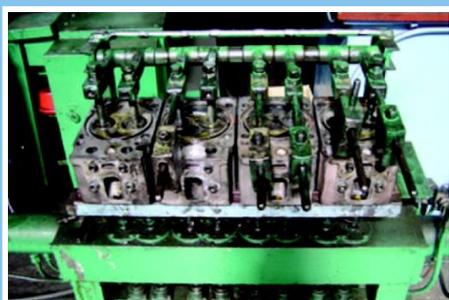


ВНТВ

Воронежский научно-технический вестник
2 (48) июнь 2024



Научно-технический
журнал (2-)
Издается с 2012 года
Выходит четыре раза в год

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

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

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

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

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

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

Зарегистрировано в Федеральной
службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор).
Свидетельство:
ЭЛ № ФС 77 - 66383 от 14.07.2016

© ФГБОУ ВО ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Коденцев С.Н., Подгорнов С.Н., Сухочев Г.А. Технологическое обеспечение экс-
плуатационных параметров проточных каналов комбинированной обработки..... 3

Норман А.В., Кириллов О.Н., Куц В.В. Особенности применения аддитив-
ных технологий при изготовлении наукоемких изделий на предприятиях
машиностроения 10

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Хашаш О.С.А., Тищенко Р.Г. Технологи-
ческое проектирование обработки деталей эксцентриковым осциллирующим
упрочнителем..... 20

Рябинина О.А., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Левин Д.Ю. Применение циф-
ровых двойников станочного оборудования при проектировании средств техно-
логического оснащения..... 29

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Ефимов А.Д., Алибагандов А.О., Локтионов В.В., Бессарабов Е.Н. Повыше-
ние достоверности автотехнической экспертизы ДТП с учетом сцепных харак-
теристик шин..... 41

Шаврина В.С., Чудакова Н.В. Оптимизация пассажирских автобусных перевозок
на примере маршрута № 169А г. Санкт-Петербурга..... 49

Черевастов М.Г. Статистическое исследование влияния удельной мощности
автомобиля на безопасность дорожного движения..... 61

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-3-9



УДК 621.09.047

UDC 621.09.047

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки;

2.5.6 – технология машиностроения

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ ПРОТОЧНЫХ
КАНАЛОВ КОМБИНИРОВАННОЙ
ОБРАБОТКОЙ**

**TECHNOLOGICAL SUPPORT
OF OPERATING PARAMETERS
OF FLOW CHANNELS BY COMBINED
PROCESSING**

Коденцев Сергей Николаевич,
к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Kodentsev Sergey Nikolaevich,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of Mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh.

✉¹ **Подгорнов Сергей Николаевич,**
аспирант кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: S.N.Podgornov.v mz@gmail.com

✉¹ **Podgornov Sergey Nikolaevich,**
postgraduate student of the department of Mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: S.N.Podgornov.v mz@gmail.com

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

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

Аннотация. В работе рассматриваются технологическое усовершенствование комбинированной электрохимической обработки (ЭХО) тонких профильных отверстий форсунок, приводятся данные о рациональных режимах обработки и результатах, которые свидетельствуют о перспективности использования данного метода в промышленности.

Annotation. The work discusses the technological improvement of combined electrochemical processing (ECM) of thin profile holes of injectors, provides data on rational processing modes and results that indicate the prospects of using this method in industry.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, ПРОФИЛЬНЫЕ ОТВЕРСТИЯ, ФОРСУНКИ, ЭЛЕКТРОЛИТ, ПЛОТНОСТЬ ТОКА.

Keywords: ELECTROCHEMICAL TREATMENT, PROFILE HOLES, NOZZLES, ELECTROLYTE, CURRENT DENSITY.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Мелкоразмерные каналы различной формы, которые используются в различных устройствах для подачи жидкости или газа под высоким давлением, играют важную роль в промышленном оборудовании и изделиях машиностроения. При проектировании таких устройств необходимо учитывать большое количество факторов, включая оптимальную обработку поверхностей и их устойчивость к переменным тепловым нагрузкам и воздействию агрессивных сред [1-5].

Детали сейчас изготавливают в основном литьем из специальных материалов, которые сложно обрабатывать традиционной штамповкой, к которым относятся материалы с высокой износостойкостью, жаропрочностью и устойчивостью к коррозии. В настоящее время все чаще используют заготовки, полученные методом SLS (селективное лазерное спекание металлических порошков). Для создания мелких отверстий и каналов (рис. 1 и 2) существует несколько способов: традиционная механическая обработка, использование электроэрозионных и электронно-лучевых станков, а также комбинации различных методов формообразования [6-9].



Рисунок 1 – Проточные каналы в торце форсунки



Рисунок 2 – Высоконапорная форсунка с тангенциальными отверстиями

Основная проблема в производстве форсунок заключается в факторе их малоразмерности, что существенно затрудняет эффективное применение стандартных методов обработки металла и контроля качества поверхности, особенно для профилированных отверстий.

В настоящее время проверка выполнения заданных показателей качества производится после завершения производства деталей с использованием специализированных испытательных стендов в составе оборудования или отдельно, с последующей корректирующей доработкой по результатам испытаний. Этот процесс является сложным и требует значительных затрат. Особые трудности возникают при необходимости коррекции рабочих участков после проверки. Для форсунок с протяженными отверстиями малых размеров этот процесс может быть таким же затратным, как и производство новых деталей, что делает его экономически нецелесообразным.

2 Материалы и методы

Схема технологического обеспечения процесса создания малоразмерных профильных отверстий деталей осуществляется в две стадии. На первой стадии проводится анализ методов или их комбинаций для обработки отверстий с учетом особенностей конструкции и условий

работы. На следующей стадии определяются оптимальные параметры обработки, обеспечивающие стабильность параметров малоразмерных рабочих поверхностей отверстий форсунок.

Для решения задачи замены ручных операций разрабатывались механизированные системы для удаления заусенцев, неровностей и дефектов на проточных поверхностях каналов форсунок. Эти системы использовали электрохимическую обработку (ЭХО) отверстий, в том числе тангенциальных в двухкомпонентных форсунках, что позволило заменить ручные операции более эффективным и точным способом.

Для оптимизации факторов процесса на первой стадии процесса формировались отверстия на форсунках, после чего проводилась обработка отверстий электрохимическим методом с использованием токопроводящей жидкости. Процесс включал подачу жидкости через отверстия, включение тока и выдерживание на режиме до достижения нужного размера отверстия, обеспечивающего требуемый расход жидкости при постоянном давлении.

3 Результаты исследований

Технологический процесс на основе данных операций позволил получать стабильные характеристики расхода форсунок и форсуночных головок на испытательных стендах. Технологическая система автоматически поддерживала постоянный зазор между электродами и необходимое давление электролита при определенном напряжении тока.

Для нахождения оптимального времени ЭХО отверстий, обеспечивающего заданный расход жидкости через них, и определения зависимости расхода жидкости через форсунку от времени обработки анодному растворению подвергались имитаторы двух типов форсунок.

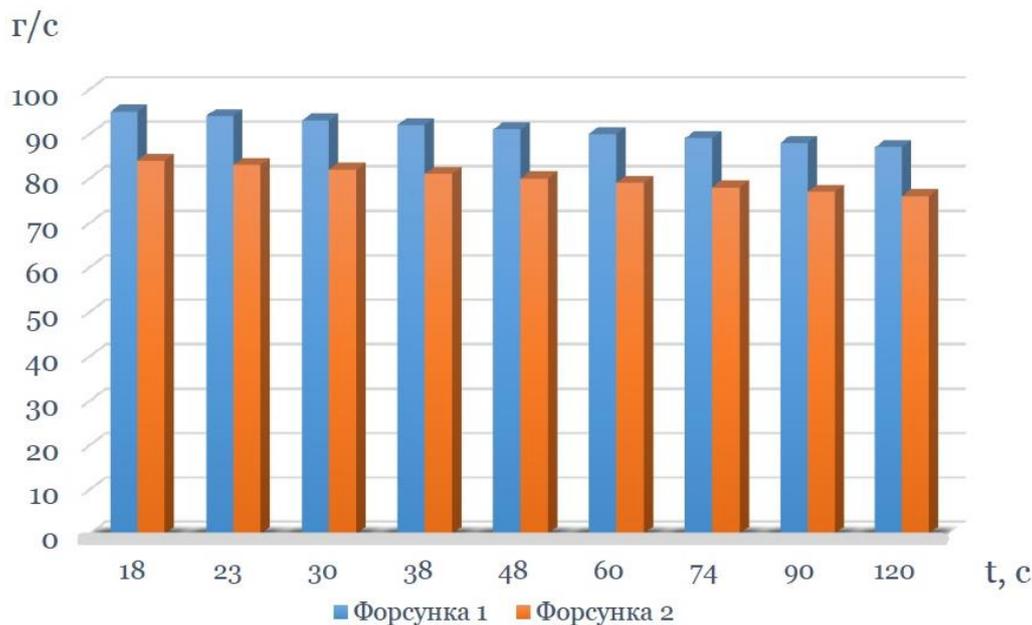
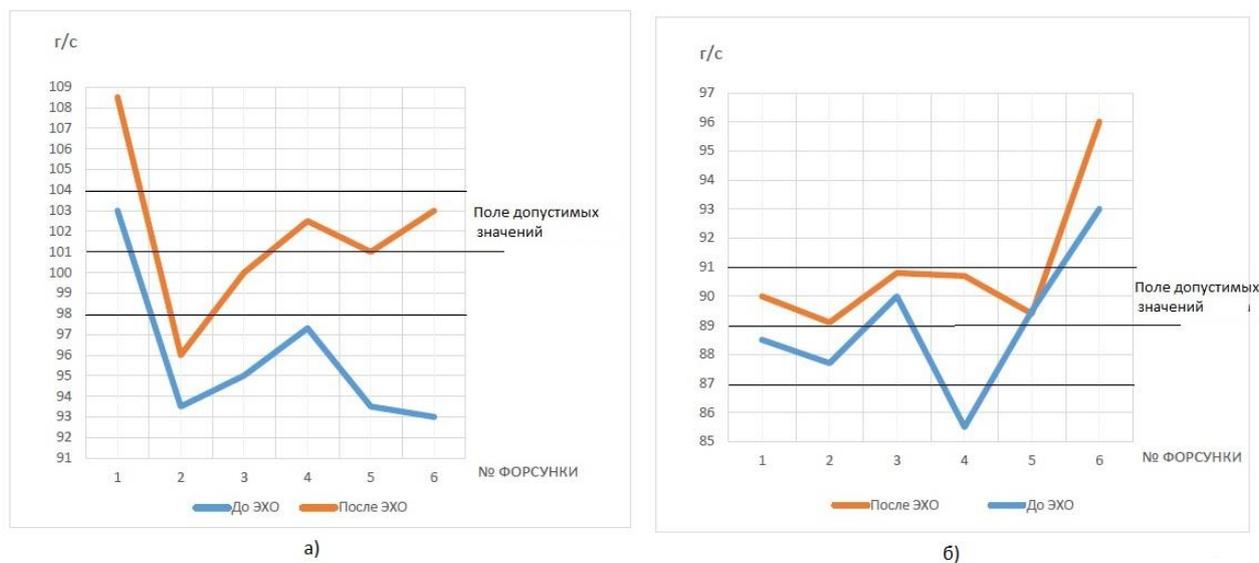


Рисунок 3 – Зависимость изменения расхода от времени ЭХО отверстий форсунок

На рис. 4 показаны результаты измерения расхода типовых форсунок до и после электрохимической обработки отверстий. Результаты показывают, что применение техники ЭХО значительно улучшает точность попадания форсунок в требуемый диапазон характеристик даже после однократной обработки отверстий.



