попов, А. И. Теоретические предпосылки струйной электролитно-плазменной резки / А. И. Попов, С. А. Кислицын // *Современное машиностроение. Наука и образование*. – 2023. – № 12. – С. 537-552. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-557. – EDN BBMSSW.

18 High-Speed Dimensional Processing of Metallic Materials with an Environmentally Friendly Jet Electrolyte-Plasma Method / A. Popov, A. Popova, A. Fumin [et al.] // *Mechanisms and Machine Science (book series)*. - 2022. - Vol. 108 mms. - P. 481-489. – DOI 10.1007/978-3-030-87383-7_52. – EDN SEEEP.

19 Попов, А. И. Технологические аспекты струйной электролитно-плазменной обработки / А. И. Попов, А. И. Попова, Д. А. Попова // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 54-70. – DOI 10.18721/JEST.25405. – EDN FVPLWU.

20 Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан [и др.]; под. общ. ред. В. А. Волосатова.

21 Словецкий Д.И., Терентьев С.Д. Параметры электрического разряда в электролитах и физико-химические процессы в электролитной плазме // *Химия высоких энергий*. 2003. Т. 37. № 5. С. 355–362.

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 Principles of constructing automated systems for supporting the life cycle of innovative products / A. I. Nadeev, A. I. Popova, A. V. Surina, Yu. K. Svechnikov // *Sensors and systems*. – 2006. – No. 11. – P. 59-63. – EDN KWMQTP.

3 Popova, A. I. Infrastructure complex for supporting entrepreneurship / A. I. Popova // *Law,*

economics and management: theory and practice: Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference, Cheboksary, December 02, 2021 / Ch. editor E.V. Fomin. – Cheboksary: Limited Liability Company “Publishing House “Sreda”, 2021. – P. 148-150. – EDN XXJRQM.

4 Epryntsev, D. V. Electrochemical anodic processing of parts for rocket technology / D. V. Epryntsev, I. M. Vinokurova, V. I. Fedyanin // Current problems of innovative information and security systems: Materials of the international scientific and practical conference, Voronezh, March 28–31, 2010. Volume Part 2. – Voronezh, 2010. – pp. 311-315. – EDN UXLQOJ.

5 Shvaleva, N. A. Analysis of the design of a slotted cathode tool for the electrochemical machining of thin-walled parts / N. A. Shvaleva, A. A. Fadeev // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. – No. 29. – P. 14-18. – DOI 10.26160/2474-5901-2022-29-14-18. – EDN FKLXMY.

6 Bukhta, S. N. Solution of technical problems in the implementation of final processing of gas turbine engine blades using the method of electrochemical processing (echo) / S. N. Bukhta, L. A. Pet // Science - production: Annual scientific and technical collection / Under the general editorship V.L. Yuryeva. Volume Issue 10. - UFA: State Educational Institution of Higher Professional Education "Ufa State Aviation Technical University", 2017. - P. 54-68. – EDN ZWKAXT.

7 Shekhanov, R. F. Electrochemical marking of stainless steels / R. F. Shekhanov, M. G. Dontsov, I. V. Bratkov // Modern problems of theoretical and applied electrochemistry. Electrochemistry in the present and future: XIV Plyos International Scientific Conference, abstracts, Plyos, July 03–07, 2023. – Ivanovo: Institute of Chemistry of Solutions named after. G.A. Krestova RAS, 2023. – P. 72. – EDN XGPXSF.

8 Sokolnikov, V. N. Technological features of anodic dissolution in combined hardening treatment during finishing of high-speed rotors / V. N. Sokolnikov, G. A. Sukhochev, S. N. Kodentsev // Hardening technologies and coatings. – 2021. – T. 17, No. 12(204). – pp. 555-557. – DOI 10.36652/1813-1336-2021-17-12-555-557. – EDN XOKLFJ.

9 High-energy laser treatment of plasma coatings from materials based on oxide ceramics / F. I. Panteleenko, V. A. Okovity, O. G. Devoino [et al.] // Progressive technologies and mechanical engineering systems. – 2022. – No. 3(78). – P. 83-88. – EDN TERAJD.

10 Sergeev, N. & Minaev, I. & Tikhonova, I. & Gvozdev, A. & Kolmakov, A. & Sergeev, A. & Kutepov, S. & Malii, D. (2020). Selecting Laser Cutting Modes for Engineering Steel Sheets Aiming at Provision of the Required Properties of Surface Quality. Inorganic Materials: Applied Research. 11.815-822. 10.1134/S2075113320040358.

11 Garagulya, D.V. Advantages of waterjet cutting when cutting sheet metal / D.V. Garagulya // Morskoy Vestnik. – 2017. – No. 4(64). – pp. 37-38. – EDN ZUQMKL.

12 Fomin, V.V. Profiling of high-precision holes / V.V. Fomin // Student science - the first step towards the digitalization of agriculture: Materials of the All-Russian student scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Chuvash State Agrarian University, at 3 o'clock. , Cheboksary, October 15, 2021. Volume Part 2. – Cheboksary: Chuvash State Agrarian University, 2021. – P. 398-399. – EDN ETWWSL.

13 Kuts, V. V. Study of the process of producing holes with a hollow electrode on a modernized CNC electrical discharge machine / V. V. Kuts, M. S. Razumov, D. A. Zubkov, A. S. Byshkin, A. A. Nestruev // News of Tula State University. Technical science. 2020. No. 3. P. 395-402.

14 Rakhimyanov, Kh. M. Technological limitations in the electrochemical firmware of small-diameter holes / Kh. M. Rakhimyanov, S. I. Vasilevskaya, K. Kh. Rakhimyanov // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2018. – No. 4(128). – P. 5-16. – DOI 10.26730/1999-4125-2018-4-5-15. – EDN YTRYMP.

15 Rakhimyanov, Kh. M. Assessment of the prospects for introducing high-voltage pulses into the process of electrochemical piercing of small-diameter holes / Kh. M. Rakhimyanov, S. I. Vasilevskaya // Innovations in mechanical engineering: Collection of proceedings of the X International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, 26–November 29, 2019 / Edited by V.Yu. Blumenstein. – Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2019. – pp. 17-22. – EDN KAITES.

16 Gaisin A.F. Vapor-gas discharge between jet electrolytic and metal electrodes in technological processes School of plasma chemistry for young scientists in Russia and CIS countries https://main.isuct.ru/files/konf/plasma/SECTION5/Gaisin_Kazan.html

17 Popov, A. I. Theoretical premises of jet electrolyte-plasma cutting / A. I. Popov, S. A. Kislitsyn // Modern mechanical engineering. Science and education. – 2023. – No. 12. – P. 537-552. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-557. – EDN BBMSSW.

18 High-Speed Dimensional Processing of Metallic Materials with an Environmentally Friendly Jet Electrolyte-Plasma Method / A. Popov, A. Popova, A. Fumin [et al.] // Mechanisms and Machine Science (book series). - 2022. - Vol. 108 mms. - P. 481-489. – DOI 10.1007/978-3-030-87383-7_52. – EDN SEEEEPN.

19 Popov, A. I. Technological aspects of jet electrolyte-plasma processing / A. I. Popov, A. I. Popova, D. A. Popova // Scientific and Technical Journal of SPbPU. Natural and engineering sciences. – 2019. – Т. 25, No. 4. – P. 54-70. – DOI 10.18721/JEST.25405. – EDN FVPLWU.

20 Handbook of electrochemical and electrophysical processing methods / G. L. Amitan [et al.]; under. total ed. V. A. Volosatova.

21 Slovetsky D.I., Terentyev S.D. Parameters of electric discharge in electrolytes and physico-chemical processes in electrolyte plasma // High Energy Chemistry. 2003. Т. 37. No. 5. pp. 355–362.

© Попов А.И., 2023

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-49-55



УДК 621.9.047; 621.92

UDC 621.9.047; 621.92

2.5.6 – технология машиностроения

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА
ЭЛЕКТРОХИМИКОМЕХАНИЧЕСКОГО
ПОЛИРОВАНИЯ**

**EXPERIMENTAL STUDIES ON
THE COMBINED PROCESS
OF ELECTROCHEMICAL MECHANICAL
POLISHING**

✉¹ **Перова Алла Владимировна**,
к.т.н, доцент кафедры технологии машино-
строения, Воронежский государственный тех-
нический университет, г. Воронеж,
e-mail: pva7@mail.ru

✉¹ **Perova Alla Vladimirovna**,
cand. of tech. sc., associate professor of mechanical
engineering technology chair of the Voronezh state
technical university, Voronezh,
e-mail: pva7@mail.ru

Болдырев Александр Иванович,
д.т.н, профессор кафедры технологии
машиностроения, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж.

Boldyrev Alexander Ivanovich,
dr. of tech. sc., professor of mechanical engineering
technology chair of the Voronezh state technical
university, Voronezh.

Болдырев Александр Александрович,
к.т.н, доцент кафедры технологии
машиностроения, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж.

Boldyrev Alexander Aleksandrovich,
cand. of tech. sc., associate professor of mechanical
engineering technology chair of the Voronezh state
technical university, Voronezh.

Григораш Владимир Васильевич,
к.т.н, доцент кафедры металлических и
деревянных конструкций,
Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж.

Grigorash Vladimir Vasilyevich,
cand. of tech. sc., associate professor of chair of
metal and wooden structures of the Voronezh state
technical university, Voronezh.

Падурец Анна Александровна,
магистрант кафедры технологии
машиностроения, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж.

Padurets Anna Alexandrovna,
master's student of the mechanical engineering
technology chair of the Voronezh state technical
university, Voronezh.

Аннотация. В статье представлены резуль-
таты экспериментальных исследований про-
цесса электрохимикомеханического полирова-
ния, сочетающего в себе анодное растворение,
обладающее высокими локализирующими свой-
ствами, с динамическими воздействиями абра-
зивных зерен. Описана сущность комбини-
рованного процесса, когда под воздействием

Annotation. This article presents the results of
experimental studies of the electrochemical me-
chanical polishing process, which combines an-
odic dissolution, possessing high localizing prop-
erties, with the dynamic effects of abrasive
grains. The essence of the combined process is
described, when, under the influence of operating
voltage, a continuous electrochemical dissolution

рабочего напряжения происходит непрерывное электрохимическое растворение обрабатываемой поверхности с образованием на ней окисных пленок с последующим их удалением вместе с обрабатываемым металлом посредством абразивных зерен, квазизакрепленных в полировальнике. Приведено описание и условия проведенных экспериментов. Показано влияние весового содержания абразива в составе электролитно-абразивной смеси на съем металла и шероховатость обрабатываемой поверхности. Отмечается влияние на ход комбинированного процесса частоты вращения полировальника и давления обрабатываемой детали на него. При оптимальных значениях исследуемых параметров электрохимикомеханическое полирование позволяет обеспечить высокое геометрическое качество обработанной поверхности и высокую производительность процесса.

Ключевые слова: КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА, ЭЛЕКТРОХИМИКОМЕХАНИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА, ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ.

of the treated surface occurs with the formation of oxide films on it, followed by their removal together with the treated metal by means of abrasive grains quasi-fixed in the polishing pad. The description and conditions of the conducted experiments are given. The influence of the weight content of the abrasive in the composition of the electrolyte-abrasive mixture on the removal of metal and the roughness of the treated surface is shown. The impact on the course of the combined process of the frequency of rotation of the polishing pad and the pressure of the workpiece on it is noted. At optimal values of the studied parameters, electrochemical-mechanical polishing makes it possible to ensure high geometric quality of the treated surface and high process productivity.

Keywords: COMBINED PROCESSING, ELECTROCHEMICAL MECHANICAL POLISHING, PROCESS PRODUCTIVITY, SURFACE ROUGHNESS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Технология производства деталей современных машин и приборов требует широкого применения методов, обеспечивающих высокое качество обработки. Повышению качества и точности обработки способствует применение ряда методов финишной обработки, например, доводки свободным абразивом [1-5].

Однако, несмотря на широкое распространение этот процесс обладает рядом существенных недостатков: процесс трудно поддается автоматизации, обладает сравнительно низкой производительностью, обслуживать оборудование должны операторы высокой квалификации. Такой процесс существенно зависит от обрабатываемого материала, материала инструмента, абразивного материала, состава жидкой фазы, формы и геометрии обрабатываемой поверхности, кинематики движения инструмента и детали, силового режима обработки и многих других факторов. По-видимому, это обстоятельство и является причиной того, что для объяснения физической сущности процесса до сегодняшнего дня высказывается ряд гипотез: механическая, пластического деформирования, химическая, оплавления [6, 7].

Известные недостатки доводочных методов заставляют искать пути и средства повышения эффективности финишных операций, а также новые методы обработки. К числу прогрессивных методов финишной обработки можно отнести электрохимикомеханическое полирование (ЭХМП) [8-10]. Однако его широкое промышленное использование сдерживается недостаточным исследованием механизма процесса, физико-технологическими особенностями, в том числе влиянием основных параметров процесса на технологические возможности и показатели.

2 Материалы и методы

Сочетание анодного растворения, обладающего высокими локализирующими свойствами, с динамическими воздействиями абразивных зерен позволяет обеспечить высокое геометрическое качество обработанной поверхности и высокую производительность процесса. Массоперенос при ЭХМП обусловлен процессами анодного растворения и абразивного резания обрабатываемой поверхности. Под воздействием технологического напряжения происходит непрерывное электрохимическое растворение обрабатываемой поверхности с образованием на ней окисных пленок. Абразивные зерна, квазизакрепленные в полировальнике, удаляют эти окисные пленки и часть основного металла. Работа, затрачиваемая абразивными зернами на удаление окисных пленок, значительно меньше работы по удалению основного металла, что можно объяснить, в частности, меньшей механической прочностью окисных пленок по сравнению с основным металлом [11-13]. Это способствует повышению производительности обработки.

Для более широкого изучения механизма процесса ЭХМП и для выявления оптимальных режимов обработки необходимы экспериментальные исследования по изучению влияния параметров процесса на его технологические показатели, в частности, на производительность и шероховатость обрабатываемой поверхности.

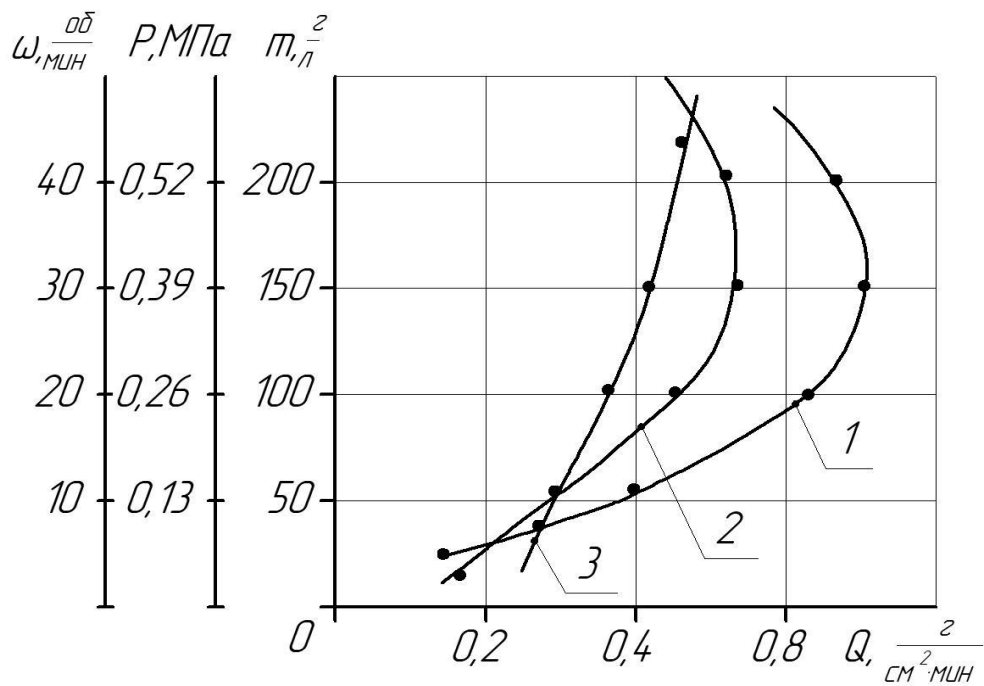
Исследования выполнялись в АО «Конструкторское бюро химавтоматики» (г. Воронеж) на экспериментальных установках, выполненных на базах универсального притирочного станка мод. И-400 и полировально-доводочного станка мод. ПД-500М. Были разработаны инструмент и необходимая технологическая оснастка для обработки как плоских, так и сферических поверхностей.

Обрабатывались медные образцы площадью 80 см², имевшие шероховатость поверхности Ra = 2,5 мкм. Шероховатость обрабатываемой поверхности при анодном растворении зависит от ряда факторов, одним из которых является структура обрабатываемого металла. Известно, что кислород мало растворим в меди в твердом состоянии. При затвердевании меди кислород выделяется в виде эвтектики медь-закись меди, располагающейся по границам кристаллитов. При анодном растворении электрохимическая гетерогенность границы и зерна обуславливает существенное различие в скоростях их растворения, что в конечном счете отрицательно скажется на шероховатости поверхности. Поэтому при обработке медных образцов методом ЭХМП применялась медь с пониженным содержанием кислорода М1Ф (ГОСТ 1173-2006). Электролит для обработки выбирался согласно рекомендациям, имеющимся в литературных источниках [14-16], а также на основе предварительных экспериментов. В качестве электролита в исследованиях использовался водный раствор NaNO₂ и CaCl₂. При обработке мягких материалов рекомендуется в качестве абразива использовать окислы мягких металлов [17, 18]. Поэтому для исследований была выбрана окись хрома, концентрация которого в растворе электролита составляла 50, 100, 200 г/л. В ходе экспериментов напряжение было постоянным. В качестве материала полировальника, поддерживающего гарантированный межэлектродный зазор между обрабатываемой деталью и катодом, использовались различные натуральные и искусственные ткани [19].

3 Результаты исследований

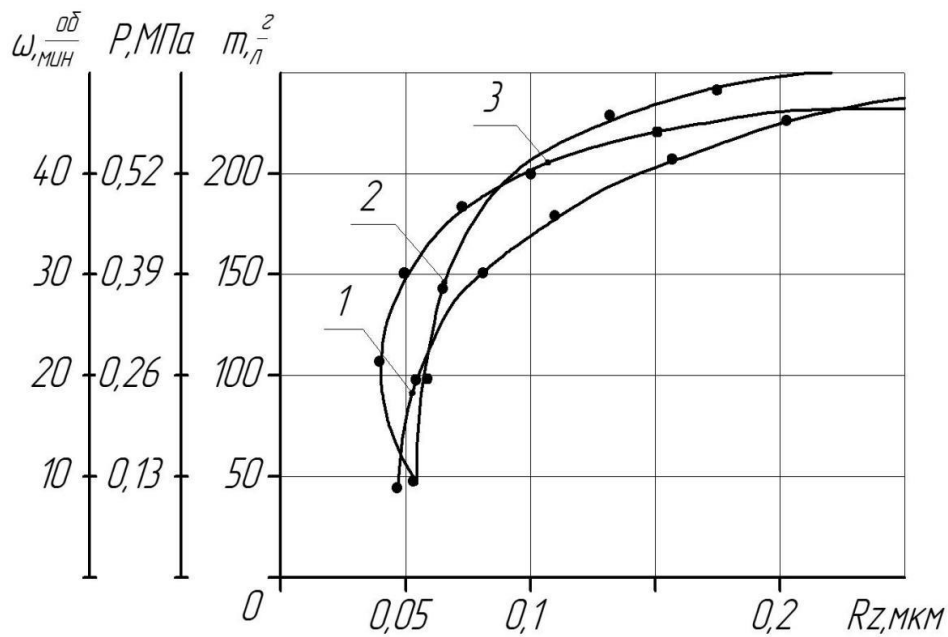
Проведенные исследования показали, что увеличение весового содержания абразива в составе электролитно-абразивной смеси приводит к некоторому повышению съема металла (рис. 1), но при достижении концентрации абразива 100-150 г/л происходит увеличение шероховатости обрабатываемой поверхности (рис. 2). Это можно объяснить, в частности, тем, что электролитно-абразивная смесь при повышенной концентрации абразива более густая и при попадании на полировальник распределяется неравномерно по его рабочей поверхности. С

другой стороны, повышенное содержание абразива на рабочей поверхности полировальника уменьшает долю электрохимической составляющей.



1 – концентрации абразива; 2 – скорости абразива; 3 – давления абразива

Рисунок 1 – Зависимости скорости съема металла от технологических факторов



1 – концентрации абразива; 2 – скорости абразива; 3 – давления абразива

Рисунок 2 – Зависимости шероховатости от технологических факторов

Увеличение давления обрабатываемой детали на полировальник до 0,42 МПа приводит к увеличению производительности процесса (рис. 1). Дальнейшее увеличение давления несколько снижает съём материала, что объясняется выдавливанием электролита краем детали из материала полировальника, а также уменьшением влияния абразива на съём. Низкая шероховатость поверхности получена при давлениях 0,15-0,2 МПа. Отклонение давления от этого значения в ту или иную сторону приводит к некоторому увеличению шероховатости обработанной поверхности (рис. 2). Это, возможно, вызвано тем, что с увеличением давления на обрабатываемой поверхности появляются риски и царапины от материала полировальника.

Частота вращения полировальника незначительно влияет на производительность процесса ЭХМП. Увеличение скорости свыше 25 об/мин приводит к некоторому уменьшению съёма материала. Видимо, под действием центробежных сил с рабочей поверхности полировальника удаляется часть электролитно-абразивной смеси.

4 Обсуждение и заключение

Полученные результаты проведенных экспериментов показали, что при оптимальных значениях исследуемых параметров процесс ЭХМП достаточно производителен и можно получать значение шероховатости обработанной поверхности меди на уровне $Ra \approx 0,1$ мкм. Для получения поверхностей более низкой шероховатости необходимо исследовать влияние других технологических параметров и оптимизировать их.

Список литературы

- 1 Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. 624 с.
- 2 Барон, Ю. М. Технология абразивной обработки в магнитном поле. Л.: Машиностроение, 1975. – 128 с.
- 3 Baron Yu.M., Sung-Lim Ko, Repnikova E.E. Experimental Verification of Deburring by Magnetic Abrasive Finishing (MAF) Method // 2th Asia Pasific Forum on Precision Surface and Deburring Technology. Seoul, 2002. P. 166-178.
- 4 Бурлаков, В. І. Аналіз методів обробки деталей вільним абразивом // Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. 2017. – Вип. 35. – С. 132-137.
- 5 Kodacsy J. Apparatus for Cleaning Deburring and Polishing Parts in Magnetic Field // Prac. of 7 th International Conference of Deburring and Surface Finishing/ Berkeley, 2004/ P/ 375-378.
- 6 Павлюкова Н. Л., Полетаев В.А., Волкова Ю.М. Повышение эффективности отделочной обработки художественных изделий из медных сплавов свободными абразивами. Иваново: ИГЭУ, 2010. 100 с.
- 7 Тамаркин М.А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. на соиск. ученой степ. докт. техн. наук: 05.02.08 – технология машиностроения. Ростов-на-Дону, 1995. 285 с.
- 8 Иванцова Г. М., Остапчук К.А., Овсянникова В.Е. К вопросу применения электрохимического полирования для чистовой обработки деталей // Вестник Курганского государственного университета. 2008. – № 3. – С. 94-96.
- 9 Zamota T. Electrochemical Bases of Macrorunning in of Flat Friction Process at ECMP(G) // Problems of Technology. 2011. – № 4. –P. 56-61
- 10 Шибаев Б.А., Балмасов А.В. Электрохимическое полирование конструкционных легированных сталей // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. –№ 2. – С.23-30.
- 11 Холевин, В. В. Исследование процесса химико-механического полирования деталей и узлов микросистемной техники // Наука и образование. 2011. – № .10. – С. 24-31.

- 12 Jeffrey J. Sniegowski. Chemical-mechanical polishing: enhancing the manufacturability of MEMS. Intelligent Micromachines Department. Sandia National Laboratories. Albuquerque. NM 87185.
- 13 Lebrecht von Trotha et al. Advanced MEMS fabrication using CMP. Semiconductor International. 8/1/2004.
- 14 Грилихес, С. Я. Электрохимическое полирование, Л.: Машиностроение, 1976. 208 с.
- 15 Болдырев, А. И. Электрохимикомеханическая обработка. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2012. – 243 с.
- 16 Aliakseyeu Yu.G., Korolyov A. Yu., Niss V.S., Parshuto A.E., Budnitskiy A.S. The Use of Pulsed Modes in the Electrochemical Polishing of Corrosion-Resistant Steels // Science & Technique. 2019. № 18(3). P. 200-208.
- 17 Королева, Л. Ф. Трибохимическая активность абразивных материалов на основе смешанных оксидов в процессе полирования металлов // Физика и химия обработки материалов. 2006. – № 4. – С. 84-92.
- 18 Королева, Л. Ф. Модифицированные нанодисперсные оксиды для финишного полирования металлов // Diagnostic, Resource and Mechanical of Materials and Structures. 2016. № 2. С. 48-73.
- 19 Технология электрических методов обработки / В.П. Смоленцев, А.В. Кузовкин, А.И. Болдырев и др. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т. 2002. – 310 с.

References

- 1 Babichev A.P. Osnovy` vibracionnoj texnologii. Rostov-na-Donu: Izdatel`skij centr DGTU, 2008. 624 s.
- 2 Baron Yu.M. Texnologiya abrazivnoj obrabotki v magnitnom pole. L.: Mashinostroenie, 1975. 128 s.
- 3 Baron Yu.M., Sung-Lim Ko, Repnikova E.E. Experimental Verification of Deburring by Magnetic Abrasive Finishing (MAF) Method // 2th Asia Pasific Forum on Precision Surface and Deburring Technology. Seoul, 2002. P. 166-178.
- 4 Burlakov V.I. Analiz metodiv obrobki detalej vil`nim abrazivom // Visnik Priazovs`kogo derzhavnogo texnichnogo universitetu. Texnichni nauki. 2017. Vip. 35. S. 132-137.
- 5 Kodacsy J. Apparatus for Cleaning Deburring and Polishing Parts in Magnetic Field // Prac. of 7 th International Conference of Deburring and Surface Finishing/ Berkeley, 2004/ P/ 375-378.
- 6 Pavlyukova N.L., Poletaev V.A., Volkova Yu.M. Povy`shenie e`ffektivnosti otdelochnoj obrabotki xudozhestvenny`x izdelij iz medny`x splavov svobodny`mi abrazivami. Ivanovo: IGE`U, 2010. 100 s.
- 7 Tamarkin M.A. Texnologicheskie osnovy` optimizacii processov obrabotki detalej svobodny`mi abrazivami: dis. na soisk. uchenoj step. dokt. texn. nauk: 05.02.08 – texnologiya mashinostroeniya. Rostov-na-Donu, 1995. 285 s.
- 8 Ivanczova G.M., Ostapchuk K.A., Ovsyannikova V.E. K voprosu primeneniya e`lektroximicheskogo polirovaniya dlya chistovoj obrabotki detalej // Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. 2008. № 3. S. 94-96.
- 9 Zamota T. Electrochemical Bases of Macrorunning in of Flat Friction Process at ECMP(G) // Problems of Technology. 2011. № 4. P. 56-61
- 10 Shibaev B.A., Balmasov A.V. E`lektroximicheskoe polirovanie konstrukcionny`x legirovanny`x stalej // Gal`vanotexnika i obrabotka poverxnosti. 2019. № 2. S.23-30.
- 11 Xolevin V. V. Issledovanie processa ximiko-mexanicheskogo polirovaniya detalej i uzlov mikrosistemnoj texniki // Nauka i obrazovanie. 2011. № .10. S. 24-31.
- 12 Jeffrey J. Sniegowski. Chemical-mechanical polishing: enhancing the manufacturability of MEMS. Intelligent Micromachines Department. Sandia National Laboratories. Albuquerque. NM 87185.
- 13 Lebrecht von Trotha et al. Advanced MEMS fabrication using CMP. Semiconductor International. 8/1/2004.
- 14 Grilixes S.Ya. E`lektroximicheskoe polirovanie, L.: Mashinostroenie, 1976. 208 s.
- 15 Boldy`rev A.I. E`lektroximikomexanicheskaya obrabotka. Voronezh: IPCz VGU, 2012. 243 s.

16 Aliakseyeu Yu.G., Korolyov A.Yu., Niss V.S., Parshuto A.E., Budnitskiy A.S. The Use of Pulsed Modes in the Electrochemical Polishing of Corrosion-Resistant Steels // Science & Technique. 2019. № 18(3). R. 200-208.