а – форсунка тип 1; б – форсунка тип 2

Рисунок 4 – Результаты измерения расхода типовых форсунок до и после ЭХО отверстий

Ключевым фактором эффективности обработки является скорость анодного растворения материала $V_{лр}$:

$$V_{лр} = \varepsilon \frac{(U - \Delta U) \gamma_{эл}}{\rho_{заг}}, \quad (1)$$

где ε – электрохимический эквивалент материала заготовки; U – напряжение; $\gamma_{эл}$ – удельная проводимость; $\rho_{заг}$ – плотность материала заготовки.

При проведении экспериментов было установлено, что скорость линейного растворения превосходит расчетное значение по формуле (1), что может быть обусловлено наклепом поверхности при предварительном формообразовании отверстия. Данный факт был установлен в работах [10-13], в которых было определено, что наклепанная поверхность растворяется в 1,2-1,5 раза быстрее в сравнении с поверхностью без наклепа. Введение в выражение (1) коэффициента K_n ($K_n = 1,1-1,3$ для нержавеющей стали и сплавов), учитывающего наличие у обрабатываемой поверхности наклепанного слоя, позволило получить уточненную формулу для определения скорости линейного растворения:

$$V_{лр} = \varepsilon \cdot \eta \cdot K_n \frac{(U - \Delta U) \gamma_{эл}}{\rho_{заг}}, \quad (2)$$

где η - коэффициент, который характеризует потери напряжения при обработке.

Расчетным путем с последующим экспериментальным подтверждением установлены режимы ЭХО форсунок: напряжение $U = 12$ В, анодная плотность тока – $5 \div 10$ А/дм².

В качестве токопроводящих химически активных компонентов рабочих сред используются кислоты и щелочи, входящие в состав растворов и электролитов (H_2SO_4 ГОСТ 4204-77; $NaNO_3$ ГОСТ 4168-70; Na_2SO_4 ГОСТ 4166-76; CrO_3 ГОСТ 2548-77), состав которых корректируется в зависимости от марки обрабатываемого материала.

4 Обсуждение и заключение

Проведенные исследования электрохимической обработки форсунок дали следующие результаты:

- сокращение разброса параметров распылителей до регламентируемого диапазона значений на всех этапах производства благодаря автоматизации процесса обработки отверстий вместо ручной работы;
- повышение точности размеров отверстий до $\pm 0,06$ мм и их стабильности за счет контролируемого удаления металла при обработке;
- получение отверстий с закругленными краями радиусом R от 0,2 до 0,4 мм (рис. 2);
- увеличение ресурса блока форсунок за счет снижения гидродинамического сопротивления в их каналах.

Преимущества инновационного процесса ЭХО форсуночных каналов состоят в том, что:

- уменьшаются издержки и время на обслуживание благодаря упрощенной конструкции;
- продлевается период эксплуатации электролита с шести месяцев до года;
- сокращаются трудозатраты, повышаются безопасность и надежность за счет автоматизации процессов;
- обеспечивается быстрая отдача инвестиций.

Поскольку в тангенциальных форсунках имеется несколько отверстий (рис. 2), возникают сложности равномерности распыления жидкости всеми форсунками. Для решения этой проблемы предлагается провести струйную электрохимическую обработку отверстий после их создания. Этот процесс включает подачу токопроводящей жидкости через инструмент-катод и обрабатываемые отверстия. Сначала жидкость подается без тока, чтобы определить расход через каждое отверстие. Затем находят отверстие с наибольшим расходом, закрывают все остальные отверстия и последовательно прокачивают через них жидкость до достижения одинакового расхода с первой форсункой.

В процессе электрохимической обработки каналов переменного сечения в заготовках, выполненных с использованием методов быстрого прототипирования, возникают проблемы потери качества, связанные с избирательным анодным растворением материала в местах повышенной концентрации дефектов, рыхлости, микротрещин и пор. Это приводит к снижению эффективности процесса электрохимической обработки. В настоящий момент активно ведутся исследования в области применения рабочих средств с абразивным компонентом для обработки мелкогабаритных каналов, что способствует выравниванию качества внутренней поверхности материала [14, 15].

Путем использования предложенных подходов открывается возможность увеличить стабильность и расширить технологические границы в производстве деталей, таких как мелкогабаритные форсунки. Этот подход не только способствует улучшению качества продукции, но и существенно снижает расходы на производство.

Список литературы

- 1 Сухочев, Г. А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г. А. Сухочев. – М.: Машиностроение, 2004. – 287 с.
- 2 Патент РФ на изобретение № RU 2162394 C2, МПК6 В23Н 7/02, 7/08. Способ эрозионно-термической обработки / В.П. Смоленцев, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, М.А. Уваров. 2012.
- 3 Сухочев, Г.А. Работоспособность нагруженных деталей после комбинированной обработки в экстремальных условиях эксплуатации [Текст] / Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, А.М. Некрылов, Н.Д. Савенков // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГТУ. – Вып. 11, 2017. – С. 3-20.
- 4 Коденцев, С. Н Технологические возможности комбинированной обработки в обеспечении расходных характеристик деталей с мелкогабаритными проточными каналами [Текст] / С.Н. Коденцев, Г.А. Сухочев, А.О. Родионов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №7. – С. 45-48.

5 Сухочев, Г.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей с щелевыми каналами [Текст] / Г.А. Сухочев, А.О. Родионов, Е.Г. Смоляникова, С.Н. Коденцев // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – №4 (34). – С. 20-25.

6 Родионов, А.О. Эксплуатационно-ориентированная комбинированная обработка щелевых каналов [Текст] / А.О. Родионов, Г.А. Сухочев, Е.Г. Смоляникова, С.Н. Коденцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. №6. – С. 45-48.

7 Сокольников, В.Н. Исследование поверхностного слоя детали после комбинированного механоэлектрохимического процесса упрочнения [Текст] / В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев, С.В. Усов, И.П. Точилин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. – Том 15. – № 12 (180). – С. 555–560

8 Сухочев, Г.А. Упрочняющая и отделочная обработка технологических труднодоступных проточных каналов деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – №7(109). – С. 20-23.

9 Boldyrev A. Achievement of Required Surface Roughnesses in Complex Profile Channels by Dynamic Combined Processing [Электронный ресурс] / A. Boldyrev, G. Sukhochev, A. A. Boldyrev, V. Sokolnikov // International Scientific-Technical Conference «Dynamics of Technical Systems» (DTS) (Rostov-na-Donu, Russia, September 12-14, 2018): MATEC Web of Conferences 226, 01021 (2018) DTS-2018; <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822601021>.

10 Сухочев, Г.А. Доводка узких каналов комбинированными методами [Текст] / Г.А. Сухочев, Д.В. Силаев, В.Н. Сокольников // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГТУ. – Вып. 9. – 2015. – С. 4-14.

11 Патент №2634398 Российская Федерация, МПК6 В23Н 5/06, 5/10. Способ комбинированной обработки узких каналов деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, А.О. Родионов, С.Н. Коденцев, Д.В. Силаев, В.Н. Сокольников; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. № 2015101018, заявл. 12.01.2015; опубл. 26.10.2017. – Бюл. № 30. – 6 с.

12 Некрылов А.М. Упрочняющая и отделочная обработка технологически труднодоступных проточных каналов деталей / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. – № 7 (109). – С. 20-23.

13 Сухочев Г.А. Упрочняющая и отделочная обработка технологических труднодоступных проточных каналов деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – №7(109). – С. 20-23.

14 Influence of Contact Efforts on the Surface Quality of Difficult Profile under Finishing Hardening Machining / Gennady A. Sukhochev, Vasilij N. Sokolnikov, Andrey M. Nekrylov // "Solid State Phenomena", vol. 316, 2021. Режим доступа: <https://www.scientific.net/SSP.316.738>.

15 Патент №2709072 Российская Федерация, В23Н 5/06, В24В 39/00. Способ упрочняющей обработки локальных участков поверхностей деталей роторов [Текст] / Г.А. Сухочев, В.Н. Сокольников, А.М. Некрылов; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2019123080, ЗАЯВЛ. 17.07.2019; ОПУБЛ. 13.12.2019, – Бюл. №35. – 8 с.

References

1 Sukhochev, G. A. Quality management of products operating in extreme conditions under non-stationary influences / G. A. Sukhochev. – М.: Mashinostroenie, 2004. – 287 p.

2 Russian Federation patent for invention No. RU 2162394 C2, МПК6 V23N 7/02, 7/08. Method of erosion-on-thermal treatment / V.P. Smolentsev, G.A. Sukhochev, S.N. Kodentsev, M.A. Uvarov. 2012.

3 Sukhochev, G.A. Performance of loaded parts after combined processing under extreme operating conditions [Text] / G.A. Sukhochev, S.N. Kodentsev, A.M. Nekrylov, N.D. Savenkov // Modern production technologies in mechanical engineering: collection. scientific tr., Voronezh: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education VSTU. – Vol. 11, 2017. – pp. 3-20.

4 Kodentsev, S. N. Technological capabilities of combined processing in ensuring the consumption characteristics of parts with small-sized flow channels [Text] / S.N. Kodentsev, G.A. Sukhochev, A.O. Rodionov // Hardening technologies and coatings. – 2013. – No. 7. – pp. 45-48.

5 Sukhochev, G.A. Technological support of operational characteristics of parts with slotted channels [Text] / G.A. Sukhochev, A.O. Rodionov, E.G. Smolyannikova, S.N. Kodentsev // Science-intensive technologies in mechanical engineering. – 2014. – No. 4(34). – P. 20-25.

6 Rodionov, A.O. Operation-oriented combined treatment of slot-left channels [Text] / A.O. Rodionov, G.A. Sukhochev, E.G. Smolyannikova, S.N. Kodentsev // *Hardening technologies and coatings*. – 2014. No. 6. – pp. 45-48.

7 Sokolnikov, V.N. Study of the surface layer of a part after a combined mechanochemical hardening process [Text] / V.N. Sokolnikov, G.A. Sukhochev, S.V. Usov, I.P. Tochilin // *Hardening technologies and coatings*. 2019. – Volume 15. – No. 12 (180). – pp. 555–560

8 Sukhochev, G.A. Strengthening and finishing processing of technological hard-to-reach flow channels of parts [Text] / G.A. Sukhochev, A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, V.N. Sokolnikov // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. – 2020. – No. 7(109). – P. 20-23.

9 Boldyrev A. Achievement of Required Surface Roughnesses in Complex Profile Channels by Dynamic Combined Processing [Electronic resource] / A. Boldyrev, G. Sukhochev, A. A. Boldyrev, V. Sokolnikov // *International Scientific-Technical Conference “Dynamics of Technical Systems” (DTS) (Rostov-na-Donu, Russia, September 12-14, 2018): MATEC Web of Conferences 226, 01021 (2018) DTS-2018*; <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822601021>.

10 Sukhochev, G.A. Finishing of narrow channels using combined methods [Text] / G.A. Sukhochev, D.V. Silaev, V.N. Sokolnikov // *Modern production technologies in mechanical engineering: collection. scientific tr.*, Voronezh: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education VSTU. – Vol. 9. – 2015. – P. 4-14.

11 Patent No. 2634398 Russian Federation, MPK6 V23N 5/06, 5/10. Method of combined processing of narrow channels of parts [Text] / G.A. Sukhochev, A.O. Rodionov, S.N. Kodentsev, D.V. Silaev, V.N. Sokolnikov; applicant and patent holder Voronezh State Technical University. No. 2015101018, application. 01/12/2015; publ. 10/26/2017. - Bull. No. 30. – 6 p.m.

12 Nekrylov A.M. Strengthening and finishing treatment of technologically difficult-to-reach flow channels of parts/A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, V.N. Sokolnikov, G.A. Sukhochev // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. 2020. – No. 7 (109). – P. 20-23.

13 Sukhochev G.A. Strengthening and finishing treatment of technological hard-to-reach flow channels of parts [Text] / G.A. Sukhochev, A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, V.N. Sokolnikov // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. – 2020. – No. 7(109). – P. 20-23.

14 Influence of Contact Efforts on the Surface Quality of Difficult Profile under Finishing Hardening Machining / Gennady A. Sukhochev, Vasilij N. Sokolnikov, Andrey M. Nekrylov // *"Solid State Phenomena"*, vol. 316, 2021. Available at: <https://www.scientific.net/SSP.316.738>.

15 Patent No. 2709072 Russian Federation, B23H 5/06, B24B 39/00. Method of hardening treatment of local areas of rotor parts surfaces [Text] / G.A. Sukhochev, V.N. Sokolnikov, A.M. Nekrylov; applicant and patent holder Voronezh State Technical University. - No. 2019123080, APPLICATION. 07/17/2019; PUBLISHED 12/13/2019, – Bulletin. No. 35. – 8 C.

© Коденцев С. Н., Подгорнов С. Н., Сухочев Г. А., 2024

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-10-19



УДК 621.77.04

UDC 621.77.04

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

✉¹ **Норман Анна Валерьевна**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: annya_p@mail.ru

Кириллов Олег Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Куц Вадим Васильевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, г. Курск.

Аннотация. Обоснована актуальность применения аддитивных технологий в условиях современного производства. Предложен алгоритм выполнения топологической оптимизации конструкции изделия. Рассмотрены различные направления применения данных технологий и показана эффективность их внедрения на производстве.

Ключевые слова: АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, 3D-ПЕЧАТЬ, ГЕНЕРАТИВНЫЙ ДИЗАЙН, ОПТИМИЗАЦИЯ, ФОРМА, МАССА, СТРУКТУРЫ.

¹ Автор для ведения переписки

FEATURES OF THE APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE MANUFACTURE OF HIGH-TECH PRODUCTS AT MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

✉¹ **Norman Anna Valeryevna**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of Mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: annya_p@mail.ru

Kirillov Oleg Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, professor of the department of Mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh.

Kuts Vadim Vasilyevich, doctor of technical sciences, professor, professor of the department of Mechanical engineering technologies and equipment, South-Western state university, Kursk.

Annotation. The relevance of the application of additive technologies in modern production conditions is substantiated. An algorithm for performing topological optimization of the product design is proposed. Various directions of application of these technologies are considered and the effectiveness of their implementation in production is shown.

Keywords: ADDITIVE TECHNOLOGIES, 3D PRINTING, GENERATIVE DESIGN, OPTIMIZATION, SHAPE, MASS, STRUCTURES.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В условиях значительного развития современной промышленности [1], основанного на формировании и становлении новой модели производственно-технологической системы, наблюдается существенное смещение акцента с традиционного подхода к процессу формообразования в сторону нетрадиционных, в частности, аддитивных технологий.

Аддитивные технологии, также известные как 3D-печать, представляют собой процесс создания трехмерных объектов путем последовательного нанесения слоев материала на основе цифровой модели. В отличие от традиционных, вычитающих технологий формообразования, аддитивные технологии, путем добавления материала слой за слоем вместо удаления или обработки материала, позволяют создавать сложные геометрические формы без необходимости использования сложных инструментов или процессов. При этом создаваемый объект отличается высокой степенью точности и детализации [2].

Такой переход особенно актуален для авиационной, аэрокосмической промышленности, оборонно-промышленного комплекса, автомобильного машиностроения и других наукоемких отраслей [3].

2 Материалы и методы

Активное использование аддитивных технологий позволит повысить качество деталей, особенно сверхсложных элементов, например, точных элементов классических автомобилей или шасси самолетов, сертификационные требования к которым очень высоки [4].

Кром того, результаты расчетов рентабельности внедрения аддитивных технологий на ОАО «КБХА» по ряду изделий показали следующие результаты, представленные в табл. 1. Также наблюдается значительное повышение эффективности производства за счет сокращения времени изготовления изделий и снижения себестоимости производства [4, 5].

К основным преимуществам аддитивных технологий [6-10], в отличие от традиционных, можно отнести:

1) Скорость. 3D-печать позволяет сократить время изготовления сложной детали, выполняемой в течение месяца, до нескольких часов, при этом зачастую исключают последующую дополнительную механическую обработку. А создание прототипов изделий позволяет сократить время и затраты на разработку и тестирование новых моделей, что позволяет новому продукту быстро освоить рынок и повысить конкурентоспособность [11-13].

Таблица 1 – Показатели внедрения аддитивных технологий

Показатели	Значение
Уменьшение цикла изготовления изделия	в 5 раз
Сокращение сроков подготовки производства	в 2-5 раз
Снижение стоимости производства	в 5- 6 раз
Сокращение времени изготовления изделия	на 80-90 %
Повышение коэффициента использования материала	70-90 %

2) Безотходность. Аддитивные методы позволяют повторно использовать отработанный материал и материал, полученный в результате переработки деталей, попавших в брак.

3) Индивидуальность. Аддитивные технологии являются ключевым инструментом, который позволяет реализовывать эксклюзивные, индивидуальные проектные решения, адаптированные под конкретные потребности потребителя. Особенно важно и актуально это для машиностроения, при производстве наукоемких изделий с уникальными параметрами [14].

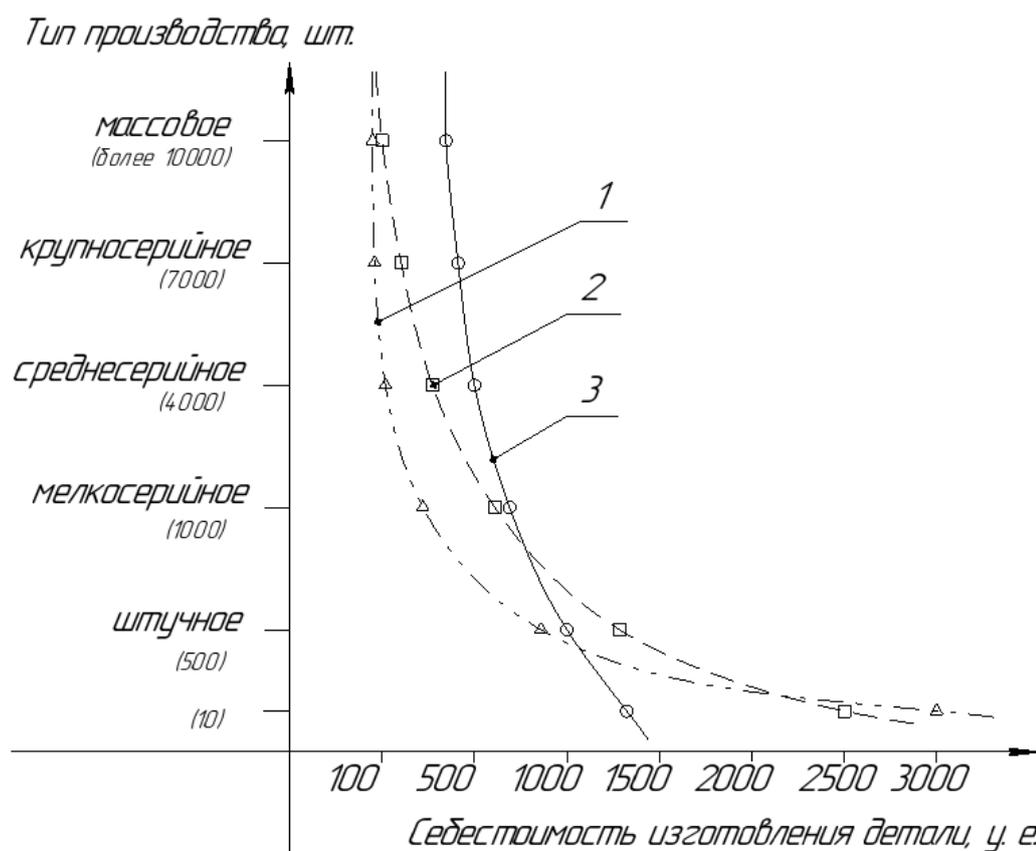
4) Качество соединений. Рассматриваемая технология обеспечивает возможность получения изделия с уникальными свойствами, без сварных соединений, швов и стыков.

5) Оптимизация дизайна. Позволяет оптимизировать форму и структуру изделий, улучшая их функциональность и эффективность. Такой подход позволяет инженерам создавать сложные и точные изделия с высокой степенью детализации, снижать их вес и материалоемкость, а также улучшить механические свойства.