17 Koroleva L.F. Triboximicheskaya aktivnost` abrazivny`x materialov na osnove smeshanny`x oksidov v processe polirovaniya metallov // Fizika i ximiya obrabotki materialov. 2006. № 4. S. 84-92.

18 Koroleva L.F. Modificirovanny`e nanodispersny`e oksidy` dlya finishnogo polirovaniya metallov // Diagnostic, Resource and Mechanical of Materials and Structures. 2016. № 2. S. 48-73.

19 Texnologiya e`lektricheskix metodov obrabotki / V.P. Smolencev, A.V. Kuzovkin, A.I. Boldy`rev i dr. Voronezh: Voronezh. gos. texn. un-t. 2002. 310 s.

© Перова А.В., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Григораш В.В., Падурец А.А., 2023

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-56-63



УДК 656.13

UDC 656.13

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ВЛИЯНИЕ ТАХОГРАФА НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

THE IMPACT OF THE TACHOGRAPH ON ROAD SAFETY

✉¹ **Рябчиков Дмитрий Сергеевич**,
к.т.н., доцент кафедры строительства инженерных сооружений и механики, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: rds_62@mail.ru

✉¹ **Ryabchikov Dmitry Sergeevich**,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of construction of engineering structures and mechanics, Ryazan state agrotechnological university named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: rds_62@mail.ru

Шемякин Александр Владимирович,
д.т.н., профессор кафедры организации транспортных процессов и безопасности жизнедеятельности, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: shem.alex62@yandex.ru

Shemyakin Alexander Vladimirovich,
doctor of technical sciences, professor of the department of organization of transport processes and life safety, Ryazan state agrotechnological university named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: shem.alex62@yandex.ru

Успенский Иван Алексеевич,
д.т.н., профессор кафедры технической эксплуатации транспорта, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: ivan.uspensckij@yandex.ru

Uspensky Ivan Alekseevich,
doctor of technical sciences, professor of the department of technical operation of transport, Ryazan state agrotechnological university named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: ivan.uspensckij@yandex.ru

Мальчиков Виктор Николаевич,
аспирант, Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, г. Рязань.

Malchikov Victor Nikolaevich,
postgraduate student, Ryazan state agrotechnological university named after P.A. Kostychev, Ryazan.

Кузнецов Юрий Алексеевич,
д.т.н., профессор кафедры надежности и ремонта машин, Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, г. Орёл.

Kuznetsov Yuri Alekseevich,
doctor of technical sciences, professor of the department of reliability and repair of machines, Oryol state agrarian university named after N.V. Parakhin, Orel.

Аннотация. Для снижения количества дорожно-транспортных происшествий предлагается использование тахографа, как средства контроля за рабочим временем водителя. Тахограф регистрирует пробег автомобиля и время работы водителя. На основе анализа

Annotation. To reduce the number of road accidents, it is proposed to use a tachograph as a means of monitoring the driver's working time. The tachograph records the mileage of the car and the driver's working time. Based on the analysis of statistical data, it is shown that exceeding the shift

статистических данных показано, что превышение продолжительности смены имеет самую весомую долю в распределении самых частых нарушений.

Ключевые слова: ТАХОГРАФ, ПЕРЕВОЗКИ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ, ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫЕ ПРОИСШЕСТВИЯ, УЧЕТ ВРЕМЕНИ.

duration has the most significant share in the distribution of the most frequent violations.

Keywords: TACHOGRAPH, TRANSPORTATION, TRAFFIC SAFETY, TRAFFIC ACCIDENTS, TIME TRACKING.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Тахограф – это устройство, которое устанавливается в транспортных средствах с целью автоматической и полуавтоматической записи данных о движении транспортных средств в дорожном движении, а также определенных периодов работы водителей (рис. 1) [1, 2].



Рисунок 1 – Общий вид тахографа

Тахограф должен записывать длину пройденного пути транспортного средства, скорость транспортного средства, продолжительность управления транспортным средством, продолжительность других видов работы и режима ожидания, продолжительность пауз и дневного отдыха, информацию об открытии корпуса, в который вставлен тахограф, и для электронных записывающих устройств, каждое отключение питания устройства на 100 миллисекунд (кроме освещения), а также питание датчика расстояния и скорости, а также любое прерывание сигнальной связи с датчиком расстояния и скорости.

Закон о рабочем времени, обязательном отпуске мобильных работников и записывающих устройствах в автомобильном транспорте предписывает тип дорожного автотранспорта, который должен иметь встроенный тахограф [3, 4]. Транспортные средства, на которых должен быть установлен цифровой тахограф, — это автомобили с максимально допустимой массой более 3,5 т, транспортные средства с максимально допустимой массой в связке с транспортным средством более 3,5 т, а также автобусы, приспособленные для перевозки более 9 пассажиров, включая водителя.

В данной статье рассматривается возможность использования тахографа, как важнейшего средства обеспечения безопасности дорожного движения.

2 Материалы и методы

По производительности существует два типа тахографов [5-8]:

- 1) аналоговый тахограф (рис. 2);
- 2) цифровой тахограф (рис. 3).

Аналоговый тахограф – это прибор, который записывает данные на тахографическую накладку и включает в себя следующие приборы: указательные части прибора, записывающие детали прибора и устройства, которые записывают на тахографические наклейки каждое отверстие корпуса, в которое вставляется накладка [3, 4]. Аналоговый тахограф больше не устанавливается на новые автомобили.



Рисунок 2 – Виды аналоговых тахографов



Рисунок 3 – Цифровой тахограф

Цифровой тахограф – цифровое устройство, обозначающее все оборудование, предназначенное для установки на дорожные транспортные средства, для отображения, записи и автоматического или полуавтоматического хранения сведений о движении таких транспортных средств и индивидуальной продолжительности работы их водителей [5, 6, 9]. Это оборудование включает в себя кабели, датчики, электронное информационное устройство водителя, один (два) считывателя карт для вставки одной или

двух карт памяти драйвера, встроенный или отдельный принтер, приборы отображения, устройства для зачистки памяти данных, устройства для отображения или печати данных по требованию, а также устройства записи мест, где начинается и заканчивается ежедневное рабочее время.

Цифровой тахограф записывает все данные в память устройства и на карту драйвера. Сам тахограф имеет возможность сохранять данные за 365 дней. С прибора можно распечатать данные о вождении, рабочем времени, отпусках, событиях и неисправностях на тахографе.

Цифровой тахограф сконструирован таким образом, что он показывает водителю и предупреждает его, когда ему нужно прервать поездку, а также, когда заканчивается его ежедневная поездка. Поскольку он записывает все события и ошибки на тахографе, возможность манипулирования значительно снижается по сравнению с аналоговым тахографом.

Карта водителя (рис. 4) идентифицирует водителя и позволяет записывать данные с транспортного средства, прописанные в модуле тахографа, соответствующему лицу (водителю) [10, 11]. Он служит для записи рабочего времени, вождения, доступности и отдыха, а также для пройденного пути, ошибок и событий. Карта водителя сконструирована таким образом, что она должна хранить информацию не менее 28 рабочих дней водителя и выдается сроком на 5 лет.



Рисунок 4 – Карта водителя

Помимо карты водителя, существуют также карта компании (идентифицирует предприятие и обеспечивает доступ ко всем данным в тахографе, относящимся к этому предприятию, с целью их отображения, загрузки и печати и блокировки доступа другой компании к данным собственного предприятия), карта мастерской (идентифицирует техника мастерской и позволяет активировать, калибровать, тестировать и извлекать данные из тахографа) и карта мониторинга; (идентифицирует лицо, уполномоченное проводить наблюдение, и обеспечивает доступ к данным, хранящимся в тахографах или картах водителя, а также для чтения, печати и извлечения).

Чтобы предотвратить несанкционированное использование и манипуляции с картой мастерской, это единственная карта, защищенная ПИН-кодом, который известен только специалисту, которому читается карта.

3 Результаты исследований

Применение тахографа во многом определяет фактор безопасности дорожного движения [1-5, 12].

Использование системы тахограф-онлайн позволит в режиме реального времени контролировать данные о нарушениях:

- Скорости движения.
- Времени управления до первого отдыха.
- Времени управления в течении смены.
- Времени правления в течении рабочей недели.

- Времени управления в течении двух рабочих недель.
- Времени перерыва на отдых от управления.
- Установленного времени ежедневного отдыха.
- Времени ежедневного отдыха.

В Российской Федерации в течение последних 9 лет продолжается снижение основных показателей дорожно-транспортной аварийности.

В 2021 году на улицах и дорогах страны зарегистрировано 133 331 дорожно-транспортное происшествие, в котором погибли и были ранены люди.

По данным в ДТП погибли 14 874 человека и получили ранения 167 856 человек (рис. 5).



Рисунок 5 – Динамика основных показателей аварийности

В отличии от других категорий транспортных средств доля погибших в происшествиях с участием грузовых автомобилей в два раза превышает соответствующую долю дорожно-транспортных происшествий (рис. 6).

Основными причинами ДТП являются [13-15]:

- Нарушение правил дорожного движения водителями.
- Недостатки эксплуатационного состояния и обустройства улиц и дорог.
- Нарушение правил дорожного движения пешеходами.
- Техническая неисправность транспорта.

Так же почти на треть увеличилось количество совершаемых ДТП по вине водителей грузовых автомобилей, связанных с нарушением режима труда и отдыха (рис. 7).



Рисунок 6 – Распределение аварийности по типам транспортных средств

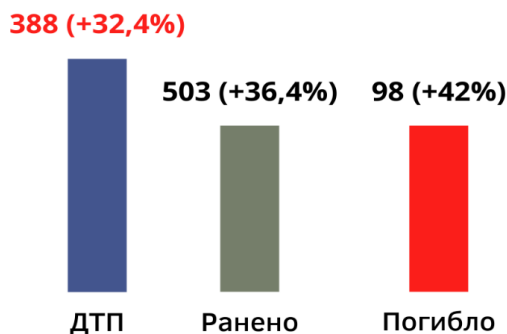


Рисунок 7 – Статистика аварийности при несоблюдении режима труда и отдыха

Для снижения аварийности из-за неконтролируемого увеличения продолжительности рабочего дня в РФ в последние годы все активнее внедряют цифровые тахографы.

Тахограф регистрирует пробег машины и время работы водителя. Как показывает статистика нарушений режима труда и отдыха водителей, превышение продолжительности смены имеет самую весомую долю в распределении самых частых нарушений (рис. 8).

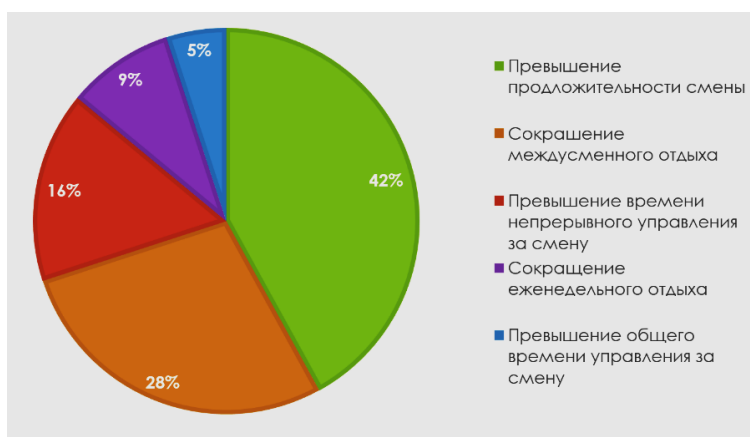


Рисунок 8 – Статистика самых частых нарушений

На рис. 9 показан уровень нарушения нормы режима труда и отдыха водителей. В таблице 1 представлены данные об уровнях критичности превышения нормы режима труда и отдыха водителей.

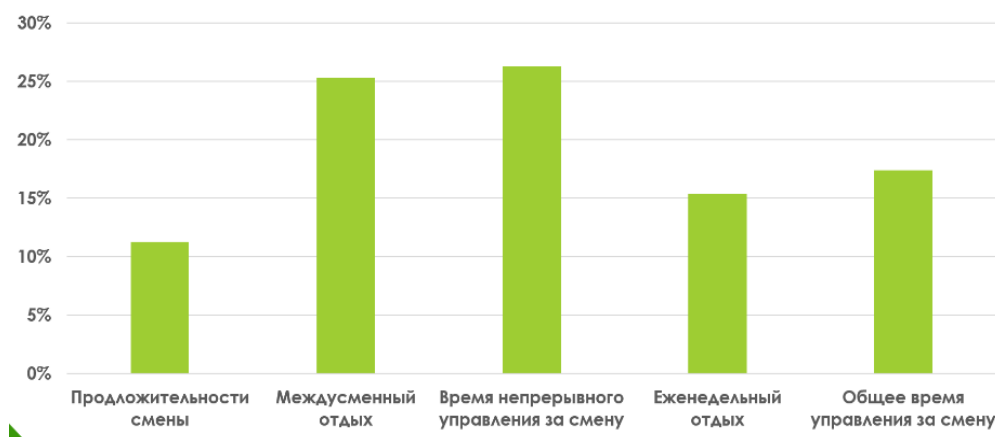


Рисунок 9 – Уровень нарушения нормы режима труда и отдыха водителей

Таблица 1 – Уровень критичности превышения нормы режима труда и отдыха водителей

№ п/п	Превышение нормы	Уровень критичности
1	30 %	Критический
2	29 % - 15 %	Высокий
3	14 %-5 %	Средний
4	4 % и меньше	Низкий

На сегодняшний день тахограф — это инструмент, благодаря которому ежегодно удается существенно снизить количество аварий с участием грузового автотранспорта, происходящих из-за несоблюдения водителями установленного режима труда и отдыха.

4 Обсуждение и заключение

Для организации перевозочного процесса важно следить за работой профессиональных водителей при эксплуатации автотранспортных средств в дорожно-пассажирских и грузовых перевозках в первую очередь за безопасностью всех участников дорожно-транспортной системы. Применение тахографа является обязательным в соответствии с законодательством, что позволяет контролировать работу экипажей коммерческих автомобилей, анализировать рабочей нагрузки каждого отдельного водителя и применения рациональной техники управления автотранспортными средствами. Вклад тахографических записей в работу водителя отражается не только в мониторинге его работы, соблюдении правовых норм в отношении рабочего времени, обязательных отпусков в течение рабочего дня, но и в значимых возможностях профилактики дорожно-транспортных происшествий.

Большая ответственность также лежит на организаторах транспорта в самих транспортных компаниях, которые, контролируя тахографические записи и регулярно контролируя работу водителей, могут организовать работу водителей таким образом, чтобы они соблюдали правовые нормы и, таким образом, способствовали дальнейшей безопасности движения.

Список литературы

- 1 Черненко, А.В. Внедрение в производство коммерческих автомобилей с тахографами с целью выполнения законодательных требований и повышения безопасности дорожного движения [Текст] / А. В. Черненко // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2014. – № 4(106). – С. 358-363.
- 2 Гелязутдинова, Р. Ш. Лицензирование деятельности по установке и обслуживанию тахографов [Текст] / Р. Ш. Гелязутдинова // Трибуна ученого. – 2021. – № 3. – С. 163-171.
- 3 Дьяченко, Д. В. Применение тахографов для обеспечения безопасности дорожного движения [Текст] / Д. В. Дьяченко, А. С. Пилипович // Новости навигации. – 2016. – № 3. – С. 22-25.
- 4 Фытова, О.С. Квалиметрический анализ качества тахографа [Текст] / О. С. Фытова, Э. А. Анисимов, Е. Ю. Салдаева // Моя профессиональная карьера. – 2023. – Т.1, №48. – С. 67-73.
- 5 Деревягин, Р. Ю. Применение электронных тахографов в РФ [Текст] / Р. Ю. Дерягин, В. В. Гребенков // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2021. – № 34. – С. 93-95.
- 6 Трофимов, А.В. Анализ технических требований к тахографам, устанавливаемым на транспортные средства Российских автоперевозчиков [Текст] / А. В. Трофимов, Е. А. Майер // Техника и технологии строительства. – 2016. – № 3(7). – С. 47-53.
- 7 Малинин, И. С. О проблеме контроля технического состояния тахографов [Текст] / И. С. Малинин, С. М. Мороз // Грузовик. – 2022. – № 5. – С. 22-28.
- 8 Мельникова, Т. Е. Проблемы применения тахографов как средства технического контроля за грузовыми автоперевозками [Текст] / Т. Е. Мельникова, С. Е. Мельников // Вестник транспорта. – 2017. – № 8. – С. 30-31.
- 9 Афинеевский, С. Тахографы необходимы для борьбы с переутомлением водителей [Текст] / С. Афинеевский // Грузовое и пассажирское хозяйство. – 2013. – № 5. – С. 44-49.

- 10 Арехина, И. А. Учет тахографов и карт водителя [Текст] / И. А. Арехина // Бухгалтерский учет. – 2017. – № 2. – С. 97-100.
- 11 Березин, В. В. Учет тахографов [Текст] / В. В. Березин // Бухгалтерский учет. – 2021. – № 5. – С. 79-82.
- 12 Шемякин, А.В. Комплексная цифровизация на предприятиях автомобильного транспорта: перспективы внедрения [Текст] / А. В. Шемякин, А. Б. Мартынушкин, О. В. Лозовая, Н. Н. Пашканг // Грузовик. – 2023. – № 6. – С. 30-34.
- 13 Липтович, И. Э. Причины аварийности и травматизма при ДТП [Текст] / И. Э. Липкович, А. В. Пикалов, Н. В. Петренко // Грузовое и пассажирское автохозяйство. – 2012. – № 2. – С. 48-53.
- 14 Левичев, В. Основные причины ДТП [Текст] / В. Левичев // Мир дорог. – 2021. – № 136. – С. 42-43.
- 15 Никитин, А. М. Причины дорожно-транспортных происшествий в АПК / А. М. Левичев, С. Н. Поцепай, Т. И. Васкина // Сельский механизатор. – 2020. – № 1. – С. 38-40.

References

- 1 Chernenko, A.V. Introduction into the production of commercial vehicles with tachographs in order to fulfill legislative requirements and improve road safety [Text] / A.V. Chernenko // Proceedings of the R. E. Alekseev NSTU. – 2014. – № 4(106). – Pp. 358-363.
- 2 Gelyazutdinova, R. S. Licensing of activities for the installation and maintenance of tachographs [Text] / R. S. Gelyazutdinova // Tribune of the scientist. – 2021. – No. 3. – pp. 163-171.
- 3 Dyachenko, D. V. The use of tachographs to ensure road safety [Text] / D. V. Dyachenko, A. S. Pilipovich // Navigation news. – 2016. – No. 3. – pp. 22-25.
- 4 Fytova, O.S. Qualimetric analysis of tachograph quality [Text] / O. S. Fytova, E. A. Anisimov, E. Y. Saldaeva // My professional career. – 2023. – Vol.1, No. 48. – pp. 67-73.
- 5 Derevyagin, R. Yu. The use of electronic tachographs in the Russian Federation [Text] / R. Yu. Deryagin, V. V. Grebenkov // New materials and technologies in mechanical engineering. – 2021. – No. 34. – pp. 93-95.
- 6 Trofimov, A.V. Analysis of technical requirements for tachographs installed on vehicles of Russian road carriers [Text] / A.V. Trofimov, E. A. Mayer // Technique and technologies of construction. – 2016. – № 3(7). – Pp. 47-53.
- 7 Malinin, I. S. On the problem of monitoring the technical condition of tachographs [Text] / I. S. Malinin, S. M. Moroz // Truck. – 2022. – No. 5. – pp. 22-28.
- 8 Melnikova, I.e., The problems of using tachographs as a means of technical control over trucking [Text] / T. E. Melnikova, S. E. Melnikov // Bulletin of Transport. – 2017. – No. 8. – pp. 30-31.
- 9 Afineevsky, S. Tachographs are necessary to combat overwork of drivers [Text] / S. Afineevsky // Cargo and passenger economy. – 2013. – No. 5. – pp. 44-49.
- 10 Arekhina, I. A. Accounting of tachographs and driver cards [Text] / I. A. Arekhina // Accounting. – 2017. – No. 2. – pp. 97-100.
- 11 Berezin, V. V. Accounting of tachographs [Text] / V. V. Berezin // Accounting. – 2021. – No. 5. – pp. 79-82.
- 12 Shemyakin, A.V. Integrated digitalization at automobile transport enterprises: prospects for implementation [Text] / A.V. Shemyakin, A. B. Martynushkin, O. V. Lozovaya, N. N. Pashkanng // Truck. – 2023. – No. 6. – pp. 30-34.
- 13 Liptovich, I. E. Causes of accidents and injuries in road accidents [Text] / I. E. Lipkovich, A.V. Pikalov, N. V. Petrenko // Cargo and passenger car industry. – 2012. – No. 2. – pp. 48-53.
- 14 Levichev, V. The main causes of an accident [Text] / V. Levichev // The world of roads. – 2021. – No. 136. – pp. 42-43.
- 15 Nikitin, A.M. The causes of road accidents in the agro-industrial complex / A.M. Levichev, S. N. Potsepai, T. I. Vaskina // Rural mechanizer. – 2020. – No. 1. – pp. 38-40.

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-64-77



УДК 656.13

UDC 656.13

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОМАТИЗАЦИЯ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК С ПОМОЩЬЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОГРАММ

AUTOMATION OF CARGO TRANSPORTATION WITH THE HELP OF INFORMATION PROGRAMS

✉¹ **Рябчиков Дмитрий Сергеевич**, к.т.н., доцент кафедры строительства инженерных сооружений и механики, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: rds_62@mail.ru

✉¹ **Ryabchikov Dmitry Sergeevich**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of construction of engineering structures and mechanics, Ryazan state agrotechnological university named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: rds_62@mail.ru

Шемякин Александр Владимирович, д.т.н., профессор кафедры организации транспортных процессов и безопасности жизнедеятельности, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: shem.alex62@yandex.ru

Shemyakin Alexander Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor of the department of organization of transport processes and life safety, Ryazan state agrotechnological university named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: shem.alex62@yandex.ru

Успенский Иван Алексеевич, д.т.н., профессор кафедры технической эксплуатации транспорта, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: ivan.uspensckij@yandex.ru

Uspensky Ivan Alekseevich, doctor of technical sciences, professor of the department of technical operation of transport, Ryazan state agrotechnological university named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: ivan.uspensckij@yandex.ru

Мальчиков Виктор Николаевич, аспирант, Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, г. Рязань.

Malchikov Victor Nikolaevich, postgraduate student, Ryazan state agrotechnological university named after P.A. Kostychev, Ryazan.

Кузнецов Юрий Алексеевич, д.т.н., профессор кафедры надежности и ремонта машин, Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, г. Орёл.

Kuznetsov Yuri Alekseevich, doctor of technical sciences, professor of the department of reliability and repair of machines, Oryol state agrarian university named after N.V. Parakhin, Orel.

Аннотация. Критерием оптимальности транспортного процесса является минимум простоев и максимум коэффициента использования пробега. Целью маршрутизации является определение маршрутов грузовых перевозок, обеспечивающих полное выполнение поставленной задачи

Annotation. The criterion for the optimality of the transport process is a minimum of downtime and a maximum of mileage utilization. The purpose of routing is to determine the routes of cargo transportation, ensuring full fulfillment of the task in terms of volume and nomenclature of

по объему и номенклатуре грузов, а также достижение максимальной загруженности на километр. В статье предлагается применить логистический подход в форме оцифровки транспортного процесса.

cargo, as well as achieving maximum load per kilometer. The article proposes to apply a logistics approach in the form of digitization of the transport process.

Ключевые слова: ГРУЗОВЫЕ ПЕРЕВОЗКИ, АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРОГРАММЫ, ПРОБЕГ, МАРШРУТ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕВОЗКИ, ЛОГИСТИКА.

Keywords: CARGO TRANSPORTATION, AUTOMATED PROGRAMS, MILEAGE, ROUTE, ECONOMIC INDICATORS OF TRANSPORTATION, LOGISTICS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Важнейшей задачей оптимизации транспортного процесса является составление рациональных маршрутов. Критерием оптимальности является: минимум простоев и максимум коэффициента использования пробега при перевозке определенного объема груза.

Цель маршрутизации грузовых перевозок заключается в определении маршрутов грузовых перевозок, обеспечивающих полное выполнение поставленной задачи по объему и номенклатуре грузов, и достижение максимальной загруженности на километр [1-6].

Количество простоев автомобилей увеличивается без системы оцифровки. Более 50 % от общего пробега автомобиля за смену приходится на холостой ход или на превышение пробега [7-10]. Причины такой ситуации заключаются в следующем [1-3, 11-14]:

- 1) автомобили возвращаются в гараж (после каждой поездки автомобиль на холостом ходу отправляется на базу для регистрации и получения следующей заявки);
- 2) каждый свободный автомобиль получает заявку (при распределении заявок не учитывается, как далеко находится свободное автотранспортное средство (АТС) от клиента);
- 3) заявки распространяются вручную (существует высокий риск ошибок, неоптимального распространения или предвзятого распространения заявок логистами);
- 4) водитель сам выбирает маршрут (водитель может выбрать длинный маршрут неосознанно или намеренно);
- 5) цель поездки не всегда известна (водители и клиенты могут использовать транспорт в личных целях).

В данной статье предлагается применить логистический подход в форме оцифровки транспортного процесса. Необходимо проанализировать автоматизированные программы, которые помогают сократить количество непродуктивных запусков, и выбрать подходящую.

2 Материалы и методы

В 2022 году началось активное внедрение электронного документооборота в сфере грузовых перевозок [13, 15].

Оцифровку логистики следует понимать не только как электронный документооборот и не только как сферу грузоперевозок. Логистика включает в себя закупку, транспортировку, продажу и хранение товаров, а также управление финансовыми и информационными потоками, связанными с ними [10-15]. Цифровые технологии помогают управлять закупками и цепочками поставок, оптимизировать хранение, а также передавать информацию о перемещении товаров и передаче запасов от продавца к покупателю тем, для кого эта информация предназначена. На рис. 1 показаны задачи, которые решает цифровизация логистики. Цифровизация включает в себя три направления (рис. 2).

Цифровизация логистики решает следующие задачи

- 1) Снизить простои оборудования и повысить объёмы выпуска продукции.
- 2) Ускорить процессы проектирования производства и доставки продукта до потребителя.
- 3) Снизить затраты на проведение натурных испытаний за счёт внедрения цифровых двойников и инструментов визуального моделирования.
- 4) Повысить уровень прозрачности операций и снизить затраты по всему циклу управления цепями поставок.
- 5) Снизить потери энергии при совершении технологических операций.