6) Повышение качества готовых изделий. Детали, полученные на 3D-принтере, благодаря послойному построению, обладают повышенными механическими свойствами (плотность, остаточное напряжение и др.), значительно превосходящими свойства литых изделий, подверженных механической обработке [11, 12].

7) Адаптивность и мобильность. Поскольку аддитивные технологии базируются на электронных моделях, полученных с помощью САПР, то такая информация легко изменяется - адаптируется под различные производственные условия, а время ее передачи, в процессе обработки, практически сводится к нулю [15].

8) Низкая себестоимость. Аддитивные технологии предполагают высокий коэффициент использования материала, что существенно снижает не только потери сырья, но и затраты, связанные с последующей механической обработкой. Кроме того, необходимо отметить низкую себестоимость изделий, в том числе наукоемких, со сложной геометрической формой, выпускаемых небольшими партиями (рис. 1). Снижение затрат на изготовление, в данном случае, обусловлено отсутствием дорогостоящей оснастки, необходимой для формообразования заготовки, а также отсутствием необходимости выполнения сложной механической обработки лезвийным инструментом.



1 – обработка давлением; 2 – метод литья; 3 – аддитивная технология

Рисунок 1 – График влияния типа производства на себестоимость изготовления детали при различных методах

К недостаткам аддитивных технологий в машиностроении можно отнести:

1) Ограничения по выбору материалов. Не все материалы отвечают требованиям совместимости с процессом печати.

2) Ограничения по габаритно-массовым характеристикам. Аддитивные установки, зачастую имеют ограниченную область печати, что вызывает некоторые трудности при производстве крупногабаритных металлических изделий.

3) Стоимость оборудования и расходных материалов. Необходимость использования специализированного оборудования и материалов, его приобретение и обслуживание может предполагать необходимость вливания значительных дополнительных инвестиций.

Между тем, в зависимости от конечного результата, данные технологии находят широкое применение в различных направлениях:

- изготовление деталей-шаблонов, используемых для контроля конечного изделия;
- изготовление пресс-форм для производства изделий методом литья;
- изготовление конечного продукта – прямое цифровое производство;
- производство прототипов, позволяющих быстро и точно изготовить модели деталей или изделий для проверки их функциональности и эргономики;
- ремонт и восстановление деталей [16];
- использование аддитивных технологий в комплексе с генеративным дизайном.

Новым актуальным направлением использования аддитивных технологий является генеративный дизайн, который в последнее время приобретает все большую популярность среди конструкторов, инженеров и дизайнеров. Основная идея генеративного дизайна заключается в готовом оптимизированном решении, которое формирует программа на основе требуемых параметров и ограничений, заданных пользователем.

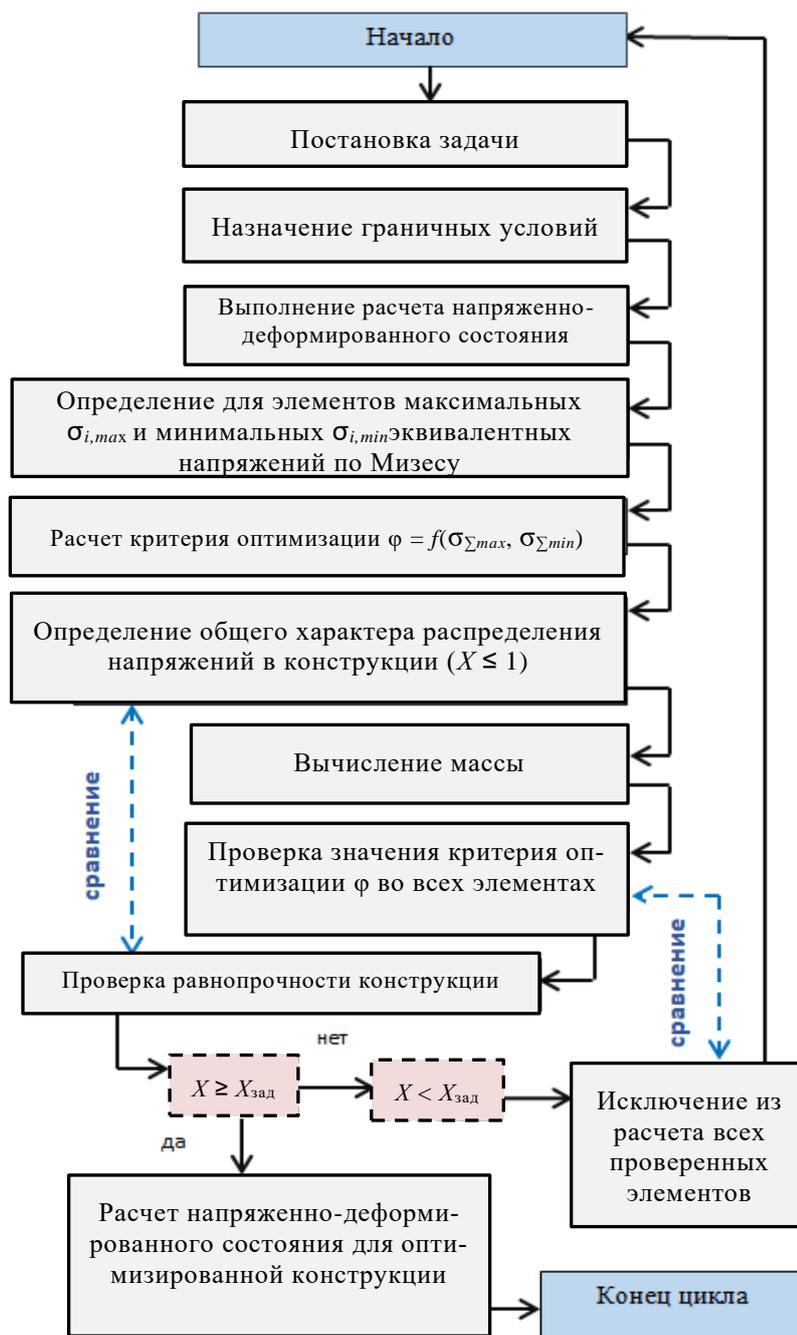
3 Результаты исследований

Различают несколько направлений генеративного дизайна.

1. Топологическая оптимизация. Она заключается в проектировании облегченной детали, конфигурация которой получена как результат вычитания из первоначального объема детали материала, воспринимающего незначительные нагрузки, при условии сохранения заданной прочности и жесткости [17, 18]. Алгоритм выполнения топологической оптимизации представлен на рис. 2.

После оптимизации деталь приобретает сложную пространственную форму, существенно снижающую технологичность конструкции изделия, что существенно ограничивает возможность использования типовых технологических процессов (рис. 3).

Эта проблема решается с использованием альтернативы применения традиционных технологий изготовления изделий из литых заготовок с последующей механической обработкой, которой являются аддитивные технологии. Примером является широко распространенный способ селективного лазерного сплавления, у которого практически отсутствуют ограничения, связанные с конфигурацией.



$\sigma_{i,max}, \sigma_{i,min}$ – максимальное и минимальное эквивалентное напряжение по Мизесу i -го элемента;
 $\sigma_{\Sigma max}, \sigma_{\Sigma min}$ – максимальное и минимальное значение интенсивности напряжений по Мизесу, найденные среди всего набора значений интенсивностей, вычисленных в центральных точках конечных элементов; $X = \sigma_{\Sigma min} / \sigma_{\Sigma max}$; $X_{зад}$ – заданное граничное значение X , превышение которого составляет зону равнопрочности

Рисунок 2 – Алгоритм выполнения топологической оптимизации конструкции изделия



Рисунок 3 – Топологическая оптимизация [19]

2. Синтез формы. В отличие от топологической оптимизации, где конструкция формы изделия оптимизируется на основе заданных формы и параметров, при синтезе происходит формирование новой конструкции с помощью искусственного интеллекта на основе более общих требований [17] (рис. 4).



Рисунок 4 – Синтез формы [17]

3. Оптимизация поверхности и структуры. Метод позволяет не только оптимизировать поверхность за счет вычитания материала, но и вносить изменения в саму структуру материала, заполняя элементы изделия оптимизируемой кристаллической решеткой (рис. 5).



Рисунок 5 – Оптимизация поверхности и структуры [20]

4. Создание трабекулярных структур, т. е. создание элементов, выполняющих механические функции и используемых как инструмент, позволяющий распределять и масштабировать мельчайшие поры по твердым материалам, например, создавая структуру шероховатой поверхности (рис. 6) [21].

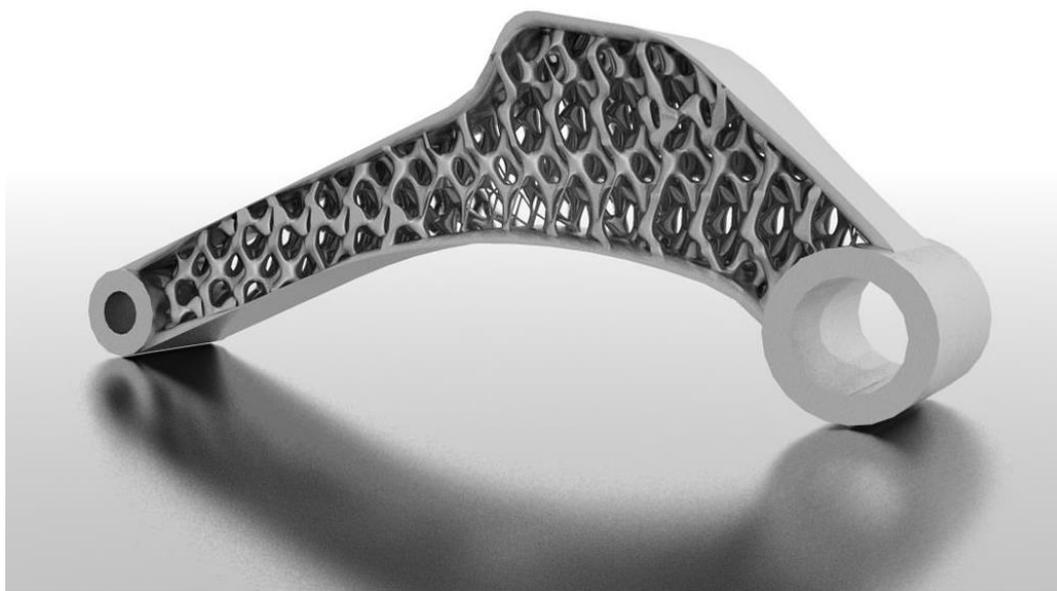


Рисунок 6 – Создание трабекулярных структур [20]

4 Обсуждение и заключение

Таким образом, метод генеративного дизайна, основанный на минимизации площади поверхности, массы, объема опоры, перегрева или времени печати, является важным направлением проектирования для аддитивного производства, позволяющим произвести комплексную оптимизацию конструкции изделия.