Рисунок 1 – Задачи, решаемые цифровизацией логистики

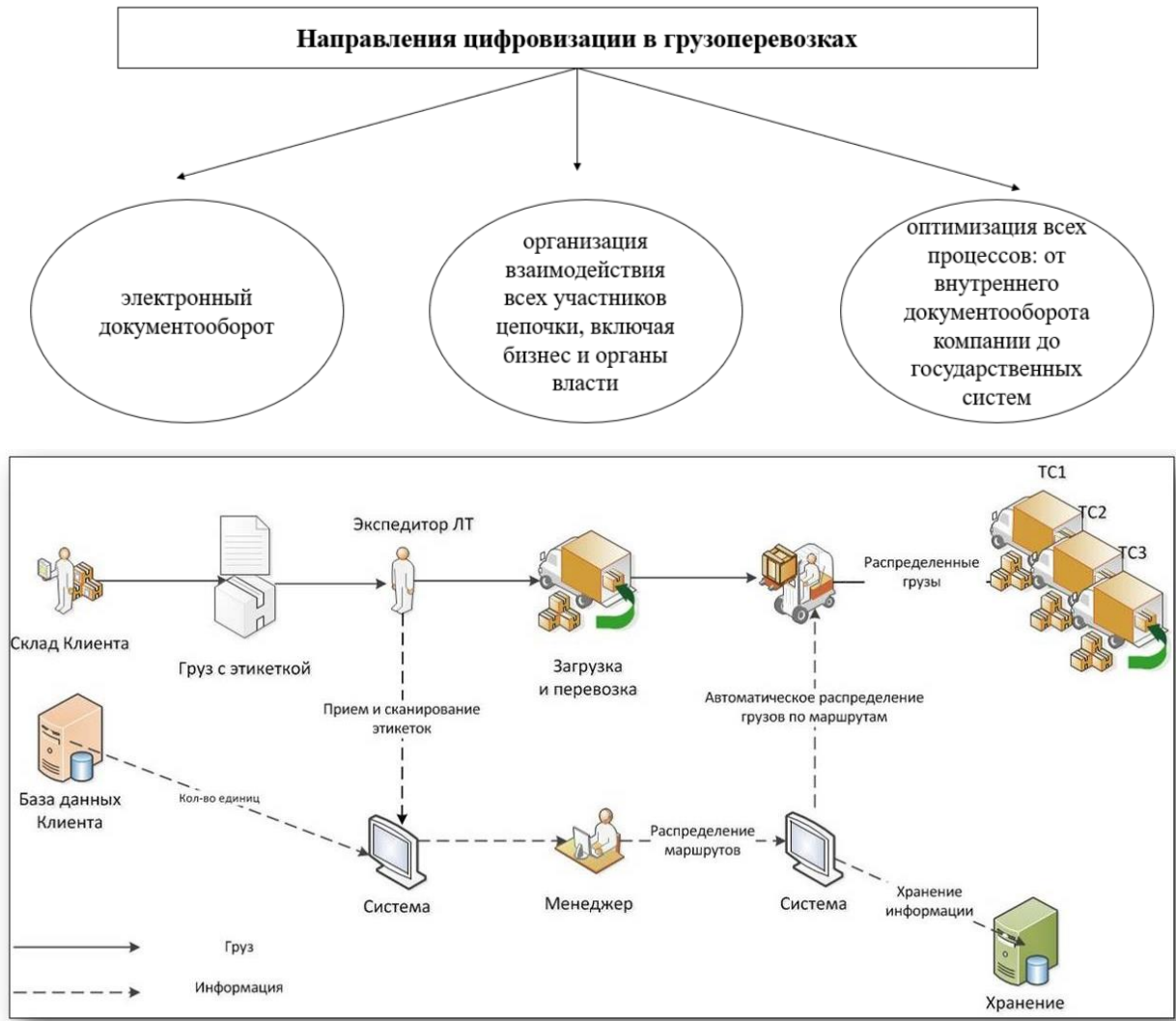


Рисунок 2 – Направления цифровизации грузоперевозок

На рынке ИТ-услуг существует определенный перечень программных решений, позволяющих транспортным компаниям рассчитывать маршруты доставки заказов клиентам. Данные программные продукты позволяют эффективно планировать маршруты и график движения транспортных средств, оптимально распределять нагрузку между всем автотранспортом, отслеживать местонахождение машин и водителей, а также формировать план-факт выполненных маршрутов. ИТ-решения позволяют уменьшить затраты на перевозки и доставку (за счет эффективного планирования маршрутов) и улучшают качество обслуживания своих клиентов (за счет быстрой и спланированной доставки грузов и товаров).

Для сравнения были выбраны программы маршрутизаторы грузоперевозок, которые представлены ниже.

1. Яндекс Маршрутизация (рис. 3). Это сервис для автоматического распределения заказов между транспортными средствами (или пешеходами) и составления маршрутов для каждого из них. В процессе распределения общее время и расстояние или специальная целевая функция общих затрат сводятся к минимуму. Алгоритм учитывает более 50 параметров: виды транспорта, временные интервалы, параметры планирования, дополнительные ограничения и т.д.; создает оптимальные маршруты выполнения заказов с учетом интервалов доставки, времени обслуживания, текущих заторов на дорогах и прогноза движения, а также выравнивает маршруты – равномерное распределение по количеству точек по продолжительности маршрута. Создает точные маршруты для 1000 точек за 15 минут.

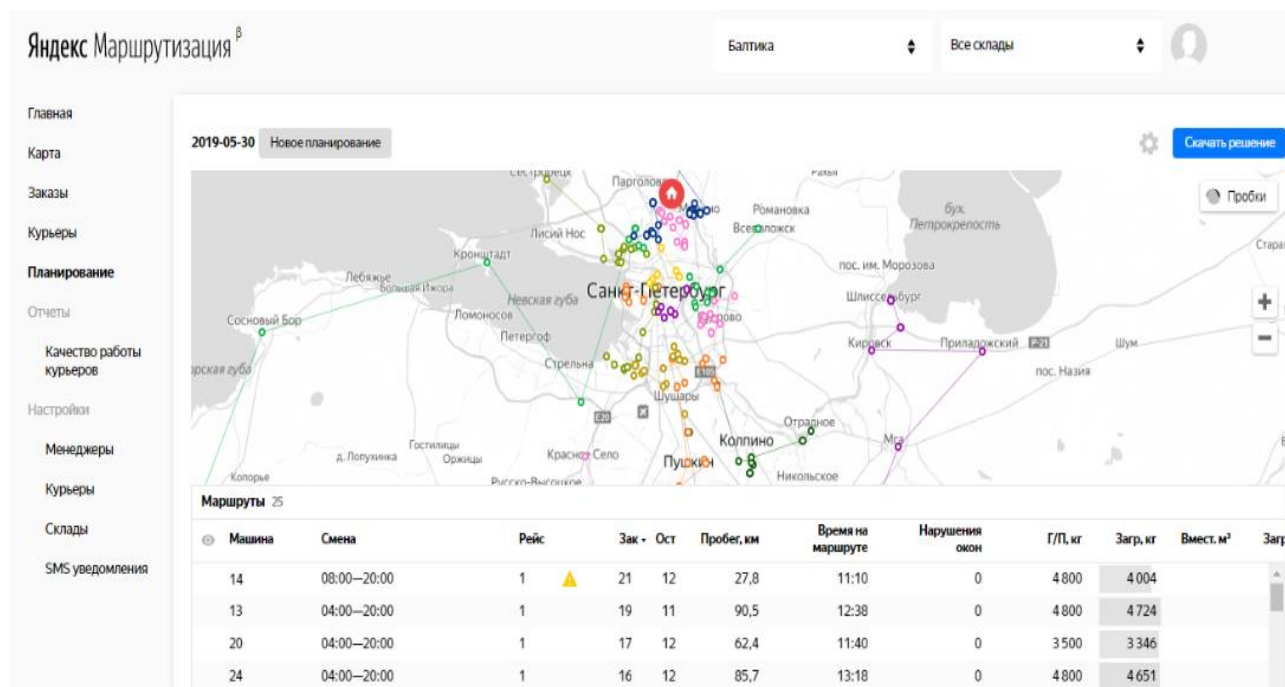


Рисунок 3 – Яндекс Маршрутизация

2. 1С: ТЛЭ КОРП (рис. 4). Данная программа включает в себя алгоритм очередей, алгоритм Кларка-Райта и фиксированные маршруты (рис. 5).

Заказ на ТС M0000000050 от 13.05.2020 15:05:23

Основное Взаимодействия Задачи Очередь уведомлений Присоединенные файлы

Провести и закрыть Финансы Карта Тара Печать Настройки Еще ?

Номер: M0000000050 от: 13.05.2020 15:05:23 Детализация: Заказ Грузовые места Товары Открыт

Организация: Мегатранс ООО Заказ от: Контрагента Подразделения

Контрагент: Компания "Юристовъ и Ко" Договор: № 106 от 13.05.2020 (р) Должен нам 14 120,80 р.

Основное Грузовые места Товары (2) Доходы (3) Расходы Документы (1) Дополнительно

N	Услуга	Тариф	Колич. (пл...)	Цена (план)	Сумма (план)	НДС (план)	Всего (план)	Ва...	Статья доходов
	Содержание	Параметр выработки	Колич.	Цена (факт)	Сумма (факт)	НДС (факт)	Всего		Ставка НДС
1	Транспортные услуги	Доплата за объем г...	12,800	252,00	3 225,60	537,60	3 225,60	р.	Доходы от пере...
	Транспортные услуги	Объем груза	12,800	252,00	3 225,60	537,60	3 225,60		20%
2	Транспортные услуги	Транспортные услуг...	550,200	36,00	19 807,20	3 301,20	19 807,20	р.	Доходы от пере...
	Транспортные услуги	Пробег общий	550,200	36,00	19 807,20	3 301,20	19 807,20		20%
3	Доплата для юриди...	Доплата для юриди...	9,04	120,00	1 088,00	181,33	1 088,00	р.	Доходы от пере...
	Доплата для юриди...	Время в работе	9,04	120,00	1 088,00	181,33	1 088,00		20%
			572,067		24 120,80 р.	4 020,13 р.	24 120,80 р.		

Рисунок 4 – 1С: ТЛЭ КОРП

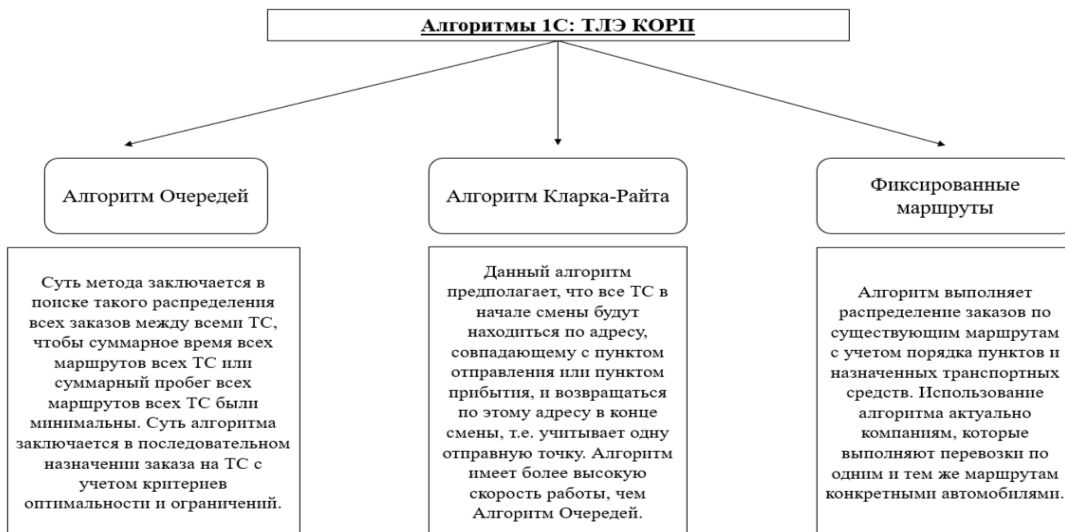


Рисунок 5 – Алгоритмы, применяемые в программе 1С: ТЛЭ КОРП

3. Delans Маршрутизация. Этот алгоритм использует общую начальную точку транспортного средства или конечную точку. Алгоритм минимизирует пробег транспортного средства, учитывает грузовые и габаритные ограничения, типы грузов и график движения транспортного средства. При создании маршрутов можно учитывать географические ограничения и группировку точек в пределах заданного радиуса и исключать длительные поездки в удаленные пункты доставки. Результатом маршрутизации может быть как равномерное распределение заказов, так и уменьшение количества транспортных средств с максимальной нагрузкой.

4. Муравьиная логистика (рис. 6). Программа позволяет получать данные о времени и расстоянии, заказе и расписании посещений пунктов доставки. Расчет маршрута минимален по цене и сбалансирован по протяженности и времени, а также оптимизирует стоимость проезда и рассчитывает стоимость использования транспортного средства на маршруте. Автоматически выбирается количество автомобилей, необходимое для доставки товаров, чтобы обеспечить более оптимальную загрузку автомобиля.

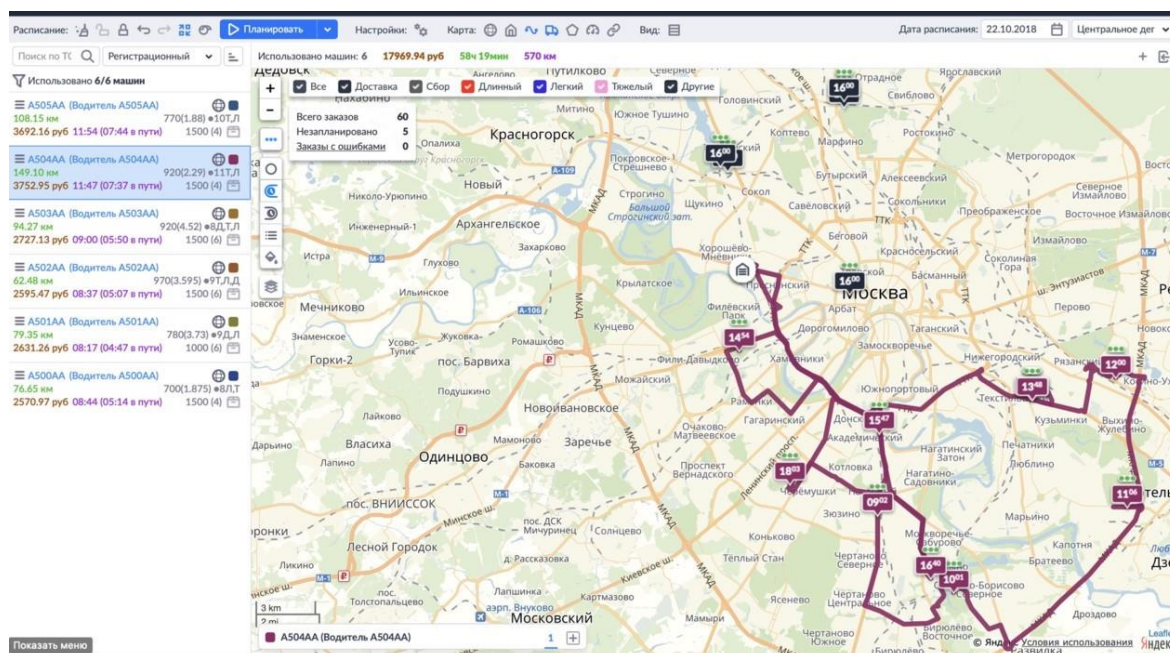


Рисунок 6 – Муравьиная логистика

В таблице 1 представлены карты, которые поддерживает каждая программа, а в таблице 2 показаны параметры для расчета маршрутов. В таблице 3 приведены параметры транспортных средств, которые учитываются в каждой программе, а в таблице 4 – учет транспортных заторов и опозданий.

Выбор систем маршрутизации должен выполняться заказчиком системы, исходя из необходимых параметров и особенностей именно конкретного бизнеса. Ключевой фактор выбора – не стоимость решения, а функции, задачи и бизнес-процессы, покрывающие данный продукт.

Таблица 1 – Поддержка навигационных карт

Продукт	Карты
Яндекс Маршрутизация	Яндекс.Карты
1С: ТЛЭ КОРП	OpenStreetMap, Ингит, Яндекс.Карты
Delans Маршрутизация	OpenStreetMap, Яндекс.Карты
Муравьиная логистика	Яндекс.Карты, OpenStreetMap, 2gis map, Visicom и др.

Таблица 2 – Режим оптимизации

Продукт	Режим оптимизации
Яндекс. Маршрутизация	По стоимости, по времени, по расстоянию
1С: ТЛЭ КОРП	По стоимости, по времени, по расстоянию
Delans Маршрутизация	По времени, расстоянию, равномерно по ТС, оптимально по ТС с учетом загрузки, минимизация ТС
Муравьиная логистика	Минимальный по цене, сбалансированный по цене и времени, по тарификации ТС и расчету стоимости, использования ТС по маршруту.

Таблица 3 – Параметры транспортного средства

Продукт		Параметры транспортного средства
Яндекс Маршрутизация		<ul style="list-style-type: none"> – Виды транспорта: автомобильный, общественный и пешие курьеры. – Приоритеты разных видов транспорта (собственного или привлеченного). – Поддержка нескольких смен, нескольких рейсов в день. – Возврат на склад в конце смены. – Количество доступных мест для загрузки. – Стоимость работы ТС/простоя. – Стоимость выезда в рейс.
1С: ТЛЭ КОРП	Алгоритм Очередей	<ul style="list-style-type: none"> – Разрешенные типы ТС. – Вид транспорта. – Учитывать в приоритете собственный транспорт. – Весогабаритные характеристики ТС: грузоподъемность, объем кузова, минимальный объем и вес груза, минимальное и максимальное количество упаковок. – Выезд и возвращение ТС.
	Алгоритм Кларка-Райта	<ul style="list-style-type: none"> – Разрешенные типы ТС. – Вид транспорта. – Ограничения по минимальной загрузке ТС. – Коэффициент загрузки кузова по объему, по весу. – Весогабаритные характеристики ТС. – Выезд и возвращение ТС.
	Фиксированные маршруты	<ul style="list-style-type: none"> – Вид транспорта. – Объем кузова и грузоподъемность ТС. – Учет максимального количества упаковок ТС. – Коэффициент загрузки кузова по объему, по весу.
Delans Маршрутизация		<ul style="list-style-type: none"> – Вид транспорта. – Поддержка нескольких смен, нескольких рейсов в день. – Возврат на склад в конце смены – Количество доступных мест для загрузки. – Весогабаритные характеристики ТС: грузоподъемность, вместимость, габариты. – Время работы.
Муравьиная логистика		<ul style="list-style-type: none"> – Тип ТС. – Весогабаритные характеристики ТС: грузоподъемность, вместимость, габариты. – Время работы.

Яндекс. Маршрутизация и Delans Маршрутизация подходит и для курьерских, и для торговых компаний, в том числе интернет-магазинов, дистрибьюторских и транспортных компаний. 1С: ТЛЭ КОРП целесообразно использовать для транспортно-экспедиционных компаний с необходимостью учета затрат на ГСМ и обслуживание автопарка. Муравьиная логистика перспективна для транспортных и торговых компаний.

Для 1С: ТЛЭ КОРП было рассмотрено 3 бесплатных алгоритма маршрутизации в одной системе. В том числе, можно подключить и Яндекс Маршрутизация (по тарифам сервиса), что дает возможность выбрать определенный алгоритм под разные задачи. Другие решения, Яндекс Маршрутизация и Муравьиная логистика, имеют определенные алгоритмы, которые подойдут конкретным бизнесам, но могут не учитывать особенности перевозок других компаний такие, как, например, мультимодальные перевозки. Delans Маршрутизация учитывает многие

параметры в алгоритме, в том числе и есть возможность подключить Яндекс Маршрутизация, что удобно, имея возможность выбрать необходимый.

Таблица 4 – Учет транспортных заторов и опозданий

Продукт	Учет транспортных заторов и опозданий
Яндекс Маршрутизация	<ul style="list-style-type: none"> – Прогноз загруженности дорог по 150 параметрам с дискретностью 5 минут. – Учет перекрытий дорожных работ, ДТП. – Ограничения на движение типов техники. – Штрафы за опоздания. – Учет и исключение платных дорог. – Поддержка специальных транспортных зон.
1С: ТЛЭ КОРП	<ul style="list-style-type: none"> – Категорийность дорог. – Направление движения и разметка. – Ограничения скорости. – Прогноз загруженности дорог. – Штрафы за опоздания.
Delans Маршрутизация	<ul style="list-style-type: none"> – Учет опозданий.
Муравьиная логистика	<ul style="list-style-type: none"> – Категорийность дорог. – Направление движения и разметка. – Ограничения скорости. – Штрафы за опоздания.

Если сравнивать ценообразование, тарифы сервиса Яндекс Маршрутизации не фиксированы и могут потребовать излишних платежей за дополнительные запросы. Это относится также к сервису Муравьиная логистика. Непонятно как учитывать маршруты и точки в расчете. В решениях 1С: ТЛЭ КОРП и Delans более прозрачное ценообразование, так как оплачивается стоимость коробочного решения или возможность приобретения облачного решение в аренду. Для работы нами предлагается использование программы 1С: ТЛЭ КОРП.

3 Результаты исследований

Показатель, который влияет на экономические и технические значения перевозки – пробег. Пробег делится на производительный и непроизводительный. Производительный пробег влияет на прибыль предприятия, а непроизводительный лишь увеличивает затраты перевозки.

Годовой пробег автотранспортного средства определяется по формуле, км:

$$L_{\Gamma} = A_{Дсп} \cdot L_{сс} \cdot D_{р} \cdot \alpha_{в}, \quad (1)$$

где $A_{Дсп}$ – списочное количество автотранспортных единиц на предприятии; $L_{сс}$ – среднесуточный пробег автомобиля (км); $D_{р}$ – количество рабочих дней в году (дни); $\alpha_{в}$ – коэффициент выпуска подвижного состава на линию.

Для изотермических фургонов марки ГАЗель NEXT:

$$L_{\Gamma} = 5 \cdot 110 \cdot 340 \cdot 0,93 = 173910.$$

Для изотермических фургонов на базе шасси марки КАМАЗ 4308:

:

$$L_{\Gamma} = 2 \cdot 98 \cdot 340 \cdot 0,93 = 61975,2.$$

Для изотермических фургонов на базе шасси марки Ford Transit:

$$L_{\Gamma} = 2 \cdot 105 \cdot 340 \cdot 0,93 = 66402.$$

Производительный пробег определим по следующей формуле, км:

$$L_{\Gamma}^{\text{пп}} = L_{\Gamma} * \beta, \quad (2)$$

где β – использование пробега за расчетный период (т.к. большинство маршрутов кольцевых при перевозке продовольственных товаров, среднее значение данного коэффициента – 0,64).

Получим:

Для изотермических фургонов марки ГАЗель NEXT:

$$L_{\Gamma}^{\text{пп}} = 173910 \cdot 0,64 = 111302,4.$$

Для изотермических фургонов на базе шасси марки КАМАЗ 4308:

$$L_{\Gamma}^{\text{пп}} = 61975,2 \cdot 0,64 = 39664,13.$$

Для изотермических фургонов на базе шасси марки Ford Transit:

$$L_{\Gamma}^{\text{пп}} = 66402 \cdot 0,64 = 42497,28.$$

При использовании программы 1С: ТЛЭ КОРП, коэффициент использования пробега вырастает с 0,64 до 0,79. Рассчитаем груженный пробег с применением 1С: ТЛЭ КОРП.

Для изотермических фургонов марки ГАЗель NEXT:

$$L_{\Gamma}^{\text{пп (1C)}} = 173910 \cdot 0,79 = 137388,9.$$

Для изотермических фургонов на базе шасси марки КАМАЗ 4308:

$$L_{\Gamma}^{\text{пп (1C)}} = 61975,2 \cdot 0,79 = 48960,4.$$

Для изотермических фургонов на базе шасси марки Ford Transit:

$$L_{\Gamma}^{\text{пп (1C)}} = 66\ 402 \cdot 0,79 = 52457,58.$$

Определим разницу в производительных пробегах автотранспортных средств по формуле, км:

$$\Delta L_{\Gamma}^{\text{пп}} = L_{\Gamma}^{\text{пп (1C)}} - L_{\Gamma}^{\text{пп}}. \quad (3)$$

Для изотермических фургонов марки ГАЗель NEXT:

$$\Delta L_{\Gamma}^{\text{пп}} = 137\ 388,9 - 111\ 302,4 = 26086,5.$$

Для изотермических фургонов на базе шасси марки КАМАЗ 4308:

$$\Delta L_{\Gamma}^{\text{пп}} = 48\ 960,4 - 39\ 664,13 = 9296,27.$$

Для изотермических фургонов на базе шасси марки Ford Transit:

$$\Delta L_r^{np} = 52\,457,58 - 42\,497,28 = 9960,3.$$

Производительный пробег влияет на выполненную транспортную работу, которая в свою очередь фигурирует в формуле по нахождению себестоимости. Сравним показатели производительности до внедрения 1С: ТЛЭ КОРП и после.

$$W_p^B = L_r^{np} \cdot q_{гр}^{cp}, \quad (4)$$

где W_p^B – выполненная транспортная работа парка автотранспортных средств (ткм);

$q_{гр}^{cp}$ – средняя грузоподъемность среднесписочного автомобиля (т).

Средняя грузоподъемность одного автомобиля определяется по формуле, т:

$$q_{гр}^{cp} = \frac{Q_{общ}}{A_{сн}}, \quad (5)$$

где $Q_{общ}$ – общий тоннаж автопарка (т); $A_{сн}$ – среднесписочное число автомобилей, (единиц).

$$q_{гр}^{cp} = (1,53 + 1,53 + 1,53 + 1,53 + 1,53 + 6,9 + 6,9 + 0,99 + 0,99) / 9 = 2,6.$$

Для изотермических фургонов марки ГАЗель NEXT:

До внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$W_p^B = 111\,302,4 \cdot 2,6 = 289386,24.$$

После внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$W_p^B = 137\,388,9 \cdot 2,6 = 357211,14.$$

Для изотермических фургонов на базе шасси марки КАМАЗ 4308:

До внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$W_p^B = 39\,664,13 \cdot 2,6 = 103126,74.$$

После внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$W_p^B = 48\,960,4 \cdot 2,6 = 127297,04.$$

Для изотермических фургонов на базе шасси марки Ford Transit:

До внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$W_p^B = 42\,497,28 \cdot 2,6 = 110492,93.$$

После внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$W_p^B = 52\,457,58 \cdot 2,6 = 136389,7.$$

Повышение производительного пробега способствовало увеличению транспортной работы.

Определим экономический эффект от внедрения 1С: ТЛЭ КОРП. Для этого необходимо рассчитать себестоимость до и после внедрения.

Затраты на перевозку до внедрения 1С: ТЛЭ КОРП – 13 351 723,24 руб.

Затраты на перевозку после внедрения 1С: ТЛЭ КОРП (с учетом стоимости программы и обучения 188000 руб.) – 13539723,24 руб.

Себестоимость составит, руб/ткм:

$$S = \frac{Z_{\text{общ}}}{W_p^B}, \quad (6)$$

где $Z_{\text{общ}}$ – общие затраты (руб); W_p^B – выполненная транспортная работа парка автотранспортных средств (ткм).

До внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$S = 13\,351\,723,24 / (289386,24 + 103\,126,74 + 110492,93) = 13351723,24 / 503005,91 = 26,5.$$

После внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$S = 13\,539\,723,24 / (357\,211,14 + 127\,297,04 + 136\,389,7) = 13\,539\,723,24 / 620\,897,88 = 21,8.$$

Доход транспортного процесса определяется по формуле, руб:

$$D = T \cdot W_p^{\text{общ}}, \quad (7)$$

где T – тариф за выполненную транспортную работу (30 руб / ткм).

До внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$D = 30 \cdot 503005,91 = 15\,090\,177,3.$$

После внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$D = 30 \cdot 620897,88 = 18\,626\,936,4.$$

Прибыль транспортного процесса, руб:

До внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$P = D - Z_{\text{общ}}, \quad (8)$$

$$P = 15\,090\,177,3 - 13\,351\,723,24 = 1\,738\,454,06.$$

После внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$P = 18\,626\,936,4 - 13\,539\,723,24 = 5087213,16.$$

Рентабельность транспортного процесса, %:

$$R = \frac{P}{Z_{\text{общ}}} \cdot 100. \quad (9)$$

До внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$R = (1738454,06 / 13\ 351\ 723,24) \cdot 100 = 13.$$

После внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$R = (5\ 087\ 213,16 / 13\ 539\ 723,24) \cdot 100 = 37,6.$$

Срок окупаемости, лет:

$$C_{\text{окуп}} = \frac{Z_{\text{общ}}}{\Pi}. \quad (10)$$

До внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$C_{\text{окуп}} = 13351723,24 / 1738454,06 = 7,7 = 8.$$

После внедрения 1С: ТЛЭ КОРП:

$$C_{\text{окуп}} = 13539\ 723,24 / 5087213,16 = 2,6 = 3.$$

На основании экономических значений, видно, что внедрение автоматизированной системы увеличивает производительность, прибыль и рентабельность транспортного процесса.

4 Обсуждение и заключение

Проанализированные автоматизированные системы и программы для оптимизации перевозочного процесса выполняют огромный функционал, который способствует усовершенствованию транспортного процесса. По итогам анализа – рекомендована автоматизированная программа 1С: ТЛЭ КОРП, которая позволяет сокращать непроизводительный пробег автотранспортных средств, что влияет на повышение производительности транспортного процесса. В нашем примере показано, что использование 1С: ТЛЭ КОРП позволит уменьшить себестоимость и повысить рентабельность с 13 до 37 %.