Внедрение аддитивных технологий совместно с генеративным дизайном способствует синергетическому эффекту, заключающемуся, во-первых, в значительном сокращении сроков

проектирования и изготовления изделия, времени и затрат связанных с разработкой новых продуктов, и, во-вторых, в одновременном с этим более эффективным использовании ресурсов, ускорению рабочих процессов примерно в 1,2 - 1,3 раза, снижению отходов. Такие возможности обеспечивают снижение веса изделий при заметном улучшении требуемых параметров их конструкций, что особенно важно для машиностроительной и, прежде всего, аэрокосмической промышленности.

Список литературы

- 1 Кириллов, О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом. Монография. Воронеж: ВГТУ, 2010. – 254 с.
- 2 Глеб Туричин: «Лазерные технологии — один из драйверов Индустрии 4.0». - <https://regnum.ru/article/3602951> [Дата обращения: 25 июня 2024.].
- 3 Шендрикова, О.О. Новые реальности применения систем автоматизированного проектирования для изготовления перспективных изделий / О.О. Шендрикова, С.С. Юхневич, А.А. Витковская, А.К. Севостьянов // «Качество в производственных и социально-экономических системах» сб. науч. тр. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. 2020. Курск. ЮЗГУ. – 2020. – С. 447-45.
- 4 Левин, Д. Ю. Анализ данных коммуникации с инженерами промышленных предприятий как средство обеспечения качества внедрения инноваций в области проектирования / Д.Ю. Левин, А.А. Болдырев, А.В. Норман // Проблемы социальных и гуманитарных наук. – Воронеж: ВГТУ, 2023. – С. 151-156.
- 5 Шендрикова, О. О. Система менеджмента качества высокотехнологичных и наукоемких промышленных предприятий/ О. О. Шендрикова, А. В. Красникова, И. И. Черепанцева, А. К. Севостьянов // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Сб. науч. ст. Всероссийской науч.-техн. конф. Воронеж, 2023. С. 412-422.
- 6 Гибсон, Я. Технология аддитивные производства / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер // Пер. с англ. Под ред. И.В. Шишковского – М.: Техносфера, 2016. – 656 с.
- 7 Моргунов, Ю. А. Аддитивные технологии для авиакосмической техники / Ю.А. Моргунов, Б.П. Саушкин // Аддитивные технологии. 2016. – №1. – С. 30-38.
- 8 Гришина, Е. Н. Применение аддитивных технологий в авиационно-космической отрасли / Е.Н. Гришина, О.Н. Кириллов// Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ. – Вып. 10. 2016. – С. 139-145.
- 9 Витковская, А. А. Система фотореалистичного рендеринга в среде "КОМПАС-3D" / А. А. Витковская, О. О. Шендрикова, Е. В. Котуков // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. тр. 8-й междунар. науч.-техн. конф., Курск. – 2020. – С. 93-96.
- 10 Сухочев, Г. А. Технология машиностроения. Аддитивные технологии в подготовке производства наукоемких изделий / Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев, Е. Г. Смольяникова – Воронеж: Воронежский гос. технический ун-т, 2013. – 222 с.
- 11 Валетов, В. А. Новые технологии в приборостроении: учеб. пособие/ В.А. Валетов, С.В. Бобцова. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. – 120 с.
- 12 Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В.М. Довбыш // Пособие для инженеров. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. - 220 с.
- 13 Дьяченко, В. А. Материалы и процессы аддитивных технологий (быстрое прототипирование) / В. А. Дьяченко, И.Б. Челпанов, С.О. Никифоров, Д.Д. Хозонхонова. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2015. – 198 с.
- 14 Кузовкин, А. В. Методика проектирования комбинированного электроинструмента с целью изготовления по аддитивной технологии / А. В. Кузовкин, А. П. Суворов, А. В. Норман, В.И. Котуков // Современные технологии производства в машиностроении: межвуз. сб. науч. тр. / редкол. В. Г. Грицюк [и др.]; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», Вып. 14., 2021. – С. 129 - 138.
- 15 Норман, А. В. Применение систем автоматизированного проектирования в машиностроении / А. В. Норман, В.С. Перелыгин, Н.А. Шишкин, В.Г. Грицюк // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2020. – Вып. 13. – С. 106-111.

16 Севостьянов, А. К. Технология нанесения защитных покрытий на изделия ракетно-космической техники / А.К. Севостьянов, Ю.С. Гончарова, С.С. Юхневич, О.Н. Кириллов // «Качество в производственных и социально-экономических системах» сб. науч. тр. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. 17 апреля 2020. Курск. – ЮЗГУ. – 2020. – С. 349-353.

17 Генеративный дизайн в 3D-печати. <https://globatek.ru/blog/cases/generat-design-v-3d-pechat> [Дата обращения: 25 июня 2024].

18 Брюхова, К.С. Алгоритм топологической оптимизации на основе метода ESO / К.С. Брюхова, П.В. Максимов // Международный научно-исследовательский журнал. - №9 (51). - Ч. 2. – 2016. – С. 16-18.

19 <https://mtorbit.ru/hobbi-uslugi/promyshlennyy-razdel/3d-pechat/detali-sohraneniya-sostoyaniya-sostava-veschestva-termodinamicheskoy-sistemy/kronshteyny-optimizaciya-ispolzovaniya-materiala-uluchshenie-topologii-razrabotka-3d-pechat-perm/>

20 Интеллект, изменивший нашу жизнь: генеративный дизайн / <https://www.techinsider.ru/design/468212-intellekt-izmenivshiy-nashu-zhizn-generativnyy-dizayn/?ysclid=lxvsqwm5w5250985995> [Дата обращения: 25 июня 2024.].

21 <https://www.pinterest.ru/pin/791789178218617001/> [Дата обращения: 25 июня 2024.].

References

1 Kirillov, O.N. Technology of combined processing with a non-profiled electrode. Monograph. Voronezh: VSTU, 2010. – 254 p.

2 2 Gleb Turichin: “Laser technologies are one of the drivers of Industry 4.0.” -- <https://regnum.ru/article/3602951> [Date of access: June 25, 2024].

3 Shendrikova, O.O. New realities of using computer-aided design systems for the manufacture of promising products / O.O. Shendrikova, S.S. Yuhnevich, A.A. Vitkovskaya, A.K. Sevostyanov // “Quality in production and socio-economic systems” collection. scientific tr. 8th Int. scientific-technical conf. 2020. Kursk. SWSU. – 2020. – P. 447-45.

4 Levin, D. Yu. Analysis of communication data with engineers of industrial enterprises as a means of ensuring the quality of implementation of innovations in the field of design / D. Yu. Levin, A.A. Boldyrev, A.V. Norman // Problems of social and human sciences. – Voronezh: VSTU, 2023. – P. 151-156.

5 Shendrikova, O. O. Quality management system for high-tech and knowledge-intensive industrial enterprises / O. O. Shendrikova, A. V. Krasnikova, I. I. Cherepantseva, A. K. Sevostyanov // Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering. Sat. scientific Art. All-Russian Scientific and Technical. conf. Voronezh, 2023. pp. 412-422.

6 Gibson, J. Additive manufacturing technology / J. Gibson, D. Rosen, B. Stacker // Transl. from English Ed. I.V. Shishkovsky - M.: Tekhnosphere, 2016. - 656 p.

7 Morgunov, Yu. A. Additive technologies for aerospace technology / Yu.A. Morgunov, B.P. Saushkin // Additive technologies. 2016. – No. 1. – P. 30-38.

8 Grishina, E. N. Application of additive technologies in the aerospace industry / E. N. Grishina, O.N. Kirillov // Modern production technologies in mechanical engineering: collection. scientific tr. Voronezh: VSTU. – Vol. 10. 2016. – pp. 139-145.

9 Vitkovskaya, A. A. Photorealistic rendering system in the environment "KOMPAS-3D" / A. A. Vitkovskaya, O. O. Shendrikova, E. V. Kotukov // Quality in production and socio-economic systems: collection. scientific tr. 8th Int. scientific-technical conf., Kursk. – 2020. – pp. 93-96.

10 Sukhochev, G. A. Mechanical engineering technology. Additive technologies in the preparation of production of high-tech products / G. A. Sukhochev, S. N. Kodentsev, E. G. Smolyannikova - Voronezh: Voronezh State University. Technical University, 2013. – 222 p.

11 Valetov, V. A. New technologies in instrument making: textbook. allowance / V.A. Valetov, S.V. Bobtsova. – St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2004. – 120 p.

12 Zlenko, M. A. Additive technologies in mechanical engineering / M. A. Zlenko, M. V. Nagaitsev, V. M. Dovbysh // Manual for engineers. – M.: State Scientific Center of the Russian Federation Federal State Unitary Enterprise “NAMI”, 2015. - 220 p.

13 Dyachenko, V. A. Materials and processes of additive technologies (rapid prototyping) / V. A. Dyachenko, I. B. Chelpanov, S.O. Nikiforov, D.D. Khozonkhonova. – Ulan-Ude: Publishing house BSC SB RAS, 2015. – 198 p.

14 Kuzovkin, A.V. Methodology for designing a combined electric tool for the purpose of manufacturing using additive technology / A.V. Kuzovkin, A.P. Suvorov, A.V. Norman, V.I. Kotukov // Modern production technologies in mechanical engineering: interuniversity. Sat. scientific tr. / edit. V. G. Gritsyuk [and others]; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University". – Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", Vol. 14., 2021. – pp. 129 - 138.

15 Norman, A.V. Application of computer-aided design systems in mechanical engineering / A.V. Norman, V.S. Perelygin, N.A. Shishkin, V.G. Gritsyuk // Modern production technologies in mechanical engineering: collection. scientific tr. – Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", 2020. – Vol. 13. – pp. 106-111.

16 Sevostyanov, A.K. Technology of applying protective coatings to rocket and space technology products / A.K. Sevostyanov, Yu.S. Goncharova, S.S. Yukhnevich, O.N. Kirillov // "Quality in production and socio-economic systems" collection. scientific tr. 8th Int. scientific-technical conf. April 17, 2020. Kursk. - SWGU. – 2020. – P. 349-353.

17 Generative design in 3D printing. <https://globatek.ru/blog/cases/generat-design-v-3d-pechat> [Accessed: June 25, 2024].

18 Bryukhova, K.S. Topological optimization algorithm based on the ESO method / K.S. Brikhova, P.V. Maksimov // International scientific research journal. - No. 9 (51). - Part 2. – 2016. – pp. 16-18.

19 <https://mtorbit.ru/hobbi-uslugi/promyshlenny-razdel/3d-pechat/detali-sohraneniya-sostoyaniya-sostava-veschestva-termodinamicheskoy-sistemy/kronshteyny-optimizaciya-ispolzovaniya-materiala-uluchshenie-topologii-razrabotka-3d-pechat-perm/>

20 Intelligence that changed our lives: generative design / <https://www.techinsider.ru/design/468212-intellekt-izmenivshiy-nashu-zhizn-generativnyy-dizayn/?ysclid=lxvsqwm5w5250985995> [Accessed date: June 25, 2024].

21 <https://www.pinterest.ru/pin/791789178218617001/> [Date of access: June 25, 2024].

© Норман А.В., Кириллов О.Н., Куц В.В., 2024

DOI: [10.34220/2311-8873-2024-20-31](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2024-20-31)



УДК 621.9

UDC 621.8

2.5.6 – технология машиностроения

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ
ДЕТАЛЕЙ ЭКСЦЕНТРИКОВЫМ
ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ
УПРОЧНИТЕЛЕМ**

**PROCESS DESIGN OF PARTS
TREATMENT WITH ECCENTRIC
OSCILLATING REINFORCING AGENT**

Тамаркин Михаил Аркадьевич,
д.т.н., заведующий кафедрой «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: tehn_rostov@mail.ru

Tamarkin Mikhail Arkadievich,
doctor of technical sciences, head of the department of Mechanical engineering technology, Don state technical university, Rostov-on-Don, e-mail: tehn_rostov@mail.ru

✉¹ **Тищенко Элина Эдуардовна,**
к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: lina_tishenko@mail.ru

✉¹ **Tishchenko Elina Eduardovna,**
candidate of technical sciences, associate professor of the department of Mechanical engineering technology, Don state technical university, Rostov-on-Don, e-mail: lina_tishenko@mail.ru

Хашаш Омар С.А.,
аспирант кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: omar-hashash@mail.ru

Hashash Omar S.A.,
postgraduate student of the department of Mechanical engineering technology, Don state technical university, Rostov-on-Don, e-mail: omar-hashash@mail.ru

Тищенко Роман Геннадьевич,
магистрант кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: tishenkoroma@icloud.com

Tishchenko Roman Gennadievich,
master's student of the department of Mechanical engineering Technology, Don state technical university, Rostov-on-Don, e-mail: tishenkoroma@icloud.com

Аннотация. В статье представлены результаты исследования процесса обработки деталей эксцентриковым осциллирующим упрочнителем. Рассмотрены область применения и конструктивные особенности устройства. Приведены результаты теоретических исследований процесса обработки. Определены зависимости для расчета скорости удара индентора и кинетической энергии инструментальной головки с индентором при ударном взаимодействии. Исследованы параметры поверхностного слоя, оказывающие наибольшее влияние на повышение эксплуатационных

Annotation. The article presents the results of the study of the process of processing parts with eccentric oscillating strengthening. The scope of application and design features of the device are considered. The results of theoretical studies of the treatment process are given. Dependences are defined for calculation of indenter impact speed and kinetic energy of tool head with indenter at impact interaction. The parameters of the surface layer, which have the greatest impact on improving the operational properties of machine parts (depth of the hardened layer, degree of deformation, surface roughness), were studied. The developed

свойств деталей машин (глубина упрочненного слоя, степень деформации, шероховатость поверхности). Разработанные теоретические зависимости подтверждаются результатами экспериментальных исследований процесса обработки. Рассчитано время обработки для поверхностей различного типа, которые подвергались обработке. Указанные зависимости положены в основу методики инженерных расчетов высокоэффективных технологических процессов поверхностного пластического деформирования осциллирующим эксцентриковым инструментом. Результаты исследований использованы для дополнения расчетных модулей системы автоматизированного проектирования методов обработки динамическими методами поверхностного пластического деформирования, используемой на современных машиностроительных предприятиях в условиях цифрового производства.

Ключевые слова: ЭКЦЕНТРИКОВЫЙ ОСЦИЛЛИРУЮЩИЙ УПРОЧНИТЕЛЬ, КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, ВРЕМЯ ОБРАБОТКИ.

theoretical dependencies are confirmed by the results of experimental studies of the processing process. The treatment time is calculated for different types of surfaces that have been treated. Said dependencies form the basis of engineering calculations of highly efficient processes of surface plastic deformation by oscillating eccentric tools. The research results were used to supplement the computational modules of the computer-aided design system of processing methods for dynamic methods of surface plastic deformation used at modern machine-building enterprises in digital production.

Keywords: ECCENTRIC OSCILLATING HARDENER, OVERLAY QUALITY, MACHINING TIME.

¹ Автор для ведения переписки

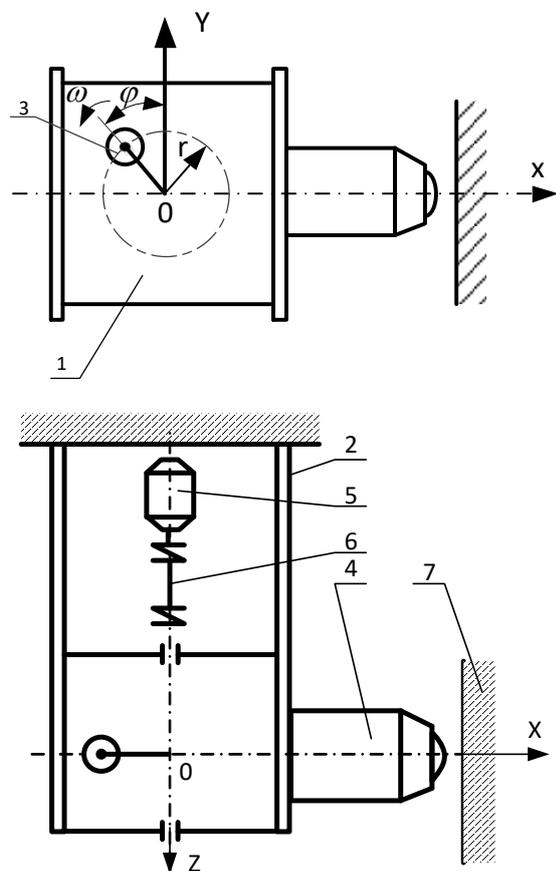
1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Среди многообразия современных методов финишной обработки ответственных деталей машин можно выделить особую группу финишной обработки методами поверхностного пластического деформирования (ППД), использование которых во многих случаях позволяет значительно улучшить эксплуатационные свойства обработанных деталей без увеличения их массы, а также во многих случаях исключить дорогостоящую термическую обработку [1-15]. Важную роль в повышенном внимании к этим методам обработки играют их широкие технологические возможности, простота используемого оборудования, сравнительно низкая стоимость.

Метод обработки ППД осциллирующим эксцентриковым инструментом занимает особое место среди подобных технологий, позволяющих локализовать обработку, а не выполнять её во всем объеме детали. Он позволяет выполнять высокоэффективную обработку как простых по форме поверхностей, типа плоскостей и тел вращения, так и более сложных фасонных поверхностей, поверхностей крупногабаритных деталей в местах, являющихся концентраторами напряжений, сварных швов и др. [1,2,5-8]. На рис. 1 представлена кинематическая схема эксцентрикового упрочнителя, состоящего из вибрирующей корпуса 1, подвешенного на плоских пружинах 2. Колебания вибрирующего корпуса 1, действующие нормально к обрабатываемой поверхности возбуждаются вращением эксцентриковой массы (дебаланса) 3 вокруг вертикальной оси.

Эксцентриковая масса 3 с закрепленной на ней инструментальной головкой получает вращательное движение от электродвигателя. При этом гибкий вал 6 позволяет осуществлять свободное перемещение инструментальной головки 4 в радиальном направлении. На инструментальной головке 4 установлен индентор (обычно шарик или ролик), который осуществляет

ударное взаимодействие с поверхностью обрабатываемой детали 7. При этом поверхность детали является своеобразным ограничителем перемещения индентора, а характер их взаимодействия зависит от их предварительного сближения в радиальном направлении. Влияние этого смещения в дальнейшем рассматривается в виде изменений коэффициента полезного действия технологической системы.



1 – корпус; 2 – плоская пружина; 3 – эксцентриковая масса; 4 – инструментальная головка; 5 – электродвигатель; 6 – гибкий вал; 7 – ограничитель (обрабатываемая деталь)

Рисунок 1 – Схема эксцентрикового упрочнителя

По сравнению с объемной обработкой ППД, местное упрочнение значительно снижает затраты на обработку, так как позволяет избежать применения крупногабаритного дорогостоящего оборудования, рабочих сред, не требует применения смазывающе-охлаждающих технологических жидкостей [5-8,13-14].

2 Материалы и методы

Для промышленного использования осциллирующего эксцентрикового упрочнителя необходимо провести исследования влияния конструктивных и технологических параметров процесса на параметры качества поверхностного слоя. Это позволит проектировать рациональные технологические процессы поверхностного упрочнения ответственных деталей машин.

Анализ работ ведущих ученых в области ППД [1-13] показывает необходимость определения таких параметров поверхностного слоя, как шероховатость обработанной поверхности, степень деформации, глубина упрочненного слоя, которые оказывают существенное влияние на длительность жизненного цикла обработанных деталей. Указанные параметры определяются частотой и энергией ударных взаимодействий одного или нескольких инденторов с обрабатываемой поверхностью. Существенное влияние на повышение эксплуатационных свойств обработанных деталей оказывают также физико-механические свойства обрабатываемых деталей (твердость и микротвердость, предел текучести, коэффициент несущей способности контактной поверхности, относительное сужение и т.п.).

Анализ механизма воздействия колебательной системы устройства на обрабатываемую деталь вызывает необходимость учета таких технологических параметров процесса обработки, как скорость вращения, размеры и масса эксцентрика; число инденторов на инструментальной головке; форма и размеры инденторов (радиус сферической заточки при использовании шарика и радиус скругления при использовании ролика); размер и жесткость плоских пружин; коэффициент полезного действия устройства, который зависит от величины сближения индентора с поверхностью детали.

Произведён теоретический анализ динамики эксцентрикового устройства и процессов, происходящих при обработке осциллирующим инструментом. Получены зависимости для определения скорости удара индентора V_x и кинетической энергии инструментальной головки с индентором T при ударном взаимодействии [1, 2, 5-8].

$$V_x = \frac{m_{cam} r \omega^3}{\sqrt{(c - \omega^2 m_c)^2 + \omega^2 \mu^2}}, \quad (1)$$

$$T = \frac{m_c V_x^2}{2} = \frac{m_c m_{cam}^2 r^2 \omega^6}{2[(c - \omega^2 m_c)^2 + \omega^2 \mu^2]}, \quad (2)$$

где m_{cam} – масса инструментальной головки; r – расстояние от оси вращения эксцентрика до его центра тяжести; ω – угловая скорость; c – жёсткость пружины, m_c – масса вибрирующей системы; μ – сопротивление среды.