Список литературы

- 1 Моросанова, А. А. Цифровая трансформация на транспорте: возможности развития и риски ограничения конкуренции [Текст] / А. А. Моросанова, А. И. Мелешина, О. А. Маркова // Современная конкуренция. – 2019. – Т.13. – № 3 (75). – С. 73-90.
- 2 Лопаткин, Г. А. Формирование процесса контроллинга в логистике на основе инновационных цифровых технологий [Текст] / Г. А. Лопаткин // Учет и статистика. – 2020. – № 2 (58). – С. 102-111.
- 3 Гребенкина, И. А. Текущее состояние и тенденции развития инфокоммуникационной транспортной инфраструктуры в Российской Федерации [Текст] / И. А. Гребенкина, С. А. Гребенкина, А. Л. Благодир // Транспортное право и безопасность. – 2020. – № 1 (33). – С. 126-141.
- 4 Ананьева, Е. О. Проблемы цифровизации транспортной отрасли в России [Текст] / Е. О. Ананьева, П. В. Ивлев // Евразийский юридический журнал. – 2022. – № 10 (173). – С. 222-224.
- 5 Лабутина, Е. С. Перспективы развития стратегии внедрения «умных» технологий в системах транспорта [Текст] / Е. С. Лабутина // Устойчивое развитие науки и образования. – 2019. – № 10. – С. 17-24.
- 6 Федотов, А. В. Региональные проблемы развития транспортно-логистической системы в Российской Федерации [Текст] / А. В. Федотов, А. А. Околелых // Вопросы региональной экономики. – 2021. – № 2 (47). – С. 141-147.

7 Пугачев, И. Н. Стратегия инновационного развития автомобильного транспорта [Текст] / И. Н. Пугачев, Ю. И. Куликов, Г. Я. Маркелов // Автомобильный транспорт Дальнего Востока. – 2018. – № 1. – С. 238-241.

8 Покровская, О. Д. Автоматизация проектирования логистических цепей и их элементов в свете цифровизации транспортной отрасли России [Текст] / О. Д. Покровская, Е. С. Куликов // Вестник транспорта. – 2020. – № 1. – С. 16-20.

9 Евстигнеев, И.А. Инфокоммуникационные сервисы на автомобильных дорогах [Текст] / И. А. Евстигнеев, В. В. Шмытинский // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – № 5-6 (96-97). – С. 38-42.

10 Пустохин, Д. Телематические решения как инструмент совершенствования организации грузоперевозок [Текст] / Д. Пустохин, А. Александрова, К. Любко // Логистика. – 2020. – № 5 (162). – С. 26-30.

11 Макеев, В. А. Порядок определения экономической эффективности развития транспорта в условиях применения цифровых технологий [Текст] / В. А. Макеев, Н. А. Ковалева, Т. С. Лисицкая // Финансовая экономика. – 2019. – № 12.

12 Мачерет, Д. А. Транспорт и модернизация: теоретические аспекты взаимного влияния [Текст] / Д. А. Мачерет // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – №3 (94). – С. 3-8.

13 Жуковская, И. Ф. Совершенствование систем перемещения грузов: необходимость дальнейшей цифровизации / И. Ф. Жуковская, М. А. Тобиен [Текст] // Проблемы теории и практики управления. – 2022. – № 3. – С. 52-71.

14 Кильдишев, А. А. Определение эффективности общественного транспорта путем опроса населения / А.А. Кильдишев, Д.С. Рябчиков, В.В. Терентьев, К.П. Андреев // В сборнике: Приоритетные направления инновационного развития транспортных систем и инженерных сооружений в АПК. Материалы международной студенческой научно-практической конференции (Рязань, 17 февраля 2021 г.). – Рязань: РГАТУ, 2021. С. 217-220.

15 Шемякин, А. В. Комплексная цифровизация на предприятиях автомобильного транспорта: перспективы внедрения [Текст] / А. В. Шемякин, А. Б. Мартынушкин, О. В. Лозовая, Н. Н. Пашканг, В. В. Терентьев // Грузовик. – 2023. – № 6. – С. 30-34.

References

1 Morosanova, A. A. Digital transformation in transport: development opportunities and risks of limiting competition / A. A. Morosanova, A. I. Meleshina, O. A. Markova // Modern competition. – 2019. T.13. – № 3 (75). – Pp. 73-90.

2 Lopatkin, G. A. Formation of the controlling process in logistics based on innovative digital technologies / G. A. Lopatkin // Accounting and statistics. – 2020. – № 2 (58). – Pp. 102-111.

3 Grebenkina, I. A. The current state and trends in the development of infocommunication transport infrastructure in the Russian Federation / I. A. Grebenkina, S. A. Grebenkina, A. L. Blagodir // Transport law and security. – 2020. – № 1 (33). – Pp. 126-141.

4 Ananyeva, E. O. Problems of digitalization of the transport industry in Russia / E. O. Ananyeva, P. V. Ivlev / Eurasian Legal Journal. – 2022. – № 10 (173). – Pp. 222-224.

5 Labutina, E. S. Prospects for the development of the strategy for the introduction of "smart" technologies in transport systems / E. S. Labutina // Sustainable development of science and education. – 2019. – No. 10. – Pp. 17-24.

6 Fedotov, A.V. Regional problems of development of the transport and logistics system in the Russian Federation / A.V. Fedotov, A. A. Okolelykh // Issues of regional economy. – 2021. – № 2 (47). – Pp. 141-147.

7 Pugachev, I. N. Strategy of innovative development of automobile transport / I. N. Pugachev, Yu. I. Kulikov, G. Ya. Markelov // Automobile transport of the Far East. – 2018. – No. 1. – pp. 238-241.

8 Pokrovskaya, O. D. Automation of design of logistics chains and their elements in the light of digitalization of the transport industry of Russia / O. D. Pokrovskaya, E. S. Kulikov // *Bulletin of Transport*. – 2020. – No. 1. – PP. 16-20.

9 Evstigneev, I.A. Infocommunication services on highways / I. A. Evstigneev, V. V. Shmytinsky // *Transport of the Russian Federation*. – 2021. – № 5-6 (96-97). – Pp. 38-42.

10 Pustokhin D. Telematics solutions as a tool for improving the organization of cargo transportation / D. Pustokhin, A. Alexandrova, K. Lyubko // *Logistics*. – 2020. – № 5 (162). – Pp. 26-30.

11 Makeev, V. A. The procedure for determining the economic efficiency of transport development in the context of the use of digital technologies / V. A. Makeev, N. A. Kovaleva, T. S. Lisitskaya // *Financial Economics*. – 2019. – No. 12. – PP. 66-68.

12 Macheret, D. A. Transport and modernization: theoretical aspects of mutual influence / D. A. Macheret // *Transport of the Russian Federation*. – 2021. – №3 (94). – Pp. 3-8.

13 Zhukovskaya I. F. Improvement of cargo transportation systems: the need for further digitalization / I. F. Zhukovskaya, M. A. Tobien // *Problems of theory and practice of management*. – 2022. – No. 3. – pp. 52-71.

14 Kildishev A. A., Ryabchikov D. S., Terentyev V. V., Andreev K. P. Determining the effectiveness of public transport by interviewing the population // In the collection: *Priority directions of innovative development of transport systems and engineering structures in the agro-industrial complex. Materials of the International Student Scientific and practical conference (Ryazan, February 17, 2021)*. - Ryazan: RGATU, 2021. pp. 217-220.

15 Shemyakin, A.V. Complex digitalization at automobile transport enterprises: prospects for implementation / A.V. Shemyakin, A. B. Martynushkin, O. V. Lozovaya, N. N. Pashkang, V. V. Terentyev // *Truck*. – 2023. – No. 6. – pp. 30-34.

© Шемякин А.В., Успенский И.А., Рябчиков Д.С., Мальчиков В.Н., Кузнецов Ю.А., 2023

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-78-86



УДК 656.029.4

UDC 656.029.4

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОПОРНОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СЕВЕРНОГО ЗАВОЗА В РЕСПУБЛИКЕ САХА (ЯКУТИЯ)

PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE BACKUP NETWORK OF TRANSPORT AND LOGISTICS INFRASTRUCTURE OF THE NORTHERN DELIVERY IN THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

✉¹ **Иовлева Елизавета Лонгиновна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машиноведение», Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, e-mail: Elizaveta-iovleva@yandex.ru

✉¹ **Iovleva Elizaveta Longinovna**, candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of Mechanical engineering, North-Eastern federal university named after M.K. Ammosova, Yakutsk, e-mail: Elizaveta-iovleva@yandex.ru

Тимофеев Ньургустан Сергеевич, студент, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, e-mail: kmvadf@mail.ru

Timofeev Nurgustan Sergeevich, student, North-Eastern federal university named after M.K. Ammosova, Yakutsk, e-mail: kmvadf@mail.ru

Аннотация. Транспортно-логистическая инфраструктура северного завоза Республики Саха (Якутия) является одной из ключевых составляющих в развитии данного региона. Северный завоз – это система организации транспортировки грузов в условиях тайги, малонаселенности и неполной дорожной сети. В данной статье анализируются существующие проблемы северного завоза в Республике Саха (Якутия), а также предложены рекомендации по оптимизации транспортно-логистической инфраструктуры.

Annotation. The transport and logistics infrastructure of the northern delivery of the Republic of Sakha (Yakutia) is one of the key components in the development of this region. Northern delivery is a system for organizing the transportation of goods in the taiga, sparsely populated areas and incomplete road network. This article will analyze the existing problems of northern delivery in Yakutia, and also propose recommendations for optimizing the transport and logistics infrastructure.

Ключевые слова: СЕВЕРНЫЙ ЗАВОЗ, ЛОГИСТИКА, ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА, АЛГОРИТМ ФОРДА-ФАЛКЕРСОНА.

Keywords: NORTHERN DELIVERY, LOGISTICS, TRANSPORT AND LOGISTICS INFRASTRUCTURE, FORD-FULKERSON ALGORITHM.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Республика Саха (Якутия) является одним из крупнейших субъектов Российской Федерации, расположенным на территории Дальнего Востока. Из-за своего географического положения и климатических условий социально-экономическое развитие региона зависит от логистики,

и транспортной инфраструктуры северного завоза. Северный завоз в Республике Саха (Якутия) является важной составляющей для обеспечения жизнедеятельности региона. Его основной задачей является организация и обеспечение поставок товаров на северных территориях республики, которые всегда были отдалены от центральной части страны.

Северный завоз играет незаменимую роль в обеспечении населения северных населенных пунктов Республики Саха (Якутия) товарами первой необходимости, а также обеспечении эффективного снабжения предприятий и организаций [1].

Целью данной статьи является анализ опорной сети транспортно-логистической инфраструктуры северного завоза в Республике Саха (Якутии).

Основными задачами статьи является определение проблем транспортно-логистической системы региона и пути решения этих проблем.

В августе 2023 года был принят федеральный закон N 411-ФЗ «О северном завозе», в котором отдельной статьей идет развитие опорной сети транспортно-логистической инфраструктуры северного завоза.

На сегодняшний день развитие экономики и повышение уровня жизни населения невозможно без эффективно работающей транспортно-логистической системы. Функционирование этой системы невозможно без развития транспортно-логистической инфраструктуры.

В Республике Саха (Якутия) существует ряд проблем, которые затрудняют развитие опорной сети транспортно-логистической инфраструктуры северного завоза. Эти проблемы, осложняют организацию и безопасность перевозок товаров первой необходимости.

Одной из основных проблем является недостаточно развитая дорожная инфраструктура. Около 70 % дорог в регионе имеют грунтовое покрытие, что приводит к значительным сложностям при поставке грузов в отдаленные районы республики. Кроме того, положение Якутии в зоне резко-континентального климата обуславливает частые периоды заморозков и таяния дорог, что также создает трудности в организации транспортировки.

Следующей важной проблемой является недостаток транспорта. В условиях малонаселенных районов, частых заморозков и сложностей в обеспечении дорог, транспортных средств не хватает для обеспечения эффективной перевозки грузов. В результате, возникают задержки и простои.

Другой проблемой северного завоза в Якутии является недостаточное развитие транспортной инфраструктуры в отдаленных районах. В районах Крайнего Севера отсутствуют дороги с твердым покрытием, что делает ее доступность крайне ограниченной. В результате, северо-западные районы республики часто остаются вне зоны регулярных поставок товаров.

Еще одной проблемой является недостаточная координация деятельности всех участников транспортного процесса. Отсутствие взаимодействия между перевозчиками, грузоотправителями, грузополучателями, таможенными органами и другими структурами, что ведет к неэффективному использованию транспортно-логистической инфраструктуры. Это приводит к дополнительным затратам времени и ресурсов, а также повышает риски потерь и повреждения грузов.

Для решения ряда вышеописанных проблем в регионе создаются торгово-логистические центры (ТЛЦ). Решение создания ТЛЦ было принята стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года [2].

2 Материалы и методы

Торгово-логистические центры (ТЛЦ) – это специально созданные опорные точки, которые объединяют различные функциональные зоны для обеспечения оптимального течения товаров и услуг на территории республики [3-4]. В центре их работы стоит распределение, хранение и доставка грузов до конечных потребителей. Эти центры располагаются на перекрестках важных транспортных магистралей Крайнего Севера, что обеспечивает удобство и эффективность доставки товаров в различные районы севера республики. По решению главы республики до конца 2025 года должно быть организовано 13 ТЛЦ во всех арктических районах. В таблице 1 показаны ТЛЦ центры с указанием даты открытия и основных характеристик.

Таблица 1 – Торгово-логистические центры Республики Саха (Якутия)

№	Район	Характеристики ТЛЦ	Год открытия
1	Абыйский, пгт. Белая Гора	Объект представляет собой комплекс с тёплым складом на 80 тонн, картофелехранилище на 190 тонн, холодильные камеры на 30 тонн	2021
2	Аллаиховский, пгт. Чокурдаах	ТЛЦ с торговым залом, овощехранилищем, холодильной камерой, теплым и холодным складом.	2025
3	Анабарский, с. Саскылах	Общая площадь здания 578 кв. м. В нем разместились торговый зал, овощехранилище, холодильные камеры, теплый и холодный склад.	2019
4	Булунский, пгт. Тикси	Общая площадь здания склада составляет около 946 кв. м, общая площадь здания для магазина — 274 кв. м, торговая площадь составляет 138 квадратных метров.	2023
5	Верхнеколымский, пгт. Зырянка	Объект представляет собой комплекс с овощехранилищем до 180 тонн, холодильными камерами с объемом хранения до 30 тонн, теплым складом с объемом загрузки 170 тонн и просторным торговым залом с общей площадью 100 кв. м.	2024
6	Верхоянский, г. Батагай	ТЛЦ с торговым залом, овощехранилищем, холодильной камерой, теплым и холодным складом.	2024
7	Жиганский, с. Жиганск	Общая площадь здания - 578,49 кв. м. объект включает себя торговый зал, овощехранилище, холодильные камеры, теплый и холодный склады	2023
8	Момский, с. Хонуу	Общая площадь ТЛЦ составит 550 кв. м. Он будет оснащен торговым залом по типу самообслуживания, овощехранилищем на 150 тонн, теплыми и холодными складами, холодильными камерами для хранения скоропортящейся продукции.	2023
9	Нижнеколымский, п. Черский	Площадь ТЛЦ 550 кв. м. Оснащен торговым залом по типу самообслуживания, овощехранилищем на 150 тонн, теплыми и холодными складами, холодильными камерами для хранения скоропортящейся продукции.	2022
10	Оленекский, с. Оленек	ТЛЦ с торговым залом, овощехранилищем, холодильной камерой, теплым и холодным складом.	2024
11	Среднеколымский, г. Среднеколымск	Общая площадь здания составляет 578 кв. м. В центре разместятся торговый зал, овощехранилище, холодильные камеры, теплый и холодный склад	2022
12	Усть-Янский, пгт. Усть-Куйга	Объект площадью более 970 кв. м. оснащен теплым складом на 150 тонн, картофелехранилищем на 190 тонн, холодильными камерами на 40 тонн	2021
13	Эвено-Бытантайский, с. Батагай-Алыта	ТЛЦ с торговым залом, овощехранилищем, холодильной камерой, теплым и холодным складом.	2025

ких как дороги, мосты или реки, в зависимости от особенностей климата и местности [5-7]. Например, при оценке максимальной пропускной способности дороги в зимний период можно учесть снегопады и холодные температуры, которые могут ограничить дорожное движение.

Оценка максимальной пропускной способности элементов транспортной сети позволяет детально планировать доставку грузов и оптимизировать маршруты [8-10].

Рассмотрим схематическое отображение графа мультимодальной транспортно-технологической системы Республики Саха (Якутия) для летнего периода и проведем оценку максимальной пропускной способности. На рисунке 3 представлена схема графа мультимодальной транспортно-технологической системы в летний период по маршруту «ТЛЦ Нижний-Бестях– ТЛЦ Тикси».

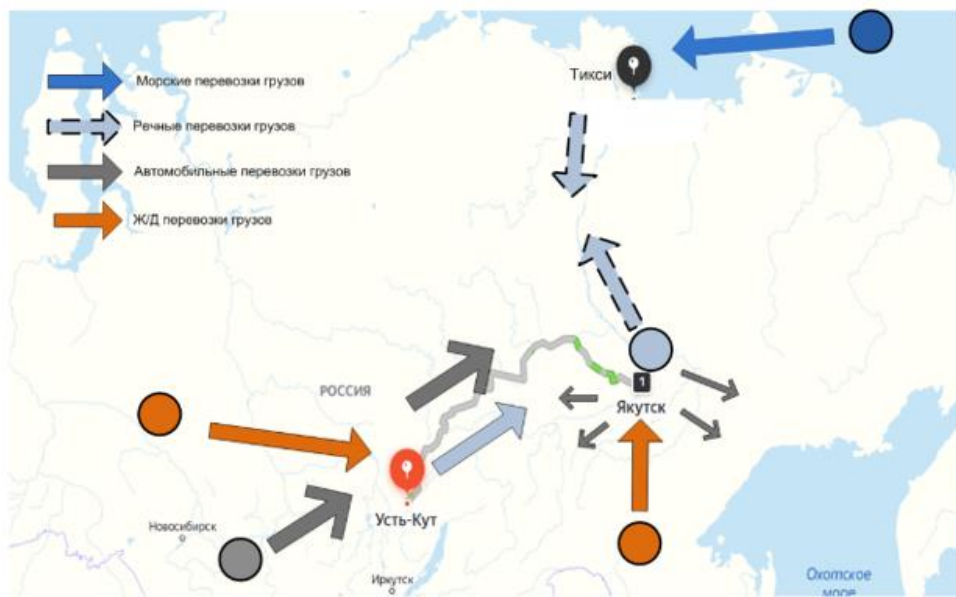


Рисунок 3 – Мультимодальные перевозки грузов из г. Якутска до п. Тикси



Рисунок 4 – Оценка максимальной пропускной способности элементов транспортной сети по маршруту Якутск-Тикси

В летний период доставки грузов северного завоза по маршруту Якутск-Тикси необходимо учитывать морские перевозки, речные перевозки, автомобильные перевозки из внешних источников, Ж/Д перевозки из внешних источников, автомобильные перевозки (рисунок 4).

Чтобы провести оценку максимальной пропускной способности по алгоритму Форда-Фалкерсона, необходимо знать интенсивность движения с точек: S, 1, 2 и 4 [10-12].

Интенсивность движения измеряли на пересечении перекрестков Маганский тракт – улица Можайского г. Якутска, в направлении выезда из города в сторону поселка Сангар. Измерения проводили в утренний час пик (8:00-9:00 ч.), дневной час пик (13:00-14:00) и вечерний час пик (17:00-18:00). Транспортные средства распределили по категориям: легковые автомобили и фургоны, грузовые автомобили, автобусы.

3 Результаты исследований

На рисунке 5 показана схема перекрестка Маганский тр. – ул. Можайского г. Якутск на котором проводилось обследование.

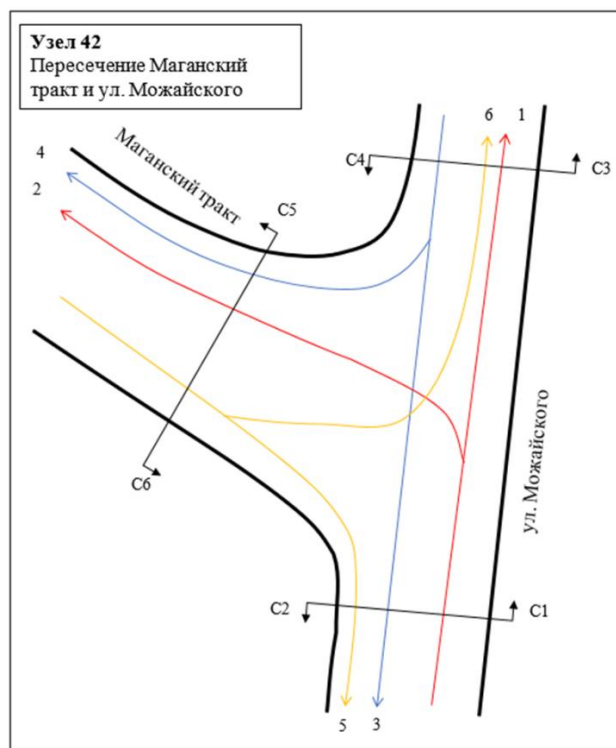


Рисунок 5 – Схема перекрестка Маганский тр – ул. Можайского г. Якутск

Результаты определения интенсивности движения транспортных средств (ТС) на пересечении перекрестков Маганский тракт – улица Можайского г. Якутска приведены в таблице 2,3,4. Объектом исследований явились легковые автомобили и фургоны, грузовые автомобили (2 оси, 3 оси, 4 оси), автобусы (СВ – средней вместительности, БВ – ОБВ – большой вместительности и очень большой вместительности соответственно). Грузовые ТС с прицепом, автопоезда и автобусы малой вместительности в исследовании не участвовали.

Так как в смешанном потоке автомобилей транспортные средства разного типа занимают различную площадь дороги и имеют разные динамические характеристики, то для сопоставимости оценок, ввели понятие приведенной интенсивности движения - количество транспортных средств определенного типа приводят к легковому автомобилю с помощью коэффициентов приведения [3].

Таблица – 2 Интенсивность движения ТС в утренний час пик (8:00-9:00 ч.)

Результаты Обследования	Узел 42						Приведенная интенсивность	Часовая интенсивность ТС/час	
	Участок УДС (№ направления)	Легковые автомобили и фургоны	Грузовые автомобили			Автобусы			
			2 оси	3 оси	4 оси	СВ			БВ- ОБВ
Коэффициенты приведения	1	1,5	1,8	2	1,5	3			
1	128	8	5	2	9		152	608	
2	173				3		176	704	
3	96	9	2		3		110	440	
4	18				1		19	76	
5	84	3			6		93	372	
6	6						6	24	

Таблица – 3 Интенсивность движения ТС в дневной час пик (13:00-14:00 ч.)

Результаты Обследования	Узел 42						Приведенная интенсивность	Часовая интенсивность ТС/час	
	Участок УДС (№ направления)	Легковые автомобили и фургоны	Грузовые автомобили			Автобусы			
			2 оси	3 оси	4 оси	СВ			БВ- ОБВ
Коэффициенты приведения	1	1,5	1,8	2	1,5	3			
1	102	8		2	2		114	456	
2	72	6	2				80	320	
3	123	6	4		4	1	138	552	
4	12						12	48	
5	90	3			3		96	384	
6	5	2	2				9	36	

Таблица – 4 Интенсивность движения ТС в вечерний час пик (17:00-18:00)

Результаты Обследования	Узел 42						Приведенная интенсивность	Часовая интенсивность ТС/час	
	Участок УДС (№ направления)	Легковые автомобили и фургоны	Грузовые автомобили			Автобусы			
			2 оси	3 оси	4 оси	СВ			БВ- ОБВ
Коэффициенты приведения	1	1,5	1,8	2	1,5	3			
1	125	11			3		139	556	
2	76	6			8	1	91	364	
3	88	3					91	364	
4	2	1					3	12	
5	63	3	1	4		4	75	300	
6	6						6	24	

Исследования интенсивности движения на перекрестке Маганский тр – ул. Можайского показали, что в часы пик (утро, день вечер) ТС из города больше выезжают (направления 1 и 2), чем заезжают (направления 3 и 4). Интенсивность движения по направлениям 1 и 2 в сумме составляет: утром – 1312, днем – 776, вечером – 920. По направлениям 3 и 4: утром – 516, днем – 600, вечером – 376.

4 Обсуждение и заключение

На сегодняшний день проводятся исследования в области оптимизации транспортно-логистической инфраструктуры северного завоза в Республике Саха (Якутия). Ряд исследований по оптимизации перевозочного процесса выявили, что необходимо учитывать такие факторы, как климатические условия, дорожные особенности и прочие факторы, влияющие на время и стоимость доставки.

Модернизация и развитие инфраструктуры северного завоза в Якутии тесно связаны с созданием специализированных логистических центров на территории региона, это позволит консолидировать потоки грузов, снизить транспортные издержки и повысить эффективность операций.

Макромодель транспортной сети с учетом временных транспортных путей должна учитывать мультимодальность перевозок. Первым шагом для разработки такой модели является определение интенсивности движения.

Таким образом, опорная сеть транспортно-логистической инфраструктуры северного завоза в Якутии в настоящее время сталкивается с рядом проблем, таких как сложность транспортного доступа, недостаточная координация деятельности и отсутствие достаточного финансирования. Однако применение математических моделей, проведение исследований и предложения по модернизации инфраструктуры позволяют надеяться на улучшение ситуации и перспективы развития данного сектора экономики региона.

Список литературы

- 1 Федеральный закон «О северном завозе» от 04.08.2023 N 411-ФЗ
- 2 Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. N 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года»
- 3 Власов, В. М. Применение цифровой инфраструктуры и телематических систем на городском пассажирском транспорте / В.М. Власов, Д.Б. Ефименко, В.Н. Богумил. – 2018.
- 4 Филиппова, Н. А. Методология организации и функционирования систем доставки грузов в северные регионы. – 2015.
- 5 Варнавский, В. Г. Глобальная транспортно-логистическая инфраструктура //Мировая экономика и международные отношения. – 2020. – Т. 64. – №. 1. – С. 5-14.
- 6 Болодурина М. П., Мишурова А. И. Концептуальные основы формирования и развития транспортно-логистической инфраструктуры //Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2019. – Т. 15. – №. 2 (371). – С. 240-257.
- 7 Кизим, А. А. Особенности и тенденции организации инвестиционных процессов в сфере развития транспортно-логистической инфраструктуры промышленности / А.А. Кизим, Л.Я. Мищенко, И.В. Шевченко // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2014. – №. 31. – С. 2-16.
- 8 Филиппова Н. А., Власов В. М. Иерархические уровни управления мультимодальной транспортной системой для перевозки грузов северного завоза //Вестник московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2019. – №. 4. – С. 99-102.

9 Леонов С. Н., Заостровских Е. А. ТРАНСПОРТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ДЛЯ СЕВЕРНОГО ЗАВОЗА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ). СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ //ТЕЗИСЫ КОНФЕРЕНЦИИ. – С. 35.

10 Пиль Э. А. Анализ Северного завоза и варианты его реализации //Цифровая наука. – 2021. – №. 3. – С. 42-58.

11 Зубакина, М. А. Северный завоз в Республике Саха (Якутия) //Образование и наука в современных реалиях. – 2018. – С. 248-249.

12 Наговицина, Л. П. Северный завоз товаров: состояние, повышение ответственности сибирских регионов Л.П. Наговицина, М.И. Дроздова, Е.И. Леоненко // Вестник Томского государственного университета. Экономика. – 2017. – №. 38. – С. 64-72.

References

1 Federal Law "On Northern importation" of 04.08.2023 N 411-FZ

2 Decree of the President of the Russian Federation No. 645 of October 26, 2020 "On the Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035"

3 Vlasov, V. M. Application of digital infrastructure and telematics systems in urban passenger transport / V.M. Vlasov, D.B. Efimenko, V.N. Bogumil. – 2018.

4 Filippova, N. A. Methodology of organization and functioning of cargo delivery systems in the northern regions. – 2015.

5 Varnavsky, V. G. Global transport and logistics infrastructure //World economy and international relations. - 2020. – Vol. 64. – No. 1. – pp. 5-14.

6 Bolodurina M. P., Mishurova A. I. Conceptual foundations of the formation and development of transport and logistics infrastructure //National interests: priorities and security. – 2019. – Т. 15. – №. 2 (371). – Pp. 240-257.

7 Kizim, A. A. Features and trends of the organization of investment processes in the field of development of transport and logistics infrastructure of industry / A.A. Kizim, L.Ya. Mishchenko, I.V. Shevchenko // National interests: priorities and security. – 2014. – No. 31. – pp. 2-16.

8 Filippova N. A., Vlasov V. M. Hierarchical levels of management of a multimodal transport system for the transportation of goods of northern import //Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI). – 2019. – No. 4. – pp. 99-102.