Механизм процесса обработки динамическими методами ППД достаточно подробно представлен в работах профессора И.В. Кудрявцева [5, 15]. Учитывая произведенный им анализ для метода обработки эксцентриковым упрочнителем можно предложить следующую зависимость для определения диаметра пластического отпечатка индентора:

$$d = \sqrt[4]{\frac{D_i \cdot T \cdot \eta}{M \cdot HD}}, \quad (3)$$

При этом глубина (h) пластического отпечатка может быть определена как

$$h = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{T \cdot \eta}{M \cdot D_i \cdot HD}}, \quad (4)$$

где T – кинетическая энергия инструментальной головки (индентора), HD – динамическая твердость материала детали (отношение энергии удара сферического индентора к объему вытесненного материала при ударе). Динамическую твердость можно определить из соотношения $HD = 6,1 HB^{1,12}$, где HB – твердость материала по Бринеллю. D_i – диаметр индентора, η – коэффициент полезного действия устройства (зависит от натяга), M – число инденторов.

Как при большинстве динамических методов обработки ППД, высотные параметры шероховатости обработанной поверхности изменяются по экспоненциальной зависимости от времени обработки $Ra(t)$. Параметры установившейся шероховатости зависят от размеров единичных отпечатков инденторов и их количества на единице площади обработки, т.е. полностью определяются режимами обработки ППД и не зависят от исходной шероховатости. Следует отметить, что исходная шероховатость оказывает существенное влияние на время достижения установившейся шероховатости. С использованием методики Королева А. В. [1] и учитывая вышеуказанные особенности

процесса можно записать зависимость для определения установившейся шероховатости поверхности при обработке эксцентриковым упрочнителем в следующем виде [1, 3, 4, 9-12]:

$$Ra = 0,0075 \sqrt{\frac{T \cdot \eta}{D_i \cdot M \cdot HD}} . \quad (5)$$

На основании вышеизложенного разработаны теоретические зависимости для определения глубины упрочненного слоя и степени деформации при обработке эксцентриковым упрочнителем [1, 3, 4, 9-12]:

$$\varepsilon = 1,134 \sqrt[4]{\frac{T \cdot \eta}{D_i^3 \cdot M \cdot HD}} ; \quad (6)$$

$$h_n = \sqrt[8]{\left(\frac{T \cdot \eta}{D_i \cdot M \cdot HD}\right)^3 \cdot D_i^2} . \quad (7)$$

Для проектирования рациональных технологических процессов осциллирующим инструментом необходимо разработать методику расчета времени обработки деталей. В процессе обработки поверхностный слой детали должен быть покрыт перекрывающимися отпечатками индентора определенное число раз. Согласно рекомендациям профессора Кудрявцева И.В. [15], каждый микрообъем поверхностного слоя должен быть пластически деформирован определенное число раз. Это число зависит от физико-механических свойств поверхностного слоя обрабатываемых деталей и, как правило, находится в пределах 10-20 ударов, деформирующих локальный микрообъем обрабатываемой поверхности.

Время обработки плоской и близкой к ней поверхности детали можно определить по зависимости [1]:

$$t = \frac{A \cdot B}{S_{np} \cdot S_{non}} , \quad (8)$$

где A – длина участка, B – ширина участка, S_{np} - продольная подача (м/с), S_{non} - поперечная подача (м / дв. ход как при плоском шлифовании).

Время обработки цилиндрической поверхности можно определить по формуле:

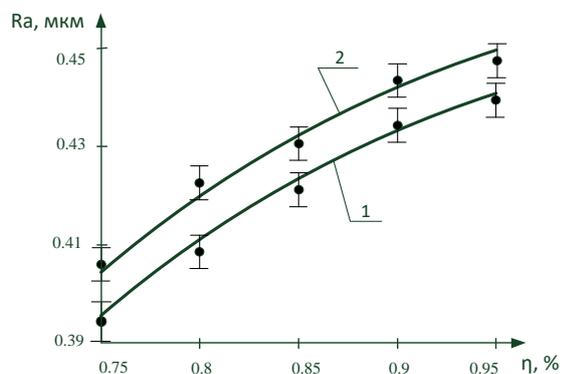
$$t = \frac{L_{dem}}{S_o} , \quad (9)$$

где L_{dem} – длина обрабатываемого участка детали, S_o – осевая минутная подача.

3 Результаты исследований

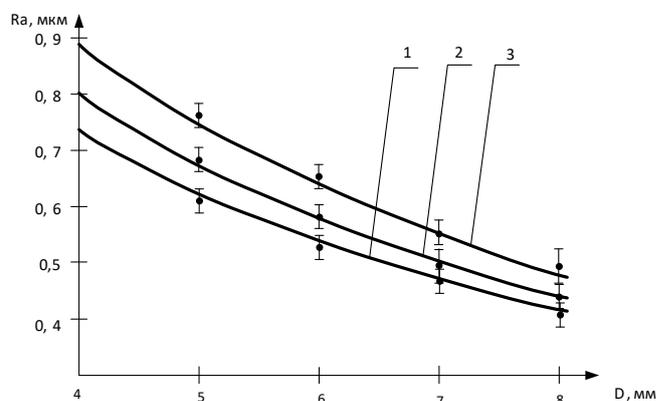
Для проверки адекватности предложенных теоретических моделей по определению шероховатости поверхности, глубины упрочненного слоя и степени деформации проведен комплекс исследований влияния основных технологических факторов на показатели качества поверхностного слоя.

Сравнение результатов, полученных при теоретических расчетах с результатами экспериментальных исследований приведены на рис. 2-7. Сплошными линиями представлены результаты теоретических расчетов. Точками показаны результаты данные экспериментов. Приведены графики экспериментов для одного шарикового индентора. Построены доверительные интервалы с доверительной вероятностью 95 %.



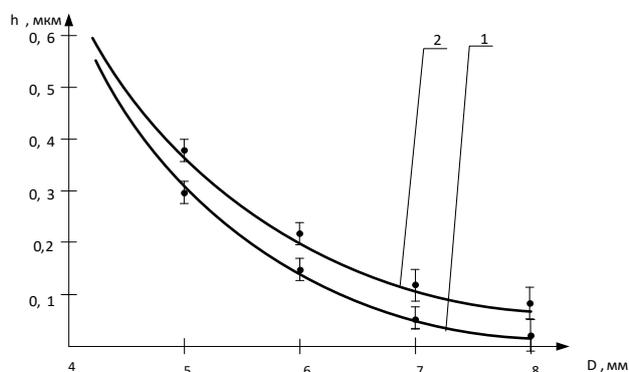
1 – материал образца ХВГ,
2 – материал образца сталь 45

Рисунок 2 – Зависимость шероховатости поверхности от коэффициента полезного действия устройства



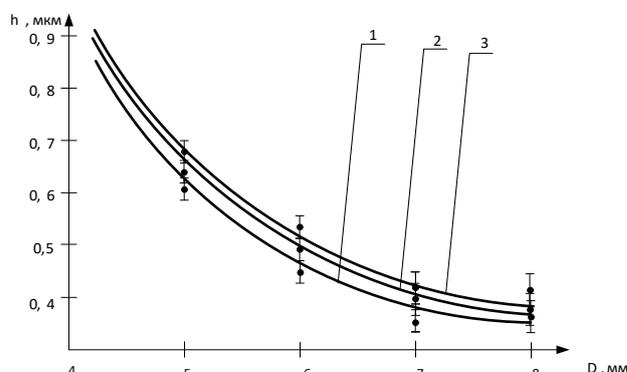
1 – материал образца Д16, 2 – материал образца АВТ, 3 – материал образца АЛ1

Рисунок 3 – Зависимость шероховатости поверхности от диаметра индентора



1 – материал образца сталь 30ХГСА,
2 – материал образца сталь 30.

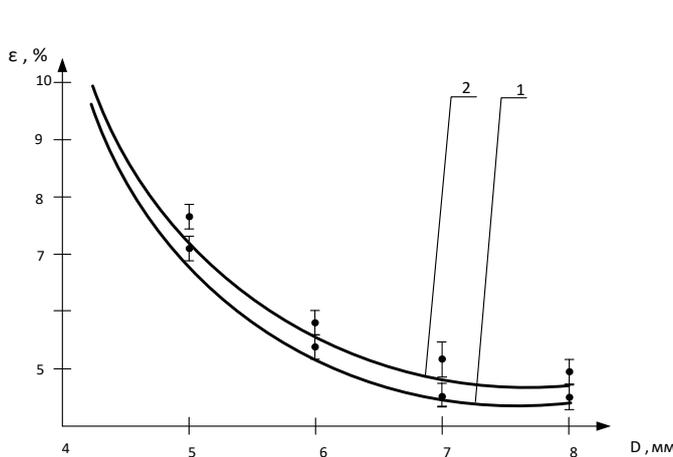
Рисунок 4 – Зависимость глубины упрочненного слоя от диаметра индентора



1 – материал образца АЛ1, 2 – материал образца АВТ, 3 – материал образца Д16

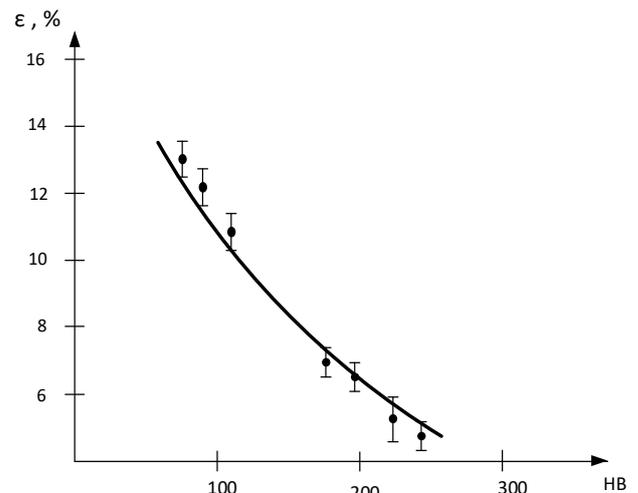
Рисунок 5 – Зависимость глубины упрочненного слоя от диаметра индентора

Разность величины параметров, рассчитанных по теоретическим зависимостям и полученных в результате экспериментальных исследований, не превышает 15-20 %. [1,3,4,9-12]. На основании результатов комплексных исследований можно сделать вывод об адекватности предложенных зависимостей.