9 Leonov S. N., Zaostrovskikh E. A. TRANSPORT INFRASTRUCTURE FOR THE NORTHERN IMPORT OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA). THE STATE AND PROBLEMS OF DEVELOPMENT //ABSTRACTS OF THE CONFERENCE. – P. 35.

10 Pil E. A. Analysis of the Northern import and options for its implementation //Digital Science. – 2021. – No. 3. – pp. 42-58.

11 Zubakina, M. A. Northern delivery in the Republic of Sakha (Yakutia) //Education and science in modern realities. - 2018. – pp. 248-249.

12 Nagovitsina, L. P. Northern delivery of goods: the state, increasing the responsibility of the Siberian regions L.P. Nagovitsina, M.I. Drozdova, E.I. Leonenko // Bulletin of the Tomsk State University. Economy. – 2017. – No. 38. – pp. 64-72.

© Иовлева Е.Л., Тимофеев Н.С., 2023

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-87-96](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-87-96)



УДК 625.7

UDC 625.7

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

СОЗДАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАК ЭФФЕКТИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

CREATION OF CONDITION MANAGEMENT SYSTEMS FOR ROAD STRUCTURES AS AN EFFECTIVE TOOL FOR INCREASING TRAFFIC SAFETY ON ROADS

✉¹ **Гнездилова Светлана Александровна**, к.т.н., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, e-mail: gnezdilka@yandex.ru

✉¹ **Gnezdilova Svetlana Alexandrovna**, candidate of technical sciences, Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: gnezdilka@yandex.ru

Гричаников Владимир Александрович, к.т.н., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород.

Grichanikov Vladimir Alexandrovich, candidate of technical sciences, Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod.

Погромский Алексей Сергеевич, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород.

Pogromsky Alexey Sergeevich, Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod.

Лукаш Евгений Алексеевич, к.т.н., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород.

Lukash Evgeny Alekseevich, candidate of technical sciences, Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod.

Акимов Андрей Евгеньевич, к.т.н., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород.

Akimov Andrey Evgenievich, candidate of technical sciences, Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod.

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты управления состоянием дорожных одежд, как ключевого фактора, влияющего на безопасность движения по автомобильным дорогам, отмечена важность исследования работоспособности и прогнозирования сроков службы дорожных конструкций. В статье показана необходимость проведения исследований по количественной оценке интенсивности изме-

Annotation. The article discusses the main aspects of managing the condition of road pavements, as a key factor influencing the safety of traffic on roads, and notes the importance of studying the performance and predicting the service life of road structures. The article shows the need to conduct research to quantify the intensity of changes in transport and operational indicators and factors affecting the condition of road structures, traffic safety, and analyzes the main groups

нения транспортно-эксплуатационных показателей и факторов, влияющих на состояние дорожных конструкций, безопасность движения, проанализированы основные группы методов и систем, используемых для управления состоянием дорожных одежд. В настоящее время назрела необходимость в исследованиях, направленных на оценку определение работоспособности дорожных конструкций с целью эффективной оценки проектных решений, качества строительства и текущих мероприятий, по повышению безопасности движения в рамках содержания и ремонта автомобильных дорог.

Ключевые слова: УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ, МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ, ПЛАНИРОВАНИЕ.

of methods and systems used to manage the condition of road pavements. Currently, there is a need for research aimed at assessing the performance of road structures in order to effectively evaluate design decisions, construction quality and ongoing activities to improve traffic safety as part of the maintenance and repair of roads.

Keywords: CONDITION MANAGEMENT OF ROAD STRUCTURES, FORECASTING MODELS, TRANSPORT AND OPERATIONAL INDICATORS, PLANNING.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Уже давно автомобильные дороги стали неотъемлемым элементом жизни общества. Состояние и протяжённость дорожной сети в стране непосредственно влияют на деятельность человека в частности и государства в целом (на развитие науки и техники, на рост промышленности и сельского хозяйства) и закрывают базовые потребности общества в части безопасности движения по автомобильным дорогам. При этом на государство ложится задача обеспечения бесперебойного и безопасного движения транспортных средств по автомобильным дорогам Российской Федерации, планирования и развития дорожной сети, модернизации дорожно-строительной отрасли [1].

В 2019 году стартовал национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (утвержден президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 г №15), где в качестве основного целевого индикатора определено улучшение транспортной инфраструктуры и приведение автомобильных дорог как федерального, так областного и местного значения в соответствие с нормативными требованиями, что позволит повысить качество жизни населения различных агломераций.

Проект реализуется в 84 регионах страны. В рамках проекта применяются современные технологии и материалы, внедряются интеллектуальные транспортные системы, что позволило на государственном уровне закрепить увеличение межремонтных сроков [2].

По данным федеральной службы государственной статистики протяжённость автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием в Российской Федерации составляла на конец 2022 года примерно 1115 тыс. км. При этом наблюдается чёткая тенденция снижения темпов нового строительства, в пользу проведения ремонтных работ. За период в десять лет, с 2012 по 2021 год, протяжённость сети автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием выросла почти на 380 тыс. км, из которых за последние пять лет (2017-2021 гг) построено только 53669,4 км.

Основываясь на вышеизложенном, особую актуальность приобретает направление по разработке и внедрению моделей и систем управления для эффективного использования, содержания и ремонта существующего дорожного фонда, что должно благоприятно повлиять на безопасность дорожного движения, сократить расходы на ремонт и содержание дорог за счёт оптимизации и применения новых технологий, использования инновационных материалов, увеличения сроков службы автомобильных дорог.

2 Материалы и методы

Для обеспечения безопасного, комфортного и бесперебойного движения транспортных средств по автомобильным дорогам с расчётными скоростями необходимо поддерживать транспортно-эксплуатационные показатели дорожных конструкций в пределах нормативных требований. При этом состояние дороги напрямую зависит от состояния дорожной одежды и земляного полотна. Наблюдение за этими элементами для своевременного выявления дефектов и назначения мероприятий по их устранению – важная часть работы дорожников. Долгое время единственным подходом её реализации было принятие решений о том или ином виде ремонтных работ на основании данных о фактическом состоянии дороги, полученных в результате периодических осмотров [3].

Однако, стремительное увеличение количества транспортных средств, улучшение их динамических характеристик, рост нагрузок на дороги, поставило перед дорожниками задачу по поиску наиболее технически и экономически эффективных путей повышения безопасности движения за счет управления содержанием и ремонтом дорожного фонда.

Для решения данной задачи многие зарубежные страны уже на протяжении достаточно продолжительного периода используют системы управления состоянием дорожных конструкций. В России также встречаются подобные разработки, но широкого применения они не получили до сих пор [4].

Выходные данные систем управления дорожными конструкциями могут использоваться при принятии решений проектными организациями, для оценки и контроля качества в процессе строительства и на приёмочных испытаниях, но наибольшую значимость они приобретают при планировании ремонтных работ и оценке выбранных методов ремонта, а также эффективности содержания автодорог [3].

Анализ различных систем управления состоянием дорожных конструкций позволяет выделить в их структуре четыре основных компонента (рис. 1): инвентаризация сети, оценка текущего состояния конструкции, применение моделей прогнозирования состояния в процессе эксплуатации, планирование и оценка экономической эффективности принятых решений на основе результатов моделирования и прогнозирования [5].

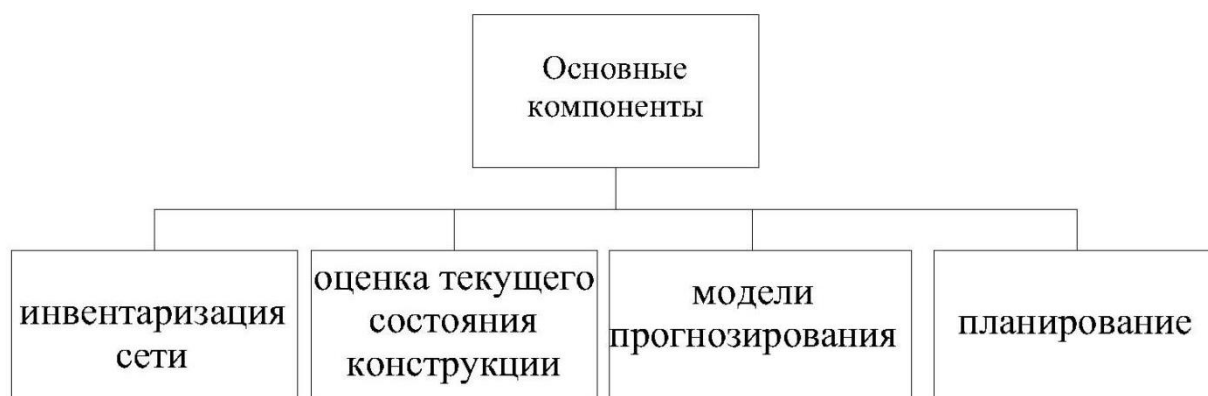


Рисунок 1 – Структура системы управления состоянием дорожных конструкций

Процесс инвентаризации сети связан с разбивкой дорог, входящих в её состав, на участки, схожие между собой. При этом могут учитываться от одного до нескольких факторов, которые будут влиять на работу дорожной одежды и земляного полотна, а также внешние факторы. Например, конструкция дорожной одежды, высота насыпи земляного полотна, интенсивность движения и нагрузка от транспортного потока, исходное состояние на момент начала наблюдений. Если сеть дорог имеет широкую географию, то к факторам необходимо добавить климатические и погодные условия.

Оценка состояния конструкций, в первую очередь, подразумевает сбор информации. Данные могут быть получены как визуальным обследованием, так и с применением лабораторно-диагностических систем и инструментальных измерений. Перечень определяемых показателей зависит от назначения системы управления и используемых в ней моделей прогнозирования и оценки. Их можно разделить на две группы: характеризующие функциональное (сцепление колеса с дорогой, ровность, наличие колеи, наличие дефектов на покрытии и др.) и структурное (деформативные характеристики) состояние.

Сложность сбора информации заключается в том, что протяжённость сети дорог как правило велика, при этом определение некоторых показателей ограничено техническими возможностями. Например, упругий прогиб, даже при наличии современного оборудования для оценки прочностных параметров дороги, измеряется по устаревшим нормативам не чаще одного раза в 5-7 лет [6].

Выход из данной ситуации может быть найден несколькими путями:

- создание баз данных на основе мониторинга контрольных участков в процессе эксплуатации с прогнозированием состояния остальной сети дорог по полученным на них данным;
- строительство специализированных полигонов и стендов для ускоренных испытаний дорожных конструкций в различных условиях;
- разработка и внедрение технических средств (зондов), использование которых позволит собирать информацию по наблюдаемым параметрам в автоматизированном режиме, без непосредственного участия человека, взамен менее производительных приборов (установки ударного нагружения, дефлектометры, георадары) [7];
- введение новых параметров, определение которых не так затруднительно, и определение зависимостей между их значениями, прочностными показателями и характеристиками состояния автомобильных дорог [6, 8, 9].

Обработанная с помощью ЭВМ информация систематизируется и связывается с текущим эксплуатационным состоянием для дальнейшего использования. По измеренным показателям на основе действующей нормативной документации происходит оценка состояния дорожных конструкций. В то же время к базам, составляемым по полученным данным, добавляется статистика по метеорологическим, природно-климатическим данным, так как они во многом влияют на процессы, проходящие в дорожных конструкциях, определяющие образование различного вида повреждений дорожных одежд [10-15].

Следующий этап создания систем управления связан с анализом полученных данных и прогнозированием состояния автомобильных дорог на их основе. Для этого широко используются модели деградации состояния дорожных конструкций. Данные модели классифицируются на статические регрессионные [16-18] и стохастические [19, 20]. Основой статических регрессионных моделей является получение уравнения, устанавливающего связь между основными типами переменных и оценке степени их влияния на исследуемый параметр. Стохастические или вероятностные модели позволяют построить искусственный вероятностный процесс на основе разных влияющих факторов, что позволяет моделировать процесс наступления того или иного вероятного состояния конструкции в будущем и сопоставления полученных с помощью моделирования данных с фактическим состоянием конструкций. В этом

типе моделей выделяют несколько направлений – эконометрические методы, Марковский анализ, методы теории надёжности [21].

Методики прогнозирования состояния дорожных конструкций могут быть направлены на предсказание как общего состояния для всех дорожных конструкций (прочность, остаточный ресурс дорожных одежд и др.), так и отдельных её элементов [22] или показателей [23, 24].

В случаях, когда данных для создания модели деградации недостаточно, может применяться метод моделирования, предложенный в работе [24].

Автором [8] предложен механико-статистический метод оценки остаточного ресурса нежестких дорожных одежд. В данной модели автор в качестве одного из основных показателей отклика дорожной конструкции на динамическое воздействие предлагает использовать плотность рассеиваемой энергии, рассчитываемую из площади динамической петли гистерезиса, под воздействием колеса расчетного автомобиля.

Заключительная часть в процессе создания систем управления состоянием дорожных конструкций – использование различных методов планирования для принятия решений о проведении тех или иных видов работ по содержанию и ремонту с учётом фактического и прогнозируемого состояния дороги и экономической эффективности, в том числе с целью повышения безопасности движения.

3 Результаты исследований

Для эффективного управления состоянием конструкций авторы работы [3] выделяют два уровня планирования: сетевой и проектный.

Первый уровень – сетевой, который может быть использован для бюджетных оценок и планирования на основе моделей прогнозирования эксплуатационного состояния.

Второй уровень – проектный, который используется для выбора эффективных мероприятий, проводимых в рамках ремонта или капитального ремонта.

В течение жизненного цикла дороги решения на сетевом уровне принимаются до момента достижения конструкцией предельного эксплуатационного состояния, после которого дальнейшая эксплуатация автодороги становится невозможна из-за достижения предельных значений тех или иных показателей (коэффициент сцепления колеса с покрытием, ровность и т.д.). Цель планирования – назначение мероприятий по текущему ремонту и содержанию, с учётом их стоимости, для поддержания дороги в допустимом эксплуатационном состоянии максимально долго. Проектный уровень связан с назначением ремонтных мероприятий, которые будут иметь мгновенный эффект по повышению эксплуатационного состояния дорожных конструкций и будут способствовать снижению аварийности на автомобильных дорогах.

Анализ и планирование на обоих уровнях должны осуществляться с использованием ранее полученной статистики по уровню затрат на различные виды работ по ремонту и содержанию и полученному от них экономическому эффекту. Выбор неправильной стратегии и алгоритма принятия решений влечёт за собой увеличение затрат на поддержание эксплуатационного состояния дорог на допустимом уровне.

Для понимания важности создания систем управления состоянием дорожных конструкций авторами было выполнено моделирование процесса изменения состояния дорожной конструкции течение 3-х летнего периода в зависимости от месячных изменений температуры воздуха. Конструкция дорожной одежды включала двухслойное покрытие из асфальтобетона, основание из щебеночно-песчаной смеси С-4, подстилающий слой из песка.

Для условий Белгородской области на основе фактических данных архива погоды за 3-х летний период был выполнен расчет температуры асфальтобетонного покрытия (рис. 2).

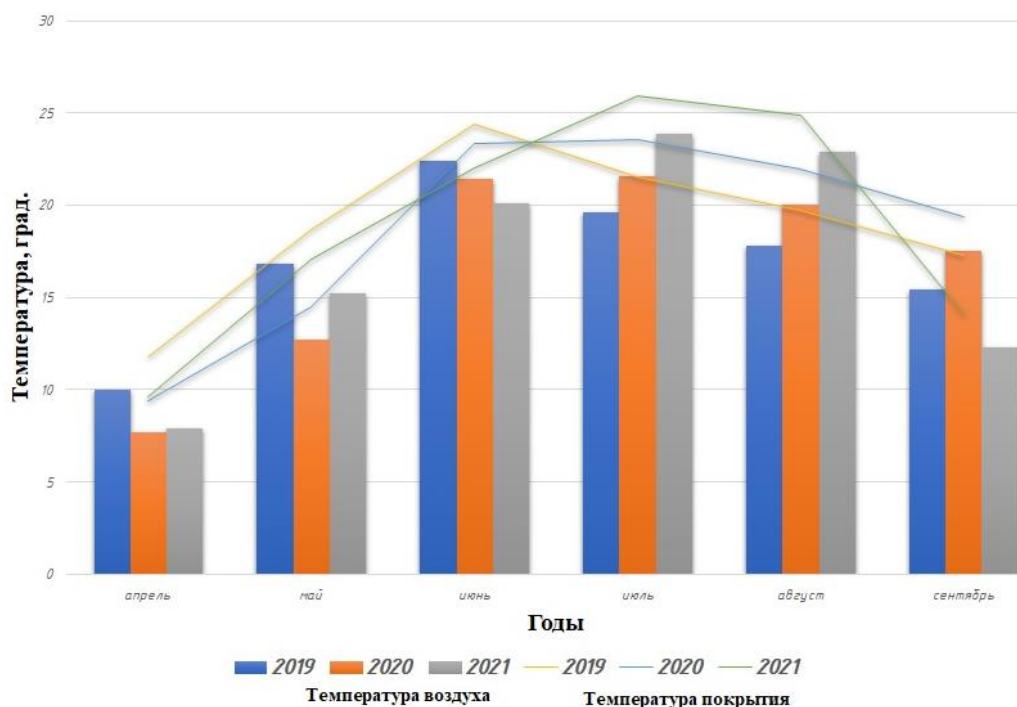


Рисунок 2 – График изменения температуры воздуха и температуры покрытия по месяцам и годам

Используя зависимость свойств асфальтобетона от температуры, были вычислены фактические модули упругости слоев из асфальтобетона и рассчитан общий модуль упругости на поверхности дорожной конструкции с использованием программного продукта CREDO «Радон» по методике ПНСТ 542-2021 [8]. Результаты расчета общего модуля упругости на поверхности дорожной конструкции по месяцам представлены на рис. 3.

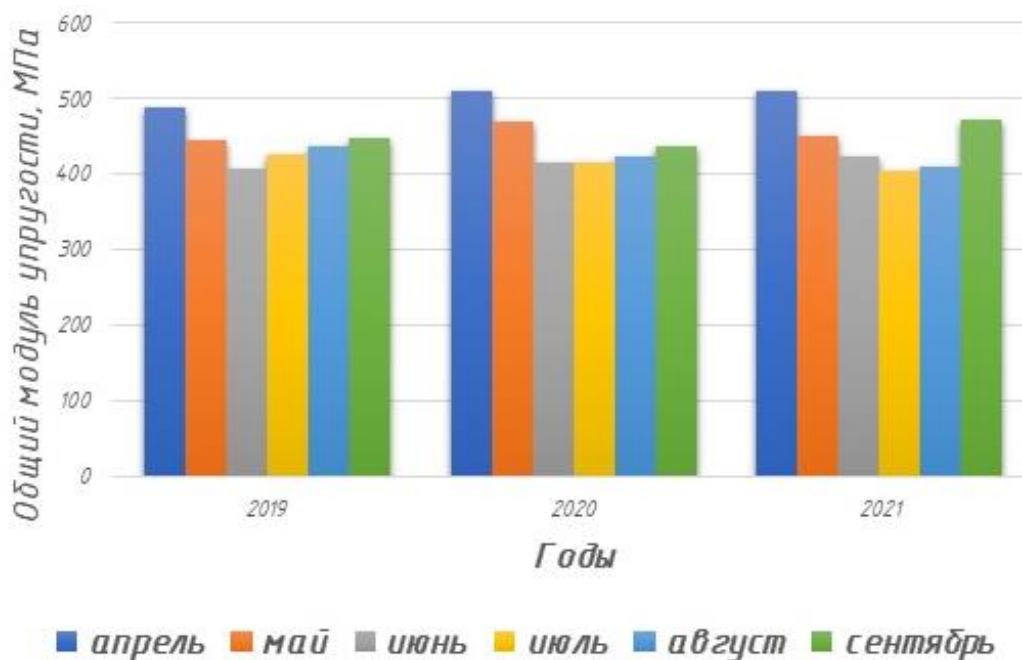


Рисунок 3 – График изменения общего модуля упругости на поверхности дорожной одежды по месяцам и годам

Данные результаты показывают, что состояние дорожной конструкции меняется в зависимости от конкретных температурных условий каждого месяца. На основе значений общего модуля упругости были рассчитаны значения коэффициента прочности дорожной конструкции по месяцам на протяжении 3 лет (рис. 4). Видно, что в отдельные месяцы происходит снижение коэффициента прочности ниже предельного значения (1,20 – для II категории дороги), что может привести к снижению работоспособности дорожной одежды.

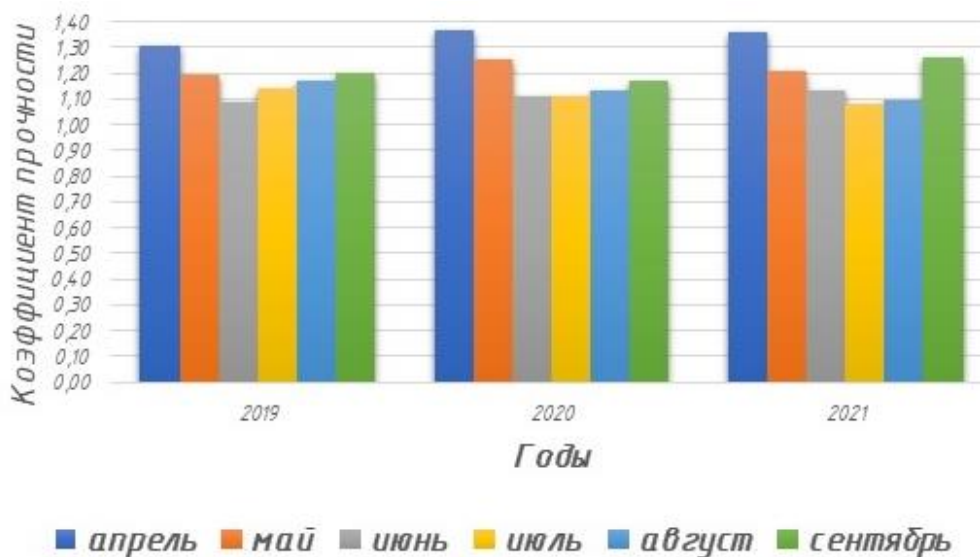


Рисунок 4 – График изменения коэффициента прочности дорожной одежды по месяцам и годам

Таким образом, имеется острая необходимость в создании систем управления состоянием дорожных конструкций, которая позволила бы на всех уровнях (проектном, строительном, эксплуатационном) прогнозировать состояние дорожных конструкций, а также оценивать возможные последствия от неблагоприятного воздействия влияющих факторов.

Во многих странах, где признана необходимость использования систем управления состоянием дорожных конструкций, практически все они (HERST-ST, RONET, SMEC, SMART, MicroPaver и др.) имеют модуль экономического анализа. В России подобный опыт имеется (СТО АВТОДОР 2.4-2013, ОДМ 218.9.003-2015), но большинство разработок носит рекомендательный характер или находится на стадии научных проектов. При этом действующая нормативная документация часто не позволяет интегрировать опыт других стран в этом вопросе.

4 Обсуждение и заключение

Исследования вопросов работоспособности и прогнозирования сроков службы дорожных конструкций показывает необходимость разработок и использования систем управления их состоянием. Это позволит в условиях ограниченного финансирования дорожного строительства сократить расходы на содержание и ремонт автомобильных работ и добиться повышения безопасности на автомобильных дорогах.

На основе рассмотрения процесса создания систем управления состоянием дорожных конструкций обоснована необходимость и важность разработки эффективных моделей для прогнозирования их состояния. Целью этого является планирование ремонтных работ, а также количественная оценка влияния возможных последствий изменения интенсивности, состава транспортного потока и других влияющих факторов на работоспособность дорожных конструкций и безопасность автомобильных дорог.

Моделирование изменения состояния дорожной конструкции на примере условий Белгородской области на протяжении 3-х летнего периода в теплое время года показало снижение работоспособности дорожного полотна ниже нормативных значений по коэффициенту прочности. Это показывает информативность используемой модели и обуславливает высокий потенциал дальнейшего необходимого развития моделирования дорожных конструкций для прогнозирования оценки величины колеи и работоспособности дорожного полотна.

Список литературы

- 1 Дорожное хозяйство России. Цифры и факты: справ.: М.: Минтранс России. Фед. дор. агентство. 2010. С. 18–26.
- 2 О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения: постановление Правительства от 30 мая 2017 г. № 658 // Собрание законодательства РФ. М., 2017. № 23. Ст. 354.
- 3 Углова Е.В., Саенко С.С. Обзор инструментов управления состоянием дорожных конструкций // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2016. №1 (3) [Электронный ресурс]. URL: <http://t-s.today/PDF/02TS116.pdf> (дата обращения: 22.06.2022).
- 4 Hudson, S.W. Minimum Requirements for Standard Pavement management Systems / S.W. Hudson, W.R. Hudson, R.F. Carmichael // In Pavement Management Implementation, eds F.B. Holt & W.L., Gramling, STP 1121, American Society for Testing and Material, Philadelphia, 1992. pp. 19-31.
- 5 Shahin, M.Y. Pavement Management For Airport, Roads, and Parking Lots. Chapman & Hall, New York, 1994. ISBN 0-412-99201-9.
- 6 Буртыль Ю. В., Капский Д. В. Моделирование взаимосвязи ровности и прочности жестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 570-583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>.
- 7 Чирва, Д.В. Инновационный подход к автоматизированному дистанционному мониторингу состояния дорожных конструкций / Д.В. Чирва, С.А. Мирончук, Е.Н. Исаев // Техника и технология транспорта. 2019. № 11. С. 42 [Электронный ресурс]. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N11-42СТС19.pdf> (дата обращения: 22.06.2022).
- 8 Тиратурян А.Н. Механико-статистический метод оценки остаточного ресурса жестких дорожных одежд // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018. №4 [Электронный ресурс]. URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS418.pdf>.
- 9 Беляев, Д.С. Применение логики нечетких множеств при оценке технического состояния автомобильных дорог / Д.С. Беляев, А.В. Кочетков, Л.В. Янковский, А.Т. Глухов // «Фундаментальные исследования». 2012. №9. С. 356–360.
- 10 Носов В.П., Гнездилова С.А. Влияние природно-климатических факторов на колеобразование // Наука и техника в дорожной отрасли. 2009. №4. С.18–24.
- 11 Fotiadi, A.A. Remote Method for Predicting Damage to Cement Concrete Pavements / A. A. Fotiadi, S. A. Gnezdilova, I. S. Strekha // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 95. P. 333–339.
- 12 Гнездилова, С.А. Прогнозирование состояния асфальтобетонных покрытий дистанционным методом [Электронный ресурс] / С.А. Гнездилова, А.А. Фотиади, Д.Ю. Горох // XII Международный молодежный форум «Образование, наука, производство». – Белгород, 2020.
- 13 Fotiadi, A.A. 2021 Mechanical-Empirical Model for Predicting the Faulting on Concrete Pavements / A.A. Fotiadi, S.A. Gnezdilova, V.V. Silkin // Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 160. pp 381–387.
- 14 Гнездилова, С.А. Разработка модели прогнозирования развития поперечных трещин для автомобильных дорог Белгородской области [Электронный ресурс] / С.А. Гнездилова, Д.Ю. Горох, А.А. Фотиади // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. - Белгород, 2021. С. 1951-1956.

- 15 Фотиади, А.А. Анализ систем управления состоянием дорожных одежд / , А.А. Фотиади, С.А. Гнездилова, Е.Д. Парцевский // Наукоемкие технологии и инновации (XXIV научные чтения) [Электронный ресурс]: сб. докладов междунар. науч.-практ. конф.: Белгород: БГТУ, 2021. С. 242-248.
- 16 Zumrawi Magdi. Survey and Evaluation of flexible Pavement Failures. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2015. № 4. P. 1602–1607.
- 17 Khaing H., Htwe T. Study on Failures and Maintenance of Flexible Pavement. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*. 2014. № 3 (14). P. 2984–2990.
- 18 Zhayang Lua, Qiang Meng. Impacts of pavement deterioration and maintenance cost on Paretoefficient contracts for highway franchising. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2018. Vol. 113. P. 1–21.
- 19 Nega, A. Distress Identification, Cost Analysis and Pavement / A. Nega, H. Nikraz, S. Herath, B. Ghadimi // *International Journal of Engineering and Technology*. 2015. Vol. 7 (4). P. 267–275.
- 20 Zambon Ivan, Vidovic Anja, Strauss Alfred, Matos Jose, Amado Joao. Comparison of Stochastic Prediction Models Based on Visual Inspections of Bridge Decks. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2017. Vol. 23. P. 553–561. URL: <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1323795>. (дата обращения: 22.06.2022).
- 21 Батракова, А.Г. Динамические и экономические модели прогнозирования состояния автомобильных дорог / А.Г. Батракова, С.М. Урдзик, Д.О. Батраков // *Вісник ХНАДУ*, 2019 вип. 85.
- 22 Селиверстова О.В., Немчикова Л.А. Расчётное моделирование процессов, происходящих в земляном полотне автодорог с обводнёнными условиями // *Труды НГАСУ*. Новосибирск: НГАСУ, 2020. Т.23, №2 (76). С. 76-84.
- 23 Углова Е.В., Саенко С.С. Обзор инструментов прогнозирования продольной ровности дорожных покрытий // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2016. Том 3. №4 [Электронный ресурс]. URL: <http://t-s.today/PDF/05angTS416.pdf>. (дата обращения: 22.06.2022).
- 24 Zimmerman K., and Broten M., 1999. «Development of Performance Models for Pavement Management System». Presented at 24th International Air Transportation Conference, ASCE.

References

- 1 The road industry of Russia. Figures and facts: reference: M.: Ministry of Transport of Russia. Fed. dor. agency. 2010. pp. 18-26.
- 2 On the standards of financial costs and Rules for calculating the size of budget allocations of the federal budget for capital repairs, repairs and maintenance of highways of federal significance: Government Decree No. 658 of May 30, 2017 // Collection of legislation of the Russian Federation. M., 2017. No. 23. St. 354.
- 3 Uglova E.V., Saenko S.S. Overview of tools for managing the condition of road structures // Online magazine "Transport facilities". 2016. No.1 (3) [Electronic resource]. URL: <http://t-s.today/PDF/02TS116.pdf> (accessed: 06/22/2022).
- 4 Hudson, S.W. Minimum Requirements for Standard Pavement management Systems / S.W. Hudson, W.R. Hudson, R.F. Carmichael // In Pavement Management Implementation, eds F.B. Holt & W.L., Gramling, STP 1121, American Society for Testing and Material, Philadelphia, 1992. pp. 19-31.
- 5 Shakhin, M.Y. Road surface management at airports, on roads and parking lots. Chapman and Hall, New York, 1994. ISBN 0-412-99201-9.
- 6 Burtyl Yu. V., Kapsky D. V. Modeling the relationship between evenness and strength of non-rigid road clothes on the basis of theoretical and practical research // *Bulletin of SibADI*. 2022. Vol. 19, No. 4 (86). pp. 570-583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583> .
- 7 Chirva, D.V. An innovative approach to automated remote monitoring of the condition of road structures / D.V. Chirva, S.A. Mironchuk, E.N. Isaev // *Technique and technology of transport*. 2019. No. 11. p. 42 [Electronic resource]. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N11-42CTC19.pdf> (date of application: 06/22/2022).

- 8 Tiraturyan A.N. A mechanical and statistical method for estimating the residual resource of non-rigid road clothes // Online magazine "Transport structures", 2018. No.4 [Electronic resource]. URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS418.pdf>.
- 9 Belyaev, D.S. Application of the logic of fuzzy sets in assessing the technical condition of highways / D.S. Belyaev, A.V. Kochetkov, L.V. Yankovsky, A.T. Glukhov // "Fundamental Research". 2012. No.9. pp. 356-360.
- 10 Nosov V.P., Gnezdilova S.A. The influence of natural and climatic factors on coal formation // Science and technology in the road industry. 2009. No.4. pp.18-24.
- 11 Fotiadi, A.A. Remote Method for Predicting Damage to Cement Concrete Pavements / A. A. Fotiadi, S. A. Gnezdilova, I. S. Strekha // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 95. P. 333-339.
- 12 Gnezdilova, S.A. Forecasting the state of asphalt concrete pavements by the station method [Electronic resource] / S.A. Gnezdilova, A.A. Fotiadi, D.Yu. Gorokh // XII International Youth Forum "Education, Science, production". Belgorod, 2020.
- 13 Fotiadi, A.A. 2021 Mechanical-Empirical Model for Predicting the Faulting on Concrete Pavements / A.A. Fotiadi, S.A. Gnezdilova, V.V. Silkin // Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 160. pp 381-387.
- 14 Gnezdilova, S.A. Development of a model for predicting the development of transverse structures-shchin for highways of the Belgorod region [Electronic resource] / S.A. Gnezdilova, D.Yu. Gorokh, A.A. Fotiadi // International Scientific and Technical Conference of young scientists of V.G. Shukhov BSTU. Belgorod, 2021. pp. 1951-1956.
- 15 Fotiadi, A.A. Analysis of control systems for the condition of road surfaces / , A.A. Fotiadi, S.A. Gnezdilova, E.D. Partsevsky // High-tech technologies and innovations (XXIV scientific readings) [Electronic resource]: collection of reports of the international scientific and practical conference: Belgo-rod: BSTU, 2021. Pp. 242-248.
- 16 Zumravi Magdi. Inspection and assessment of destruction of flexible road surfaces. International Journal of Science and Research (IJSR). 2015. No. 4. pp. 1602-1607.
- 17 Haing H., Htve T. Investigation of failures and maintenance of flexible road surfaces. International Journal of Scientific Engineering and Technological Research. 2014. No. 3 (14). pp. 2984-2990.
- 18 Zhayang Lua, Qiang Meng. The impact of pavement wear and maintenance costs on pareto-efficient highway franchising contracts. Transport Research, Part E: Overview of logistics and Transportation. 2018. Volume 113. pp. 1-21.
- 19 Nega, A. Distress Identification, Cost Analysis and Pavement / A. Nega, H. Nikraz, S. Herath, B. Ghadimi // International Journal of Engineering and Technology. 2015. Vol. 7 (4). P. 267-275.
- 20 Zambon Ivan, Vidovic Anja, Strauss Alfred, Matos Jose, Amado Joao. Comparison of Stochastic Prediction Models Based on Visual Inspections of Bridge Decks. Journal of Civil Engineering and Management. 2017. Vol. 23. pp. 553-561. URL: <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1323795> . (date of reference: 06/22/2022).
- 21 Batrakova, A.G. Dynamic and economic models of forecasting the state of highways / A.G. Batrakova, S.M. Urdzik, D.O. Batrakov // Visnik HNADU, 2019 vip. 85.
- 22 Seliverstova O.V., Nemchikova L.A. Computational modeling of processes occurring in the roadbed with watered conditions // Proceedings of NGASU. Novo-sibirsk: NGASU, 2020. vol. 23, No.2 (76). pp. 76-84.
- 23 Uglova E.V., Saenko S.S. Review of tools for predicting the longitudinal flatness of road surfaces // Online magazine "Transport facilities", 2016. Volume 3. No.4 [Electronic resource]. URL: <http://t-s.today/PDF/05angTS416.pdf>. (accessed: 06/22/2022).
- 24 Zimmerman K., and Broten M., 1999. «Development of Performance Models for Pavement Management System». Presented at 24th International Air Transportation Conference, ASCE.

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-97-106



УДК 629.1.07

UDC 629.1.07

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕКУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТОВ ТРАНСМИССИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПОСРЕДСТВОМ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПРИ ТЕСТОВЫХ ЗАЕЗДАХ ПО ДОРОЖНОМУ СПЕЦУЧАСТКУ

DETERMINATION OF THE CURRENT TECHNICAL CONDITION OF VEHICLE TRANSMISSION UNITS BY MEANS OF VIBRATION DIAGNOSTICS DURING TEST RUNS ON THE ROAD SPECIAL STAGE

✉¹ Лелиовский Константин Ярославич, к.т.н., доцент, кафедра «Строительные и дорожные машины», Нижегородский государственный технический университет им. Алексеева, г. Нижний Новгород, e-mail: kleliovskiy@mail.ru

✉¹ Leliovsky Konstantin Yaroslavich, candidate of technical sciences, associate professor, department of "construction and road machines", Nizhny Novgorod state technical university named after Alekseev, Nizhny Novgorod, e-mail: kleliovskiy@mail.ru

Молев Юрий Игоревич, д.т.н., доцент, кафедра «Строительные и дорожные машины», Нижегородский государственный технический университет им. Алексеева, г. Нижний Новгород, e-mail: moleff@yandex.ru

Molev Yuri Igorevich, doctor of technical sciences, associate professor, department of "construction and road machines", Nizhny Novgorod state technical university named after Alekseev, Nizhny Novgorod, e-mail: moleff@yandex.ru

Аннотация. В качестве диагностируемого объекта в данной статье рассматривается трансмиссия автомобиля. Значимыми диагностическими признаками для обозначенных целей являются косвенные (акустические, вибрационные, тепловые и др.). Из практики эксплуатации известно, что вибрации, возникающие при работе технически исправного узла, агрегата трансмиссии, отличаются от вибраций, возникающих при работе отказавшего узла, а также от узла, находящегося в предотказном состоянии. Очевидно, что по мере исчерпания ресурса происходит изменение спектрального состава колебаний, сообщаемыми агрегатами трансмиссию во внешнюю среду. Следовательно, по изменению спектрального состава вибраций мы имеем возможность отследить изменение технического состояния

Annotation. The transmission of a car is considered as a diagnostic object in this article. Significant diagnostic signs for the designated purposes are indirect (acoustic, vibrational, thermal, etc.). From the practice of operation, it is known that the vibrations that occur during the operation of a technically serviceable node, transmission unit, differ from the vibrations that occur during the operation of a failed node, as well as from a node that is in a pre-failure state. It is obvious that as the resource is exhausted, the spectral composition of the vibrations transmitted by the transmission units to the external environment changes. Consequently, by changing the spectral composition of vibrations, we have the opportunity to track the change in the technical condition of the mechanical unit from its serviceable condition up to its failure (node failure). Hardware, this can be done

механического агрегата от его исправного состояния вплоть до выхода его из строя, (отказа узла). Аппаратно это можно осуществить, используя встроенные в конструкцию транспортного средства, или внешние, устанавливаемые специально, датчики вибрации.

Ключевые слова: ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА, ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ, СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРАЦИЙ, ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС, РЕМОНТ.

using built-in vehicle design, or external, specially installed vibration sensors.

Keywords: VIBRATION DIAGNOSTICS, MAINTENANCE, SPECTRAL CHARACTERISTICS OF VIBRATIONS, VIBRATION MEASURING COMPLEX, REPAIR.

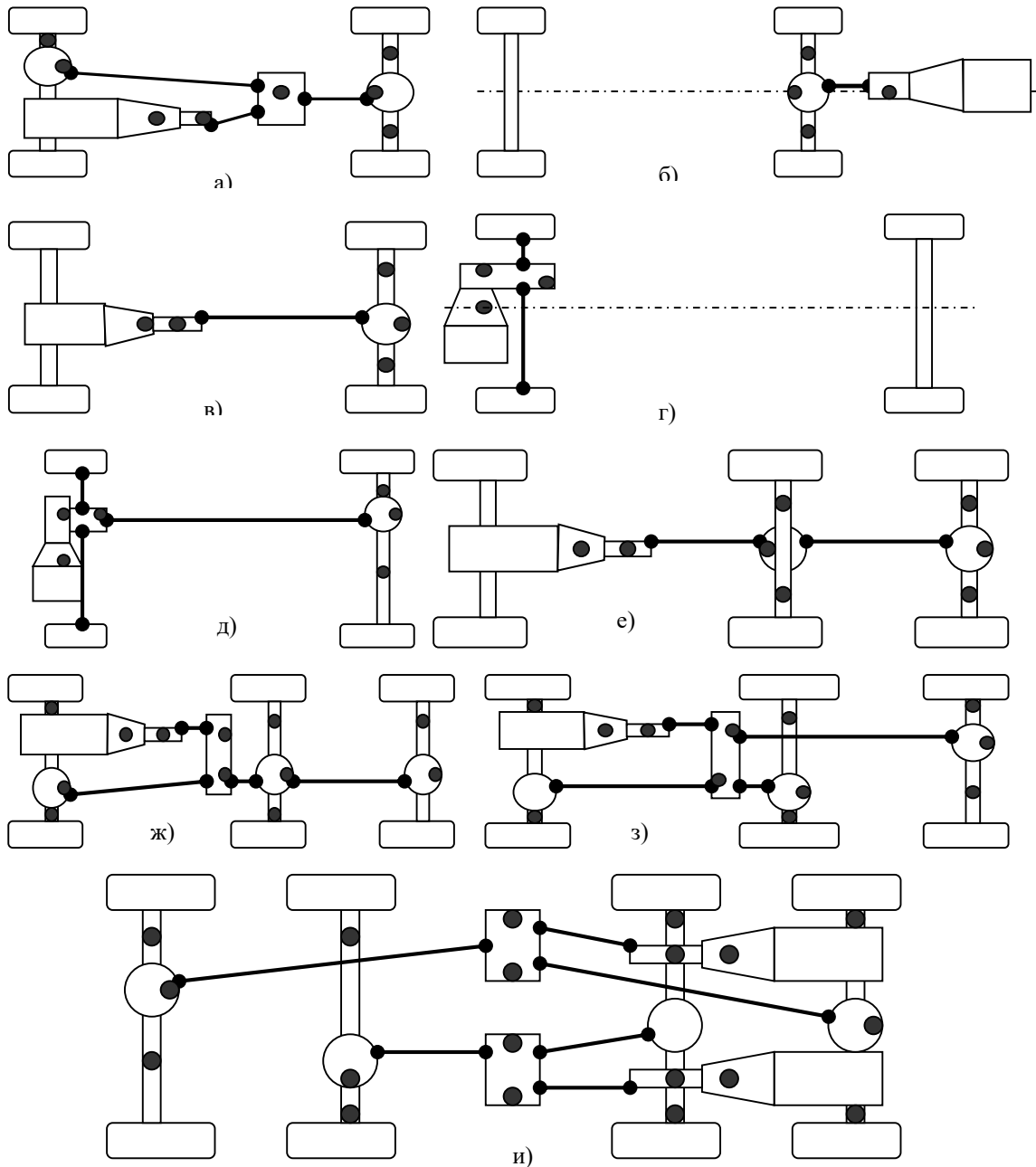
¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Трансмиссия автотранспортных средств является важным элементом их конструкции, передающим крутящий момент от двигателя к движителю. Она должна надёжно обеспечиваться при всех эксплуатационных режимах. Причём не рекомендуется выводить их силовое нагружение за штатные пределы ввиду опасности чрезмерного возрастания скорости процессов изнашивания их деталей. Следовательно, в ходе функционирования преимущественные нагрузочные режимы, преимущественно, должны быть в пределах их номинальных пределов.

Согласно многочисленным исследованиям в области машиноведения, проведенным отечественными и зарубежными учёными, известно, что каждая разборка – сборка механического сопряжённого узла, впоследствии, отнимает до 20 % его ресурса [1]. Это обусловлено тем, что деталям требуется определенное время для новой приработки, а она сопровождается ускоренным износом сопрягающихся поверхностей. Это ведет к сокращению ресурса подвижного сопряженного соединения. Очевидным решением представляется определение технического состояния элемента конструкции транспортного средства без его разборки. На основании полученных диагностических данных принимать решение о дальнейших воздействиях на узел.

Возможно также отслеживание и диагностирование наступления отказа и осуществление прогнозирования вероятного момента отказа, характера отказа. [2-6] Поэтому появляется возможность своевременно принять необходимые технические меры по его предотвращению или минимизации его последствий. Таким образом на основе результатов вибродиагностики, проводимых в отношении агрегатов трансмиссии, реализуемой при помощи установленного на автомобиль контрольно – измерительного компьютерного комплекса, технологические воздействия на агрегат назначаются лишь в случае выявления высокой вероятности наступления отказа. Датчики устанавливаются на определенных контрольных точках [7-12]. Схема их расположения показана на рис.1.



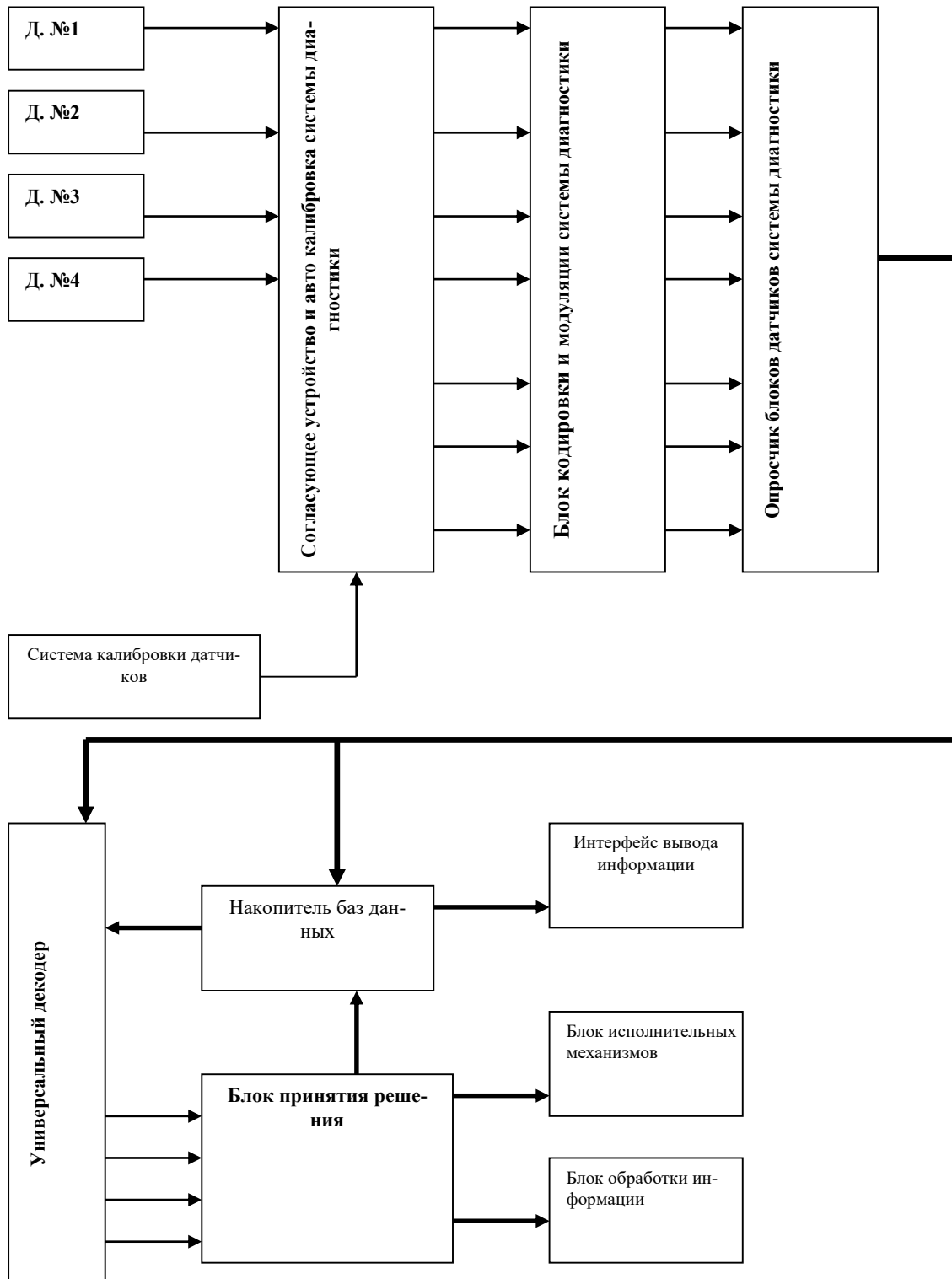
а) тип схемы: полноприводный, осевая формула: 12 – 34, колесная формула: 4x4, управляемые колеса: 1,2; б) тип схемы: заднеприводный, осевая формула: 00 – 34, колесная формула: 4x2, управляемые колеса: 1,2; в) тип схемы: классический, осевая формула: 00-34, колесная формула: 4x2, управляемые колеса: 1,2; г) тип схемы: переднеприводный, осевая формула: 12 – 00, колесная формула: 4x2, управляемые колеса: 1,2; д) тип схемы: полноприводный, осевая формула: 12 – 34, колесная формула: 4x4, управляемые колеса: 1,2; е) тип схемы: классический, осевая формула: 00 – 34 – 56, колесная формула: 6x4, управляемые колеса: 1,2; ж) тип схемы: полноприводный, осевая формула: 12 – 34 – 56, колесная формула: 6x6, управляемые колеса: 1,2; з) тип схемы: полноприводный, осевая формула: 12 – 34 – 56, колесная формула: 6x6, управляемые колеса: 1,2; и) тип схемы: полноприводный, осевая формула: 12 – 34 – 56 – 78, колесная формула: 8x8, управляемые колеса: 1,2,3,4

Рисунок 1 – Точки расположения датчиков на агрегатах трансмиссии транспортных средств

Опираясь на полученные в ходе измерения данных, мы получаем возможность определить, какие именно виды операций по ремонту действительно необходимы в данный момент вне зависимости от того, настал ли срок очередного ТО или текущего ремонта. Предлагаемая система технического обслуживания и диагностики, (по фактическому состоянию), позволит рациональнее организовать производственный процесс на предприятиях автомобильного транспорта и сервиса, грамотнее эксплуатировать автотранспортную технику, кроме того продлить срок службы агрегатов силовой передачи и всего автомобиля в целом [13-18]. В статье так же предлагается схема точек установки вибродатчиков на агрегаты трансмиссии в зависимости от колёсной формулы транспортного средства. Вибрационная эмиссия в данных местах является наиболее значимой. Исходя из этого, данные точки следует признать наиболее информативными в плане диагностики. Сами мероприятия наиболее рационально проводить в ходе заездов по специальному тестовому участку со специально подготовленной опорной поверхностью. На исследуемые автомобили следует предварительно установить виброизмерительный комплекс, регистрирующий характеристики вибраций агрегатов трансмиссии и посредством встроенного специального программного обеспечения осуществлять их спектральный анализ, а так же их визуализацию на дисплее. По внешнему виду графиков огибающей спектра зарегистрированного вибрационного сигнала техник – диагност, обладающий должной квалификацией, осуществляет постановку текущего диагноза. На его основе принимается решение о дальнейшем направлении исследуемого транспортного средства на ТО трансмиссии или даже в ремонт. Это представляется возможным ввиду того, что вид и форма спектрограммы свидетельствует об отсутствии того или иного эксплуатационного дефекта, или его наличии и степени его развития. Также на основе вида и форм спектрограмм возможно с определённой степенью достоверности осуществить прогнозирование остаточного ресурса агрегатов трансмиссии испытываемых транспортных средств.

2 Материалы и методы

В описываемом в данной статье исследовании предлагается проводить диагностирование текущего технического состояния в ходе движения изучаемого транспортного средства по некому тестовому участку дороги, подготовленному специально для проведения подобных натуральных замеров. Микропрофиль данного дорожного отрезка подобран и выполнен таким образом, чтобы в зависимости от изменения скоростного режима движения изменялись параметры вибросигнала, регистрируемого датчиками измерительного комплекса, специально предварительно установленного на испытываемый автомобиль [6]. Контрольные точки выбираются в местах наибольшей вибрационной активности, их число будет различаться в зависимости от схемы силовой передачи транспортных средств (рис. 1). Общая принципиальная схема комплекса представлена на (рис. 2). Внешний вид основных элементов контрольно – измерительного комплекса представлен на (рис. 3). Установка его на автомобиль, обеспечит реализацию вибродиагностики технического состояния агрегатов и узлов силовой передачи транспортных средств при тестовых заездах по специальному участку. Это позволит в рамках предрейсового или послерейсового экспресс – диагностирования выявить автомобили, агрегаты трансмиссии которых с высокой долей вероятности находятся в предотказном состоянии. Следовательно, применение данного комплекса, как элемента методики экспресс – диагностирования будет способствовать внедрению системы ремонта по их текущему техническому состоянию [4, 5].



Д.1 – Д.4 – пьезоэлектрические датчики вибрации

Рисунок 2 – Общая схема контрольно – измерительный комплекса и блок отображения информации



а)

б)

в)

а) анализатор сигналов со встроенным аналого-цифровым преобразователем;
б) индуктивный датчик оборотов и датчики виброускорений; в) датчики виброускорений

Рисунок 3 – Внешний вид основных элементов контрольно – измерительного комплекса

Методика проведения экспресс – диагностирования при заезде по тестовому дорожному участку следующая:

1 На тестовый дорожный участок помещается изучаемое транспортное средство, параметры технического состояния которого заранее неизвестны;

2 На исследуемый автомобиль, (его коробку передач или другие агрегаты трансмиссии) монтируются вибродатчики, подсоединенные к измерительному комплексу;

3 Двигатель автомобиля запускается, и он приводится в движение;

4 Производится нагружение агрегатов трансмиссии и других элементов и систем автомобиля от дороги в ходе осуществляемого заезда;

5 При помощи установленного на автомобиль измерительного комплекса осуществляется измерение вибраций элементов трансмиссии, свойственных для движения по данному отрезку тестового участка;

6 Изменение возмущающих воздействий от дороги производится посредством подбора скорости движения транспортного средства по отрезкам с различным микропрофилем;

7 Проводится сохранение вибрационных характеристик, зарегистрированных при движении автомобиля по тестовому диагностическому участку;

8 Сохраняются спектры вибросигнала на всех интересующих диапазонах. На их основе, проводится классификация исследуемых дефектов по вибрационным характеристикам, (определяются характерные частоты и амплитуды);

9 Формируются исходные данные для последующей обработки их посредством нейросетевых алгоритмов;

10 На вход нейронных сетей поступают спектры значений среднеквадратичных отклонений амплитуд зарегистрированного вибрационного сигнала. На выходе получают значение вероятностей наличия в изучаемых агрегатах трансмиссии исследуемого автомобиля различных дефектов и повреждений;

11 Вычисляется погрешность оценки нейронной сетью наличия дефекта или повреждения;

12 Делается вывод о текущем техническом состоянии агрегатов трансмиссии изучаемого транспортного средства и заключение о возможности его назначения на дальнейшее выполнение транспортной работы;

При реализации приведённой последовательности действий проводим отработку методики экспресс – вибродиагностики агрегатов трансмиссии (в частности, коробок передач).

В ходе проведения диагностических аппаратных измерений механические колебания проходят следующие преобразования: датчик вибраций воспринимает их и, в силу своей конструкции, преобразует механические колебания в электромагнитные, соответствующей силы и напряжения. Происходит формирование сигнала $S(t)$. Сформированный сигнал затем проходит автоматическую калибровку, отсекаются комплексные составляющие, во избежание чрезмерной погрешности проводимых измерений. Затем, посредством программного обеспечения комплекса, осуществляется качественная оценка измеряемого параметра $q(t)$ с его последующей амплитудной и частотной модуляцией в блоке модуляции. После этого формируется частотно модулированный сигнал $u(t)$, который, впоследствии, суммируется. В результате этой операции в программно – аппаратном комплексе получается обобщенный сигнал $U(t)$. Сформированные суммарные сигналы коммутируются опросчиком. Данный сигнал поступает в аналого-цифровой преобразователь. В нём происходит временное разделение сигнала с последующей демодуляцией частоты несущего и поднесущего вибросигнала. В таком представлении он сигнал поступает для дальнейшей математико-логической обработки, в ходе которой вычисляются множество прямых и косвенных показателей. На дисплей компьютера выводится графики спектра огибающей вибрационного сигнала, соответствующего текущему техническому состоянию узлов трансмиссии испытываемого транспортного средства. В зависимости от его внешнего вида принимается решение о дальнейшей эксплуатации автотранспортной техники.

3 Результаты исследований

В качестве подтверждения данной концепции экспресс - диагностики были проведены экспериментальные ходовые исследования на тестовом участке в ходе которых проводились измерения уровня вибраций агрегатов трансмиссии транспортно – технологических машин «Ункор» и «Кержак» (рис. 4) производства ООО «Завод транспортных машин» (г. Нижний Новгород) с различными значениями пробега. Использовался программно – аппаратный комплекс, блок – схема которого приведена на (рис. 2).



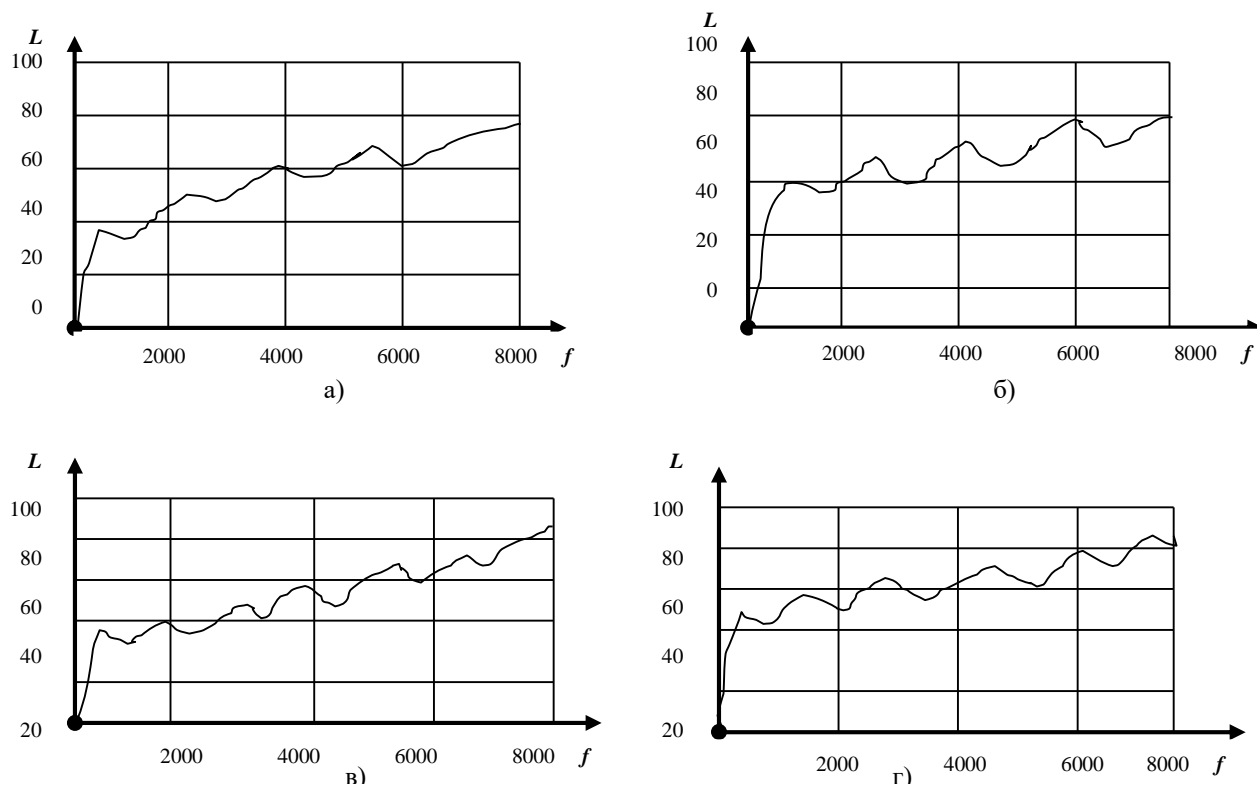
а)

б)

а) ТТС 30071 «Кержак», б) ТТС 39101 «Ункор»

Рисунок 4 – Исследуемые транспортно – технологические средства

Зарегистрированные вибрационные сигналы были программно обработаны контрольно – измерительным комплексом. В результате получены графики зависимости огибающей спектра вибраций от частот (рис.5).



а) новое ТТС «Кержак», без эксплуатационного пробега; б) ТТС «Кержак» с пробегом 3000 км.; в) ТТС «Кержак» с пробегом 9000 км.; г) ТТС «Кержак» с пробегом 30000 км

Рисунок 5 – Графики огибающих спектра вибраций, зарегистрированных на корпусах коробок передач исследуемого транспортного средства ТТС 30071 «Кержак»

4 Обсуждение и заключение

В результате сравнительного анализа графиков огибающих спектров, пример которых приведён на (рис. 5) был сделан вывод, что уровни вибраций, зарегистрированные в ходе измерений, проведённых в ходе заездов по тестовому дорожному участку, на всех полученных графиках спектров удовлетворяют требованиям нормативной документации. Это свидетельствует о малой виброн нагруженности испытуемых коробок передач, вне зависимости от срока их службы. Эксплуатация транспортно – технологических машин «Кержак» и «Ункор» и их модификаций, на которые устанавливаются данные агрегаты трансмиссии свидетельствует о том, что они отличаются малой виброактивностью, общей надёжности. На основе анализа результатов проведённых заездов можно сделать следующий вывод: методы неразрушающего контроля, к которым относятся и вибродиагностические, с приемлемой точностью отражающие текущее техническое состояние агрегатов трансмиссии. В качестве обобщённого вывода следует отметить адекватность предложенной концепции вибродиагностики агрегатов трансмиссии практике эксплуатации большинства типов транспортных средств.

Таким образом, можно сделать заключение о том, что вибродиагностика позволяет перейти от плановой системы технического обслуживания к техническому обслуживанию по текущему состоянию при которой технологическое вмешательство в агрегат производится при возникновении необходимости, а не по некому неотступно соблюдаемому плану [19-21].

Список литературы

- 1 Кузнецов, Е.С. Техническая эксплуатация автомобилей: учебник для вузов / Е.С. Кузнецов, В.П. Воронов, А.П. Болдин [и др.]. под общ. ред. Е.С. Кузнецова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М: Транспорт, 1991. – 413 с.
- 2 Айрапетов, Э. Л. Алгоритмы виброакустической диагностики деградиационных процессов в зубчатых механизмах / Э.Л. Айрапетов, Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова и др. // Материалы 10-й Всесоюзн. акуст. конф. / ИМАШ АН СССР. – М., 1983. С. 34 – 37.
- 3 Айрапетов, Э. Л. Вибрационная диагностика зарождающихся дефектов зубчатых механизмов / Э.Л. Айрапетов, Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова и др. // Тез. докл. 5-го Всесоюзн. совещ-я по техн. диагн. – Суздаль, 1982. – С. 11-13.
- 4 Айрапетов, Э. Л. Виброакустическая диагностика выкрашивания и заедания зубчатых колес на ранней стадии / Э.Л. Айрапетов, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков // Точность и надежность механических систем. Стохастическая локализация врожденности / Рижск. гос. ун-т. – Рига, 1983. - С. 68 – 76.
- 5 Александров, А. А. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования / А.А. Александров, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. – Л.: Судостроение, 1986. – 321 с.
- 6 Апасов, А. М. Устройства для приема сигналов акустической эмиссии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1998. – № 10. – С. 35-38.
- 7 Асриян, Г. М. Возможности диагностирования вибрации сложных динамических систем / Г. М. Асриян // Колебания редукторных систем. – М.: Наука, 1980. – С.70 - 74.
- 8 Бакурский, Н. Н. О проблемах неразрушающего контроля в Саратовском регионе / Н.Н. Бакурский / Контроль и диагностика. 2000. – № 6. - С. 10 - 12.
- 9 Балицкий, Ф. Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф. Я. Балицкий, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 120 с.
- 10 Бамбалас, П. К вопросу о диагностировании подшипников / П. Бамбалас, К.М. Рагульскис, М. Рондоманкас // Физические методы исследования шумообразования и акустическая диагностика в машиностроении: Тез. докл. акуст. сем. / Куйбышев. политехн. ин-т. – Куйбышев, 1978. - С. 13 –14.
- 11 Барков, А. В. Диагностирование и прогнозирование состояния подшипников качения по сигналу вибрации / Судостроение. 1985. – №3. – С. 21-23.
- 12 Баркова, Н.А. Современное состояние виброакустической диагностики машин / Н.А. Баркова. – Санкт – Петербург: Изд-во СПбВМА, 2002. – 260 с.
- 13 Вибрации в технике: справочник / В.С. Авдуевский, И.И. Артоболевский [и др.]; под ред. М.Д. Генкина. – М.: Машиностроение, 1981. – Т5. – 496 с.
- 14 Вибрации в технике: справочник / В.С. Авдуевский, И.И. Артоболевский [и др.]; под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – Т6. – 456 с.
- 15 Вибрации в технике: справочник / В.С. Авдуевский, И.И. Артоболевский [и др.]; под ред. Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1981. Т3. – 544 с.
- 16 ГОСТ 18322 – 78 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1991, 15 с.
- 17 Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 228 с.
- 18 Соколов, О.В. О методике исследования режимов работы шестерен и подшипников трансмиссии в условиях эксплуатации / О.В. Соколов, Ю.Г. Стефанович // Труды НАМИ. – 1972. - № 8. - С.55-66.
- 19 Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко; пер. с англ. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
- 20 Труханов, В. М. Трансмиссии гусеничных и колесных машин / В.М. Труханов, В.Ф. Зубков и др. – М.: Машиностроение, 2001. – 736 с.
- 21 Туревский, И.С. Техническое обслуживание и текущий ремонт автомобилей. Часть 1: учеб. пособие /И.С. Туревский. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 432 с.

References

- 1 Kuznetsov, E.S. Technical operation of cars: a textbook for universities / E.S. Kuznetsov, V.P. Voronov, A.P. Boldin [and others]. under general ed. E.S. Kuznetsova. – 3rd ed., revised. and additional – M: Transport, 1991. – 413 p.
- 2 Airapetov, E.L. Algorithms for vibroacoustic diagnostics of degradation processes in gear mechanisms / E.L. Airapetov, F.Ya. Balitsky, M.A. Ivanova and others // Materials of the 10th All-Union. acoustic conf. / IMASH AS USSR. – M., 1983. S. 34 – 37.
- 3 Airapetov, E.L. Vibration diagnostics of incipient defects in gear mechanisms / E.L. Airapetov, F.Ya. Balitsky, M.A. Ivanova and others // Abstracts. report 5th All-Union technical meeting diag. – Suzdal, 1982. – pp. 11-13.
- 4 Airapetov, E.L. Vibroacoustic diagnostics of chipping and jamming of gear wheels at an early stage / E.L. Airapetov, A.G. Sokolova, E.I. Khomyakov // Accuracy and reliability of mechanical systems. Stochastic localization of innateness / Rizhsk. state univ. – Riga, 1983. - P. 68 – 76.
- 5 Aleksandrov, A.A. Vibration and vibration diagnostics of ship electrical equipment / A.A. Alexandrov, A.V. Barkov, N.A. Barkova and others - L.: Shipbuilding, 1986. - 321 p.
- 6 Apasov, A. M. Devices for receiving acoustic emission signals / Factory laboratory. Diagnostics of materials. 1998. – No. 10. – P. 35-38.
- 7 Asriyan, G. M. Possibilities for diagnosing vibration of complex dynamic systems / G. M. Asriyan // Oscillations of gear systems. – M.: Nauka, 1980. – P.70 - 74.
- 8 Bakursky, N.N. On the problems of non-destructive testing in the Saratov region / N.N. Bakursky / Control and diagnostics. 2000. – No. 6. - P. 10 - 12.
- 9 Balitsky, F. Ya. Vibroacoustic diagnostics of incipient defects / F. Ya. Balitsky, A.G. Sokolova, E.I. Khomyakov et al. - M.: Mashinostroenie, 1984. - 120 p.
- 10 Bambalas, P. On the issue of diagnosing bearings / P. Bambalas, K.M. Ragulskis, M. Rondonanskas // Physical methods for studying noise generation and acoustic diagnostics in mechanical engineering: Proc. report acoustic family / Kuibyshev. Polytechnic int. – Kuibyshev, 1978. - P. 13–14.
- 11 Barkov, A.V. Diagnosis and prediction of the condition of rolling bearings using a vibration signal / Shipbuilding. 1985. – No. 3. – pp. 21-23.
- 12 Barkova, N.A. Current state of vibroacoustic diagnostics of machines / N.A. Barkova. – St. Petersburg: SPbVMA Publishing House, 2002. – 260 p.
- 13 Vibrations in technology: reference book / V.S. Avduevsky, I.I. Artobolevsky [and others]; edited by M.D. Genkina. – M.: Mechanical Engineering, 1981. – T5. – 496 p.
- 14 Vibrations in technology: reference book / V.S. Avduevsky, I.I. Artobolevsky [and others]; edited by K.V. Frolova. – M.: Mechanical Engineering, 1981. – T6. – 456 p.
- 15 Vibrations in technology: reference book / V.S. Avduevsky, I.I. Artobolevsky [and others]; edited by F.M. Dimentberga, K.S. Kolesnikova. – M.: Mechanical Engineering, 1981. T3. – 544 p.
- 16 GOST 18322 – 78 System of technical maintenance and repair of equipment. Terms and Definitions. – M.: Standards Publishing House, 1991, 15 p.
- 17 Genkin, M.D. Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms / M.D. Genkin, A.G. Sokolova. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 228 p.
- 18 Sokolov, O.V. On the methodology for studying the operating modes of transmission gears and bearings under operating conditions / O.V. Sokolov, Yu.G. Stefanovich // Proceedings of NAMI. – 1972. - No. 8. - P.55-66.
- 19 Timoshenko, S.P. Fluctuations in engineering / S.P. Tymoshenko; lane from English – M.: Nauka, 1967. – 444 p.
- 20 Trukhanov, V.M. Transmissions of tracked and wheeled vehicles / V.M. Trukhanov, V.F. Zubkov et al. - M.: Mashinostroenie, 2001. - 736 p.
- 21 Turevsky, I.S. Maintenance and current repair of vehicles. Part 1: textbook. allowance /I.S. Turevsky. – M.: INFRA-M, 2005. – 432 p.

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-107-119



УДК 629.331

UDC 629.331

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ АЛГОРИТМОВ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАССЛЕДОВАНИЯ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

APPLICATION OF DIGITAL ALGORITHMS TO OPTIMIZE THE PROCESS OF INVESTIGATION OF ROAD ACCIDENTS

✉¹ **Лазарев Дмитрий Александрович**, к.т.н, доцент кафедры эксплуатации и организации движения автотранспорта, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, e-mail: avtotech31@mail.ru

✉¹ **Lazarev Dmitry Aleksandrovich**, candidate of engineering sciences, associate professor at the departments of operation and traffic management of the Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: avtotech31@mail.ru

Гринякин Руслан Валентинович, аспирант кафедры организации перевозок и безопасности движения, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: RV.Grinyakin90@yandex.ru

Grinyakin Ruslan Valentinovich, postgraduate at the department of transportation organization and traffic safety, Voronezh state forestry engineering university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: RV.Grinyakin90@yandex.ru

Стрекалов Дмитрий Павлович, аспирант кафедры эксплуатации и организации движения автотранспорта, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, e-mail: Strekalovdp@yandex.ru

Strekalov Dmitry Pavlovich, postgraduate at the department of operation and traffic management of the Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: Strekalovdp@yandex.ru

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

Shatalov Evgeniy Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of transportation organization and traffic safety, Voronezh state forestry engineering university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. В настоящее время очень активно развивается цифровизация сфер жизнедеятельности человека. Данный тренд не обошел стороной и транспортную сферу. Это продиктовано тем, что сложность вычислительных процессов, необходимых для обслуживания сферы транспорта, возрастает кратно с увеличением автотранспорта на уличной дорожной сети (УДС). Вследствие этого возрастает нагрузка на УДС, что влечет за собой

Annotation. Digitalization of human activity sphere is developing very actively nowadays. This trend has not bypassed the transport sector. It is dictated by the fact that the complication of computational processes, imperative for servicing the transport sector, increases with the vehicles growth on the road network. As a result, the road network load increases, which entails the road accidents growth. Using digital calculation capabilities and algorithms of typical versions,

увеличение количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП). При применении цифровых возможностей расчета и алгоритмов типовых сценариев процесс расследования ДТП занимает на порядок меньше времени, а точность расчетов увеличивается, позволяя совершать больше экспертных операций.

the process of investigating an accident takes less time, and the accuracy of calculations increases, allowing more expert operations to be performed.

Ключевые слова: ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ, УЛИЧНО-ДОРОЖНАЯ СЕТЬ, ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЕ ПРОИСШЕСТВИЕ, СКОРОСТЬ АВТОМОБИЛЯ, РАССЛЕДОВАНИЕ ДТП.

Keywords: DIGITAL MODEL, ROAD NETWORK, TRAFFIC ACCIDENT, CAR SPEED, ACCIDENT INVESTIGATION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Рост автомобилизации в стране ускоряет логистические процессы в жизнедеятельности общества. Одновременно с этим происходит неизбежный рост потерь экономики от дорожно-транспортных событий, связанных с всевозможными видами происшествий (наездов на пешеходов, столкновений ТС, опрокидываний и т.д.) [1]. Возрастающий темп, связанный с процессом автомобилизации (да и в общем, от научного прогресса), не обходит стороной деятельность экспертных подразделений, которые сопровождают процесс расследования дорожно-транспортных происшествий. С увеличением количества происшествий растет потребность в количестве исследований их обстоятельств, что увеличивает нагрузку на экспертные учреждения, специализирующиеся на этом виде исследований. В этом случае на помощь могут прийти методы автоматизации математических процессов [2].

2 Материалы и методы

На текущий момент в автотехнических исследованиях к основным видам расчетов можно отнести расчет скорости движения транспортных средств. Основные варианты расчетов данных категорий для простоты восприятия приведены в табл. 1 [3-6, 8].

Таблица 1 – Основные виды расчетов при автотехнических исследованиях

Вид расчета	Формула расчета
1	2
Определения скорости движения автомобиля	$V_a = 1,8 \cdot j_1 \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot (j_1 \cdot S_1 + \dots + j_2 \cdot S_2 + \dots + j_n \cdot S_n)}$ (1)
Расчет скорости ТС при его движении по последовательным участкам с разными коэффициентами сцепления шин с дорожным покрытием	<p>А) $tg\lambda > \frac{B}{L}$; Б) $tg\lambda = \frac{B}{L}$;</p> <p>В) $tg\lambda < \frac{B}{L}$; Г) $\lambda = 90^\circ$;</p>

1	2
<p>Расчет скорости ТС при его движении по последовательным участкам с разными коэффициентами сцепления шин с дорожным покрытием</p>	<p>Если А:</p> $V_a = 1,8 \cdot j_1 \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot (S_{цт1} \cdot j_1 + \dots + \frac{B}{\operatorname{tg} \lambda} \cdot \frac{2 \cdot a \cdot \phi_1 + b \cdot (\phi_1 + \phi_2)}{2 \cdot L + h_{цт} \cdot (\phi_1 - \phi_2)} \cdot g + \dots + \left(L - \frac{B}{\operatorname{tg} \lambda} \right) \cdot \frac{a \cdot \phi_1 + b \cdot \phi_2}{L + h_{цт} \cdot (\phi_1 - \phi_2)} \cdot g + \dots + \frac{B}{\operatorname{tg} \lambda} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot \phi_2 + a \cdot (\phi_1 + \phi_2)}{2 \cdot L + h_{цт} \cdot (\phi_1 - \phi_2)} \cdot g + \dots + S_{цт2} \cdot j_2)}$ <p>Если Б:</p> $V_a = 1,8 \cdot j_1 \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot (S_{цт1} \cdot j_1 + \dots + L \cdot \frac{2 \cdot a \cdot \phi_1 + b \cdot (\phi_1 + \phi_2)}{2 \cdot L + h_{цт} \cdot (\phi_1 - \phi_2)} \cdot g + \dots + L \cdot \frac{2 \cdot b \cdot \phi_2 + a \cdot (\phi_1 + \phi_2)}{2 \cdot L + h_{цт} \cdot (\phi_1 - \phi_2)} \cdot g + S_{цт2} \cdot j_2)}$ <p>Если В:</p> $V_a = 1,8 \cdot j_1 \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot (S_{цт1} \cdot j_1 + \dots + L \cdot \frac{2 \cdot a \cdot \phi_1 + b \cdot (\phi_1 + \phi_2)}{2 \cdot L + h_{цт} \cdot (\phi_1 - \phi_2)} \cdot g + \dots + \left(\frac{B}{\operatorname{tg} \lambda} - L \right) \cdot \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \cdot g + \dots + L \cdot \frac{2 \cdot b \cdot \phi_2 + a \cdot (\phi_1 + \phi_2)}{2 \cdot L + h_{цт} \cdot (\phi_1 - \phi_2)} \cdot g + S_{цт2} \cdot j_2)}$ <p>Если Г:</p> $V_a = 1,8 \cdot j_1 \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot (S_{цт1} \cdot j_1 + \dots + L \cdot \frac{a \cdot \phi_1 + b \cdot \phi_2}{L + h_{цт} \cdot (\phi_1 - \phi_2)} \cdot g + S_{цт2} \cdot j_2)}$
<p>Расчет скорости при непостоянном торможении</p>	<p>При незначительном оттормаживании:</p> $V_a = 1,8 \cdot j_a \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot j_a \cdot S_{ю} + \dots + \sqrt{26 \cdot S_k \cdot j_k - 4 \cdot 3 \cdot (j_a - j_k) \cdot j_k \cdot t_5^2 + \dots + 1,8 \cdot (j_a - j_k) \cdot t_5^2}}$

1	2
	<p>При незначительном оттормаживании:</p> $V_a = 1,8 \cdot j_a \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot j_a \cdot S_{ю} + \dots + \sqrt{26 \cdot S_{\kappa} \cdot j_{\kappa} - 4,3 \cdot (j_a - j_{\kappa}) \cdot j_{\kappa} \cdot t_5^2 + \dots} + 1,8 \cdot (j_a - j_{\kappa}) \cdot t_5]^2}$ <p>При значительном разрыве в следах торможения:</p> $V_a = 1,8 \cdot j_a \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot j_a \cdot S_{ю1} + (1,8 \cdot (j_a - j_{\kappa}) \cdot t_5 + \dots + \sqrt{26 \cdot S_{\kappa} \cdot j_{\kappa} - 4,3 \cdot (j_a - j_{\kappa}) \cdot j_{\kappa} \cdot t_5^2 + \dots} + (1,8 \cdot j_a \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot j_a \cdot S_{ю2}})^2)^2}$ <p>При отсутствии расстормаживания:</p> $V_a = 1,8 \cdot j_a \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot j_a \cdot S_{ю1} + \dots + [\sqrt{26 \cdot S_{ю2} \cdot j_a + 3,6 \cdot \lambda_2 (t_5 + t_3) \cdot j_a \cdot (1 - 0,5 \cdot \lambda_2)}]^2}$
<p>Расчет скорости при наличии разворота автомобиля</p>	$V_a = 1,8 \cdot j_a \cdot t_3 + \dots + \sqrt{26 \cdot \left(j_a \cdot S_{ю} + j_{\sigma} \cdot S_{ЦТ} + j_{\sigma} \cdot L \cdot \frac{\alpha \cdot \pi}{360} \right)}$
<p>Обозначения:</p> <p>t_2 – время срабатывания тормозного привода, сек;</p> <p>t_3 – время нарастания (замедления), сек;</p> <p>$j_{1,2...n}$ – замедление транспортного средства в соответствии с преодолеваемыми участками по ходу передвижения, м/сек²;</p> <p>$S_{1,2...n}$ – длина одного участка, который характеризуется соответствующим покрытием коэффициентом сцепления, м;</p> <p>$j_1(j_a)$ – замедление транспортного средства на первом участке торможения, м/сек²;</p> <p>B – размерность колеи транспортного средства, м;</p> <p>L – колесная база автомобиля, м;</p> <p>$S_{ЦТ1}$ – перемещение центра масс транспортного средства на первом участке, м;</p> <p>a – расстояние от центра масс до передней оси, м;</p> <p>b – расстояние от центра масс до задней оси, м;</p> <p>$h_{ЦТ}$ – высота центра масс транспортного средства, м;</p> <p>$\varphi_{1,2...n}$ – коэффициенты сцепления транспортного средства в соответствии с преодолеваемыми участками по ходу передвижения;</p> <p>λ – величина угла между осевой линией кузова транспортного средства и границей пересекаемых участков с разными коэффициентами сцепления;</p> <p>S_{κ} – перемещение центра масс транспортного средства в состоянии движения без торможения, м;</p> <p>j_{κ} – замедление транспортного средства в состоянии движения без торможения, м/сек²;</p> <p>t_5 – время оттормаживания, сек (для гидравлического привода принимается равным 0,3 сек, а для пневматического привода – $2 \cdot t_2$);</p>	

λ_p – степень растормаживания;
 S_p – разрыв между отобразившимися следами торможения транспортного средства, м;
 $S_{ю}$ – перемещение центра масс транспортного средства до начала участка бокового скольжения, м;
 $j_{б}$ – замедление транспортного средства в состоянии бокового скольжения, м/сек² ($j_{б} = 0,8 \cdot j_a$);
 α – угол разворота кузова транспортного средства относительно центра масс, град.

3 Результаты исследований

Для автоматизации расчета скорости движения транспортных средств по различным сценариям составлена блок-схема, которая скомпилирована в программу на языке программирования «C++» и реализована на базе Rad Studio 11 [11-15].

Для удобства работы с программой был выбран оконный интерфейс, который обеспечивает понятную и удобную навигацию для удобства расчета (рис. 1).

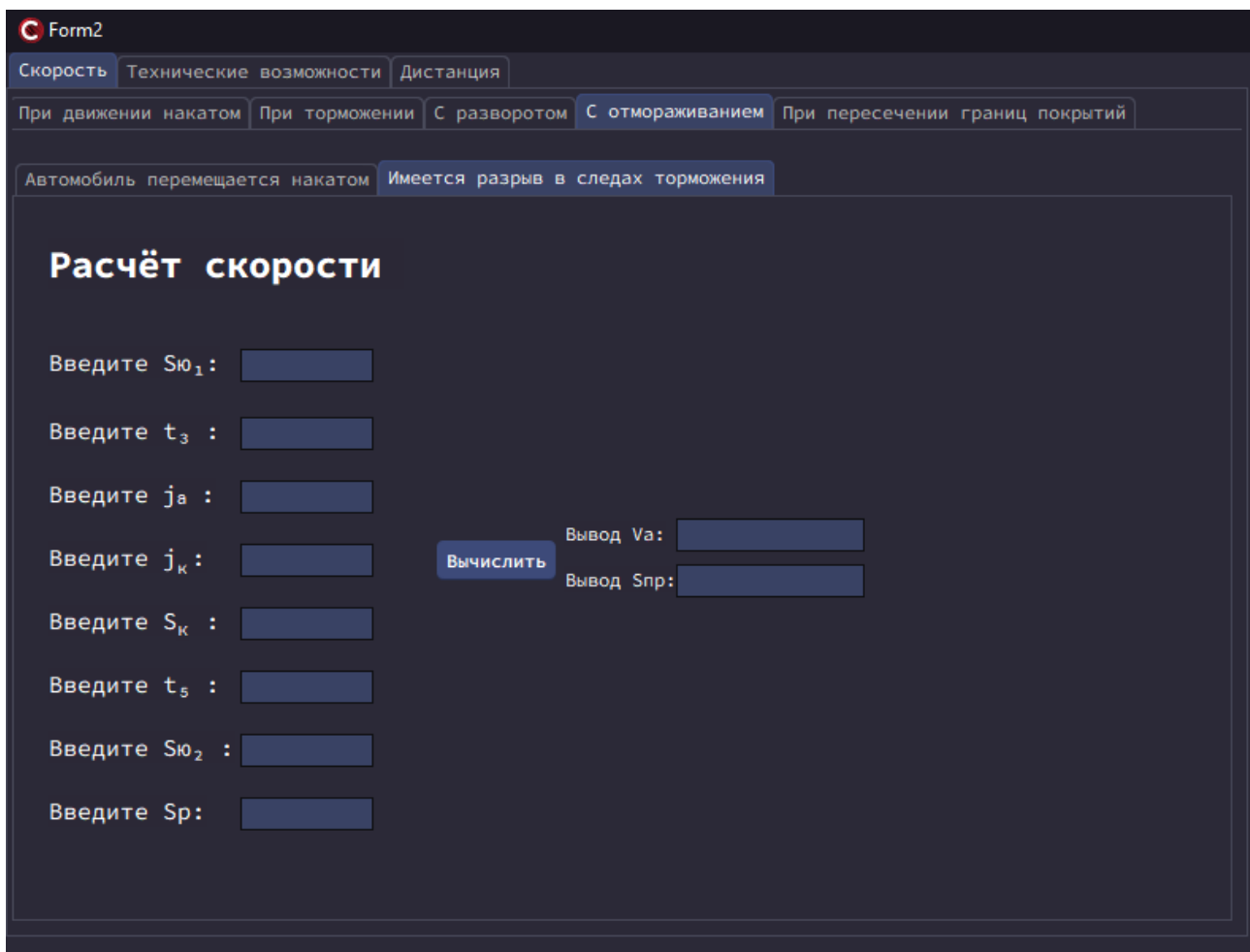


Рисунок 1 – Интерфейс программы

Алгоритм расчетов сценариев в виде блок-схем представлен на рис. 2-5 [10].

Для проверки работоспособности программы были использованы несколько примеров реальных дорожно-транспортных происшествий.

Пример фабулы дорожно-транспортного происшествия: «** июля 202* года около 19 часов 25 минут Н**** В. С., управляя автомобилем Skoda Octavia, государственный регистрационный знак *****31 RUS, передвигался по автодороге со стороны пос. Волоконовка в направлении г. Шебекино и на 33 км +25 метров автодороги Белгород-Волоконовка на территории Шебекинского района Белгородской области совершил наезд на пешехода Т**** Д. Ф., пересекавшую проезжую часть слева направо по ходу движения автомобиля. В результате дорожно-транспортного происшествия пешеходу Т**** Д. Ф. были причинены повреждения, от которых она впоследствии скончалась в больнице.»

С целью определения адекватности модели расчет вначале был проведен стандартным способом путем расчета вручную с использованием рекомендованных методик.

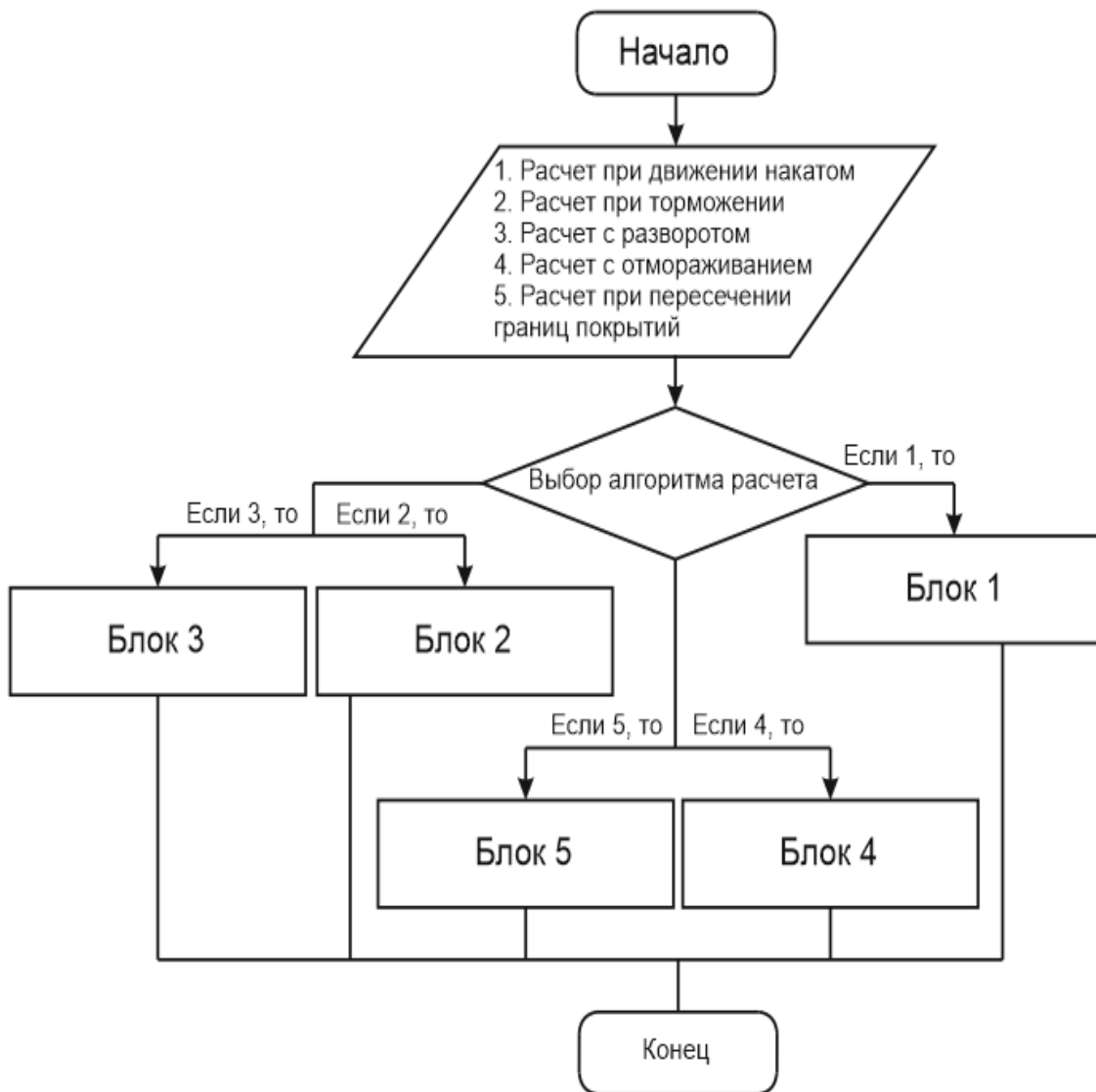


Рисунок 2 – Блок-схема расчета скорости движения ТС при различных сценариях расчета

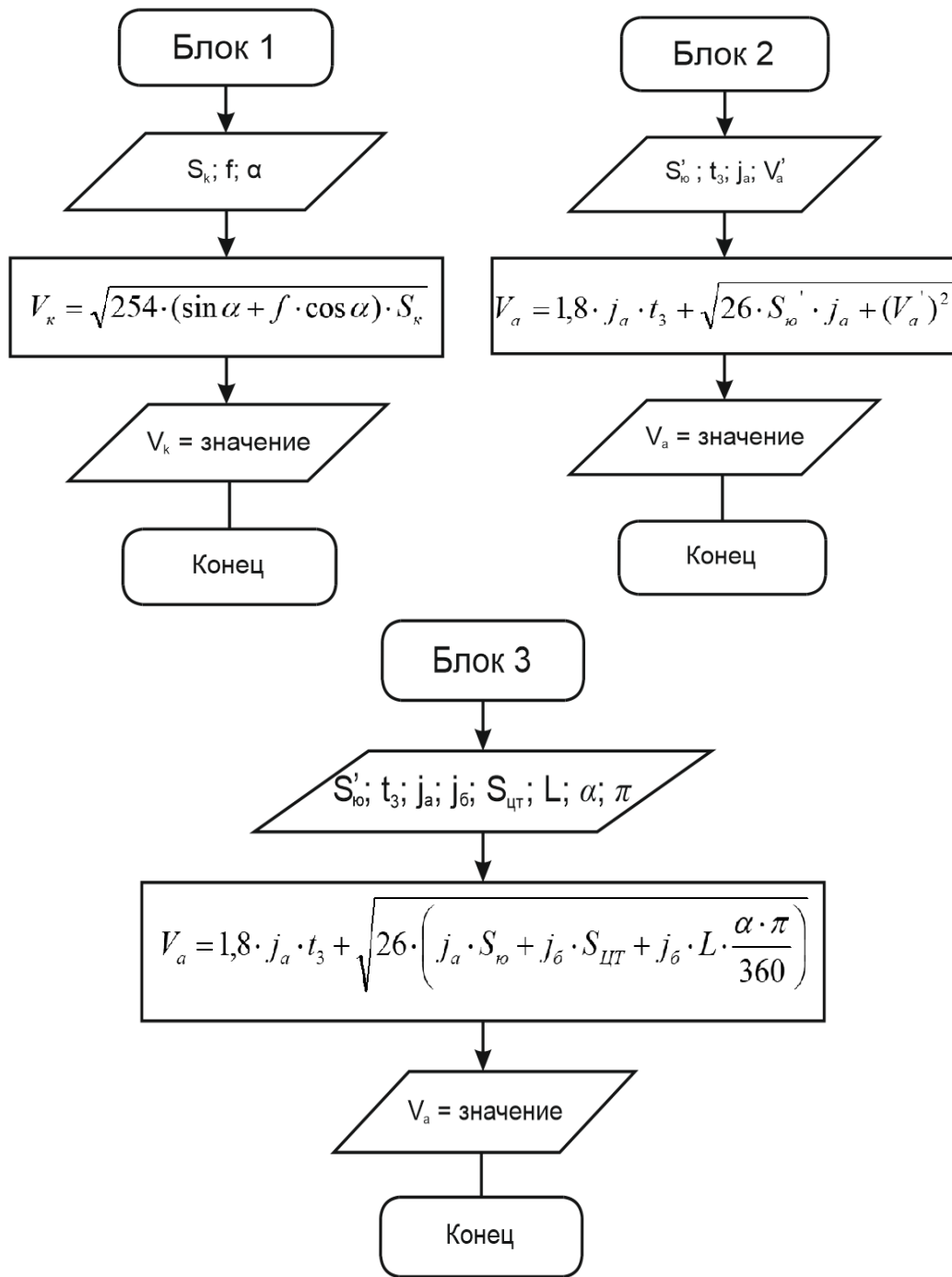


Рисунок 3 – Блок-схемы сценариев (блоки 1-3) расчета скоростей движения ТС

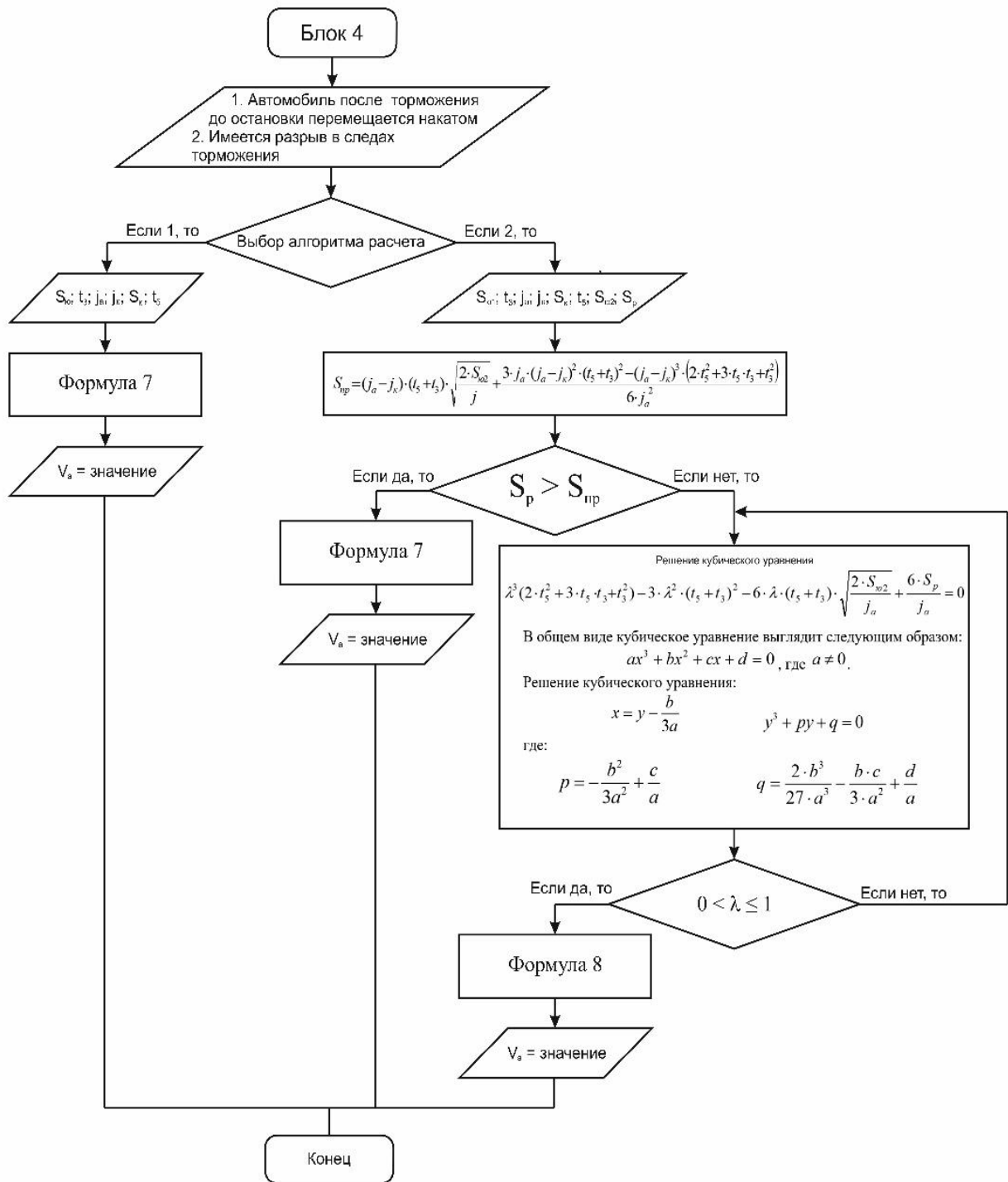


Рисунок 4 – Блок-схемы сценариев расчета (блок 4) скоростей движения ТС

Величина минимального расстояния, необходимого для полного растормаживания определяется по следующей формуле [7]:

$$S_{np} = (j_a - j_k) \cdot (t_5 + t_3) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_{02}}{j_a} + \dots} + \frac{3 \cdot j_a \cdot (j_a - j_k)^2 \cdot (t_5 + t_3)^2 - (j_a - j_k)^3 \cdot (2 \cdot t_5^2 + 3 \cdot t_5 \cdot t_3 + t_3^2)}{6 \cdot j_a^2}, \quad (10)$$

где j_a – замедление транспортного средства категории М1 (Skoda Octavia) при экстренном торможении на сухом асфальтобетонном покрытии, м/с^2 : 5,83; 5,91; 5,85 (установлено экспериментально с использованием прибора «Эффект-02»); 5,86 – среднее значение для простоты расчета) [9]; j_k – замедление транспортного средства категории М1 (Skoda Octavia) при перемещении без торможения (накатом), м/с^2 : $9,8 \cdot 0,016 \approx 0,16$ [7]; t_5 – время оттормаживания, с: 0,3 [7]; t_3 – время нарастания замедления транспортного средства категории М1 (Skoda Octavia), с: 0,35 [7]; $S_{\text{ю2}}$ – перемещение центра масс автомобиля Skoda Octavia на втором участке торможения, м: 42,4.

$$S_{np} = (5,86 - 0,16) \cdot (0,3 + 0,35) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 42,4}{5,86} + \dots} = 14,7.$$

$$\dots + \frac{3 \cdot 5,86 \cdot (5,86 - 0,16)^2 \cdot (0,35 + 0,3)^2 - (5,86 - 0,16)^3 \cdot (2 \cdot 0,3^2 + 3 \cdot 0,3 \cdot 0,35 + 0,35^2)}{6 \cdot 5,86^2}$$

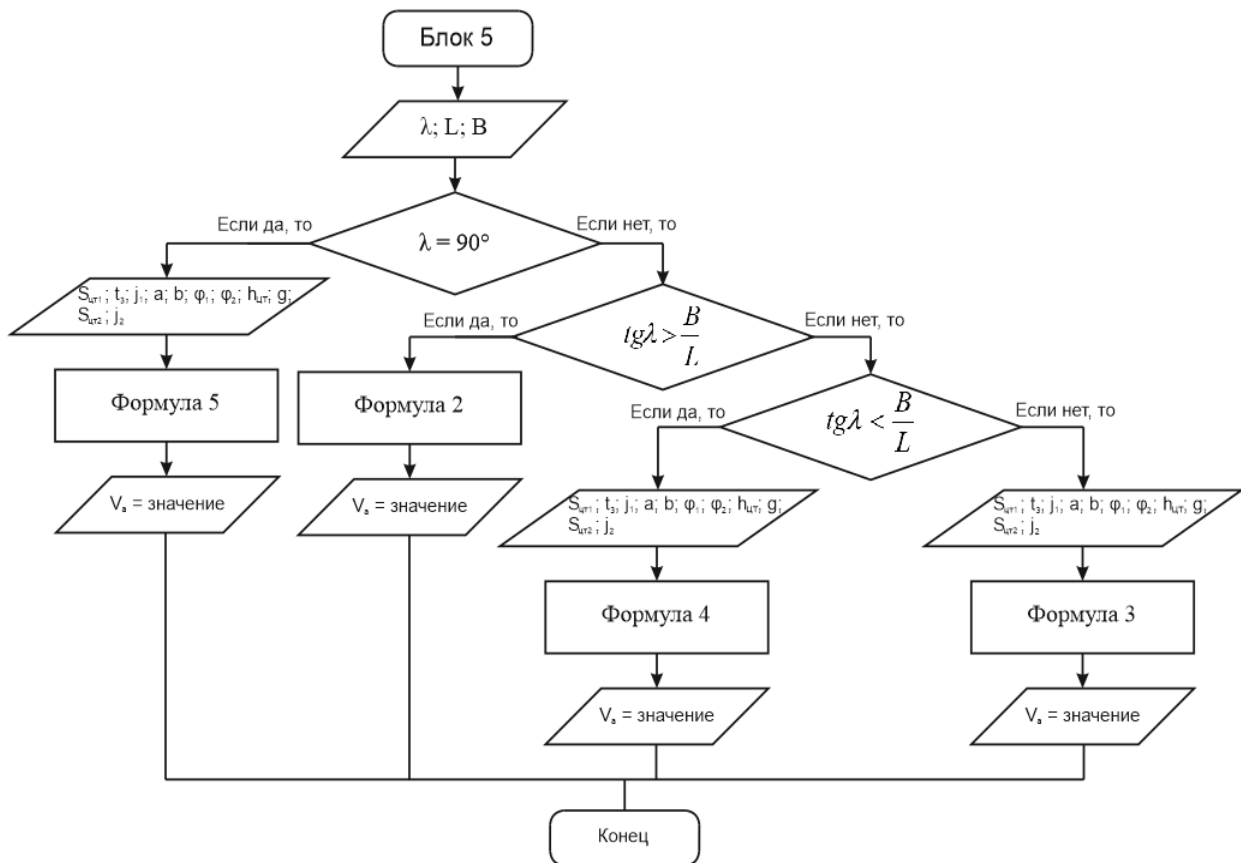


Рисунок 5 – Блок-схемы сценариев расчета (блок 5) скоростей движения ТС

Поскольку $S_{np} > S_p$ ($14,7 \text{ м} > 8,8 \text{ м}$), то можно констатировать, что полное растормаживание транспортного средства в данном примере не имело места, поэтому в расчет скорости движения автомобиля Skoda Octavia необходимо ввести величину степени растормаживания, которая определяется решением кубического уравнения:

$$\lambda^3 (2 \cdot t_5^2 + 3 \cdot t_5 \cdot t_3 + t_3^2) - 3 \cdot \lambda^2 \cdot (t_5 + t_3)^2 - 6 \cdot \lambda \cdot (t_5 + t_3) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_{\text{ю2}}}{j_a} + \frac{6 \cdot S_p}{j_a}} = 0; \quad (11)$$

$$\lambda^3 (2 \cdot 0,3^2 + 3 \cdot 0,3 \cdot 0,35 + 0,35^2) - 3 \cdot \lambda^2 \cdot (0,3 + 0,35)^2 - \dots$$

$$\dots - 6 \cdot \lambda \cdot (0,3 + 0,35) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 42,4}{5,86}} + \frac{6 \cdot 8,8}{5,86} = 0 \quad , \text{откуда}$$

$$0,61\lambda^3 - 1,27\lambda^2 - 14,8\lambda + 9,01 = 0.$$

Решением данного кубического уравнения получено значение $\lambda = 0,58$.
Откуда по формуле (8) определяем начальную скорость, км/ч:

$$V_a = 1,8 \cdot 5,86 \cdot 0,35 + \dots$$

$$\dots + \sqrt{26 \cdot 5,86 \cdot 12,6 + \left[\sqrt{26 \cdot 42,4 \cdot 5,86} + 3,6 \cdot 0,58 \cdot (0,3 + 0,35) \cdot 5,86 \cdot (1 - 0,5 \cdot 0,58) \right]^2} = 100,2.$$

Таким образом, скорость движения автомобиля Skoda Octavia до начала экстренного торможения транспортного средства в данном примере составляла величину около 100,2 км/ч, если расчет проводить путем ручной калькуляции с наложением погрешностей расчета от взаимосвязи нескольких расчетных операций.

Однако, используя предложенную программу и подставляя исходные данные обозначенного выше примера, расчет скорости движения автомобиля Skoda Octavia показал величину 95,2 км/ч (рис. 6).

Рисунок 6 – Пример расчета скорости движения ТС с оттормаживанием

С целью определения адекватности предложенного программного обеспечения была проведена сравнительная оценка между аналитическим ручным методом и автоматическим расчетом. Результаты данного сравнения приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Сравнение результатов расчетов разными способами

	Переменная ($S_{ю2}$)	Скорость, км/ч		Разница, %
		Аналитический	Автоматический	
1	20	79,5	74,2	6,7
2	30	89,5	84,3	5,8
3	42,4	100,2	95,2	5
4	50	106,2	101,4	4,6
5	60	113,6	108,9	4,2

С учетом полученных значений очевидно, что программа уточняет расчет, значительно сокращая степень влияния погрешности и время расчета, которое тратит эксперт, выполняя калькуляционные действия. При этом погрешность расчета находится в пределах инструментальной погрешности.

4 Обсуждение и заключение

Используя предложенные алгоритмы и средства автоматизации процесса расчета возможно в значительной степени снизить трудовые затраты эксперта-автотехника на исследование обстоятельств дорожно-транспортного происшествия. Современные технологии позволяют обрабатывать большие объемы данных за незначительное время. С использованием автоматизации появляется возможность комплексного анализа различных исходных данных, которые, в свою очередь, позволяют учесть многовекторность событий, приводящих к ДТП. Данный подход способствует выявлению закономерностей и аномалий, которые приводят к корреляционному анализу информации, способствующей разработке стратегий предотвращения большого количества ДТП.

Данное программное обеспечение проходит апробацию на адекватность использования в БГТУ им. В. Г. Шухова и ЭКЦ УМВД России по Белгородской области.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. (This work was realized in the framework of the Program "Priority 2030" on the base of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. The work was realized using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.).

Список литературы

- 1 Евтюков, С. А. Судебная автотехническая экспертиза дорожно-транспортных происшествий / С.А. Евтюков, В.А. Пучкин // ИД «Петрополис». – Санкт-Петербург, 2017. – 416 с.
- 2 Иларионов, В.А. Автотехническая экспертиза. / В.А. Иларионов. – М.: Транспорт, 1989. – 240 с.
- 3 Евтюков, С. А. Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий / С. А. Евтюков, Я. В. Васильев; под общ. ред. С. А. Евтюкова. – 2-е изд., стереотип. – Санкт-Петербург: ООО «Издательство ДНК», 2005. – 288 с.
- 4 Новиков, А. Н. Исследование потери курсовой и вертикальной устойчивости транспортного средства при проведении дорожно-транспортной экспертизы/ А.Н. Новиков, И.А. Новиков, Д.А. Лазарев, В.Л. Махонин// Мир транспорта и технологических машин. 2022. – № 3-1 (78). – С. 41-49.

- 5 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.: Экзамен, 2004. – 208 с.
- 6 Novikov, I. A. Analysis of vehicles complex displacement in the process of investigation of vehicle crash/ I.A. Novikov, A.N. Degtyar, D.A. Lazarev, V.L. Makhonin// MATEC Web of Conferences 341, 00070 (2021). [https:// DOI:10.1051/matecconf/202134100070](https://doi.org/10.1051/matecconf/202134100070).
- 7 Миронова, Ю. А. Исследование процессов торможения автомобилей зарубежного и отечественного производства: Методические рекомендации / Ю.А. Миронова, Е.А. Китайгородский - М.: ЭКЦ МВД России, 2005. - 176 с.
- 8 Типовые экспертные методики исследования вещественных доказательств: Ч.1/Под ред. Канд. техн. наук Ю.М. Дильдина. Общая редакция канд. техн. наук В.В. Мартынова. – М.: ИНТЕРКРИМ-ПРЕСС, 2010. – 568 с.
- 9 Novikov, I. A. Experimental Installation for Calculation of Road Adhesion Coefficient of Locked Car Wheel/ I.A. Novikov, D.A. Lazarev// Transportation Research Procedia, v. 20, pp 463-467 (2017).
- 10 Данец, С. В. Применение автоматизированных средств исследования обстоятельств ДТП / С. В. Данец // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. 2013. Вып. 61–62. С. 190–194.
- 11 Кетков, Ю. Практика программирования. Visual Basic, C++ Builder, Delphi / Ю. Кетков, А. Кетков. - М.: БХВ-Петербург, 2007. - 464 с.
- 12 Пахомов, Борис С/С++ и Borland C++ Builder для начинающих /Борис Пахомов. - М.: БХВ-Петербург, 2006. - 630 с.
- 13 Пахомов, Борис Самоучитель С/С++ и С++ Builder 2007 (+ DVDROM) / Борис Пахомов. - М.: БХВ-Петербург, 2008. - 672 с.
- 14 Пол, Ирэ Объектно-ориентированное программирование с использованием С++ / Ирэ Пол. - М.: ДиаСофт Лтд, 2014. - 480 с.
- 15 Федоренко, Ю. П. Алгоритмы и программы на С++ Builder (+ CDROM) / Ю.П. Федоренко. - М.: ДМК Пресс, 2010. - 544 с.

References

- 1 Evtyukov, S.A. Forensic auto-technical examination of road accidents/S.A. Evtyukov, V.A. Puchkin//Petropolis Publishing House. - St. Petersburg, 2017. - 416 s.
- 2 Hilarionov, V.A. Autotechnical expertise ./V.A. Hilarionov. - М.: Transport, 1989. - 240 s.
- 3 Evtyukov S.A. Investigation and examination of road accidents/S.A. Evtyukov, Y. V. Vasiliev; under the general. ed. S. A. Evtyukova. - 2nd ed., Stereotype. - St. Petersburg: LLC "DNA Publishing House," 2005. - 288 s.
- 4 Novikov, A.N. Research of loss of heading and vertical stability of the vehicle during road transport expertise/A.N. Novikov, I.A. Novikov, D.A. Lazarev, V.L. Makhonin//World of transport and technological machines. 2022. № 3-1 (78). S. 41-49.
- 5 Suvorov, Yu.B. Judicial road and transport examination. Forensic assessment of the actions of drivers and other persons responsible for ensuring road safety at road accident sites: Training manual for universities/Yu.B. Suvorov. - М.: Exam, 2004. - 208 s.
- 6 Novikov, I.A. Analysis of vehicles complex displacement in the process of investigation of vehicle crash/ I.A. Novikov, A.N. Degtyar, D.A. Lazarev, V.L. Makhonin// MATEC Web of Conferences 341, 00070 (2021). [https:// DOI:10.1051/matecconf/202134100070](https://doi.org/10.1051/matecconf/202134100070).
- 7 Mironova, Yu. A. Study of braking processes of cars of foreign and domestic production: Methodological recommendations/Yu.A. Mironova, E.A. Kitaigorodsky - М.: ECC of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2005. - 176 s.
- 8 Standard expert methods for the study of material evidence: Ch.1/Ed. Cand. technical sciences Yu.M. Dildin. General Revision of Candidate Teh. sciences V.V. Martynova. - М.: INTER-KRIM-PRESS, 2010. - 568 s.9. Al Sawafi, M. Kh. Geo-information technologies in urban planning/M. Kh. Al Sawafi//Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G.

Shukhov, number: 6. - Founders: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2021. - S. 52-62.

9 Novikov, I.A. Experimental Installation for Calculation of Road Adhesion Coefficient of Locked Car Wheel/ I.A. Novikov, D.A. Lazarev// Transportation Research Procedia, v. 20, pp 463-467 (2017).

10 Danets, S.V. Application of automated means of investigation of accident accidents/S.V. Danets//Vestnik KHNADU: sat. scientific. tr. 2013. No. 61–62. S. 190-194.

11 Ketkov, Yu. Programming practice. Visual Basic, C++ Builder, Delphi/Yu. Ketkov, A. Ketkov. - М.: BHV-Petersburg, 2007. - 464 с.

12 Pakhomov, Boris C/C + + and Borland C++ Builder for beginners/Boris Pakhomov. - М.: BHV-Petersburg, 2006. - 630 с.

13 Pakhomov, Boris Self-Teacher S/S + + and C++ Builder 2007 (+ DVDROM)/Boris Pakhomov. - М.: BHV-Petersburg, 2008. - 672 с.

14 Paul, Ire Object-oriented programming using C + +/Ire Paul. - М.: DiaSoft Ltd, 2014. - 480 с.

15 Fedorenko, Yu.P. Algorithms and programs on C++ Builder (+ CDROM)/Yu.P. Fedorenko. - М.: DMK Press, 2010. - 544 с.

© Лазарев Д.А., Гринякин Р.В., Стрекалов Д.П., Шаталов Е.В., 2023