1 – материал образца ХВГ, 2 – материал образца сталь 45

Рисунок 6 – Зависимость степени деформации от диаметра индентора



Диаметр индентора 6 мм

Рисунок 7 – Зависимость степени деформации от твердости детали по Бринеллю.

4 Обсуждение и заключение

Технологические возможности методов обработки осциллирующим эксцентриковым упрочнителем позволяют охарактеризовать его как высокоэффективный метод общего и местного упрочнения ответственных деталей машин. Разработанная теоретическая модель динамики этого метода обработки позволяет рассчитывать энергию удара индентора, оказывающую наибольшее влияние на результат обработки.

Полученные теоретические зависимости, подтвержденные результатами экспериментов, могут быть использованы для инженерных расчетов технологических процессов высокоэффективной обработки ППД деталей машин, имеющих фасонную поверхность с небольшими перепадами высот. Согласно общепринятой теории оптимизации при расчете и выборе вариантов сочетаний технологических параметров в качестве критерия оптимизации принимается себестоимость либо производительность обработки, а в качестве ограничительных функций – обеспечиваемая шероховатость поверхности и параметры упрочнения (глубина упрочненного слоя и степень деформации).

Таким образом, рассматриваемый в данной статье новый метод обработки деталей осциллирующим эксцентриковым упрочнителем может быть успешно применен в промышленных условиях.

Список литературы

- 1 Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Хашаш О.С. Формирование качества поверхностного слоя при отделочно-упрочняющей обработке деталей эксцентриковым упрочнителем. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(2):130-139. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-130-139>
- 2 Попов, М. Е. Виброударные и виброволновые методы упрочняющей и стабилизирующей обработки деталей горных машин / Хашаш О. С. А., Моргунов Д. Ю. // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. - 2017. - № 6. - С. 107-112.
- 3 Тамаркин, М.А. Оптимизация процесса упрочняющей обработки деталей осциллирующим инструментом / Тищенко Э.Э., Хашаш Омар С.А., Тищенко Р.Г. // *Вестник БГТУ*, №5, 2023 г. С. 26 -38
- 4 Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E., Melnikov A. Surface quality assurance and process reliability in the processing with a ball-rod hardener / *E3S Web Conf.* - 2020. - Vol. 175. - Article Number 05008.
- 5 Попов, М. Е. Моделирование движения и столкновений рабочих тел и обрабатываемых деталей при виброударной и виброволновой обработке / М.Е. Попов, А.М. Попов, О. Хашаш // *Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии: сб.*

тр. по материалам Междунар. симпозиума технологов-машиностроителей, Ростов-на-Дону, 14-17 сент. 2016 г. / Дон. гос. техн. ун-т. - Ростов н/Д.: ДГТУ, 2016. - С. 37-41.

6 Попов, М.Е. Микронеровности поверхностей при обработке деталей резанием и методом ППД осциллирующим инструментом / М.Е. Попов, О. Хашаш, А.С. Макаров // Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы - перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов: сб. науч. ст. II Междунар. науч.-техн. конф., Курск, 17-18 июня 2016 г. / Юго-Западный гос. ун-т. - Курск: ЮЗГУ, 2016. - Т. 2. - С. 106-110.

7 Попов, М. Е. Анализ динамики взаимодействия рабочих тел и обрабатываемых деталей при виброударной обработке / М.Е. Попов, А.М. Попов, О. Хашаш // Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы - перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов: сб. науч. ст. II Междунар. науч.-техн. конф., Курск, 17-18 июня 2016 г. / Юго-Западный гос. ун-т. - Курск: ЮЗГУ, 2016. - Т. 2. - С. 114-118.

8 Автоматизация выбора материала и технологии упрочняющей обработки деталей в САПР / М.Е. Попов, А.М. Попов, О. Хашаш, Е.В. Кореев // Проблемы и перспективы развития машиностроения: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию Липецкого государственного технического университета, Липецк, 16-17 нояб. 2016 г. – Липецк: ЛГТУ, 2016. - С. 210-215.

9 Формирование параметров упрочнения при отделочно-упрочняющей обработке деталей осциллирующим инструментом / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, Омар С.А. Хашаш, А.С. Букреева // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющих и виброволновых технологий: сб. тр. науч. семинара, посвящ. памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, д-ра техн. наук, почетного проф. ДГТУ А. П. Бабицева / Дон. гос. техн. ун-т. - Ростов н/Д.: ДГТУ, 2023. - С. 134-141.

10 Исследования процесса формирования шероховатости поверхности при отделочно-упрочняющей обработке деталей осциллирующим инструментом / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, Р.Г. Тищенко, Омар С.А. Хашаш // Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов: сб. тр. науч.-техн. конф., посвящ. памяти заслуженного деятеля науки и техники Рос. Федерации, д-ра техн. наук, проф. А. А. Рыжкина, Ростов-на-Дону, 20 янв. 2023 г. / Дон. гос. техн. ун-т. - Ростов н/Д.: ДГТУ, 2023. - С. 125-131.

11 Формирование параметров качества поверхности при отделочно-упрочняющей обработке деталей осциллирующим инструментом / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, Р.Г. Тищенко, Омар С.А. Хашаш // Машиностроительные технологические системы: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., Ростов-на-Дону, 26-30 сент. 2023 г. / Дон. гос. техн. ун-т. - Ростов н/Д.: ДГТУ, 2023. - С. 185-192.

12 Tamarkin M., Tishchenko E., Astashkin A. Quality surface forming during parts strengthening-finishing treatment with oscillatory tool/ International Scientific Conference Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East. (AFE-2023). pp 1303–1312.

13 Beskopylnyi A.N., Meskhi B.Ch., Beskopylny N., Chukarina I.M., Isaev A., Veremeenko A. Strengthening of welded joints of load-bearing structures of robotic systems with ball-rod hardening/ В сборнике: Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Proceedings of XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". Сер. "Smart Innovation, Systems and Technologies" Singapore, 2022. С. 1-12.

14 Beskopylny A., Meskhi B., Veremeenko A., Isaev A. Influence of boundary conditions on the strengthening technology of a welded joint with a ball-rod hardener /В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. "International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2020" 2020. С. 012047.

15 Кудрявцев И.В. и др. Повышение прочности и долговечности крупных деталей машин поверхностным наклепом. М. НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970, - 144с.

References

1 Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Khashash O.S. Formation of the quality of the surface layer during finishing and strengthening processing of parts with an eccentric hardener. Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2023;23(2):130-139. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-130-139>

2 Popov, M. E. Vibro-shock and vibration-wave methods for strengthening and stabilizing processing of mining machine parts / Khashash O. S. A., Morgunov D. Yu. // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). - 2017. - No. 6. - P. 107-112.

3 Tamarkin, M.A. Optimization of the process of hardening processing of parts with an oscillating tool / Tishchenko E.E., Khashash Omar S.A., Tishchenko R.G. // Bulletin of BSTU, No. 5, 2023, pp. 26 -38

4 Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E., Melnikov A. Surface quality assurance and process reliability in the processing with a ball-rod hardener / E3S Web Conf. - 2020. - Vol. 175. - Article Number 05008.

5 Popov, M.E. Modeling the movement and collisions of working bodies and workpieces during vibration-impact and vibration-wave processing / M.E. Popov, A.M. Popov, O. Khashash // Promising directions for the development of finishing methods for processing parts; Vibrowave technologies: collection of articles. tr. based on materials from the International Symposium of mechanical engineering technologists, Rostov-on-Don, September 14-17. 2016 / Don. state tech. univ. - Rostov n/d.: DSTU, 2016. - pp. 37-41.

6 Popov, M.E. Microroughness of surfaces when processing parts by cutting and the SPD method with an oscillating tool / M.E. Popov, O. Khashash, A.S. Makarov // Metal-working complexes and robotic systems - promising directions of research activities of young scientists and specialists: collection. scientific Art. II Int. scientific-technical conf., Kursk, June 17-18, 2016 / South-West State. univ. - Kursk: South-West State University, 2016. - T. 2. - P. 106-110.

7 Popov, M.E. Analysis of the dynamics of interaction between working bodies and workpieces during vibration-impact processing / M.E. Popov, A.M. Popov, O. Khashash // Metalworking complexes and robotic systems - promising areas of research activity of young scientists and specialists: collection. scientific Art. II Int. scientific-technical conf., Kursk, June 17-18, 2016 / South-West State. univ. - Kursk: South-West State University, 2016. - T. 2. - P. 114-118.

8 Automation of material selection and technology for strengthening processing of parts in CAD / M.E. Popov, A.M. Popov, O. Khashash, E.V. Koreev // Problems and prospects for the development of mechanical engineering: collection of articles. scientific tr. international scientific-technical conf., dedicated 60th anniversary of Lipetsk State Technical University, Lipetsk, November 16-17. 2016 – Lipetsk: Leningrad State Technical University, 2016. - pp. 210-215.

9 Formation of hardening parameters during finishing and hardening processing of parts with an oscillating tool / M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, Omar S.A. Khashash, A.S. Bukreeva // Promising directions for the development of finishing-hardening and vibration-wave technologies: coll. tr. scientific seminar dedicated to in memory of the Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Dr. Tech. Sciences, honorary prof. DSTU A.P. Babicheva / Don. state tech. univ. - Rostov n/d.: DSTU, 2023. - P. 134-141.

10 Research of the process of formation of surface roughness during finishing and hardening processing of parts with an oscillating tool / M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, R.G. Tishchenko, Omar S.A. Khashash // Modern trends in the development of tool systems and metalworking complexes: collection of articles. tr. scientific-technical conf., dedicated in memory of the Honored Worker of Science and Technology of Russia. Federation, Doctor of Engineering. sciences, prof. A. A. Ryzhkina, Rostov-on-Don, January 20. 2023 / Don. state tech. univ. - Rostov n/d.: DSTU, 2023. - P. 125-131.

11 Formation of surface quality parameters during finishing and hardening processing of parts with an oscillating tool / M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, R.G. Tishchenko, Omar S.A. Khashash // Machine-building technological systems: collection. tr. Intl. scientific-technical Conf., Rostov-on-Don, September 26-30. 2023 / Don. state tech. univ. - Rostov n/d.: DSTU, 2023. - P. 185-192.

12 Tamarkin M., Tishchenko E., Astashkin A. Quality surface forming during parts strength-ening-finishing treatment with oscillatory tool/ International Scientific Conference Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East. (AFE-2023). pp. 1303–1312.

13 Beskopylnyi A.N., Meskhi B.Ch., Beskopylny N., Chukarina I.M., Isaev A., Veremeenko A. Strengthening of welded joints of load-bearing structures of robotic systems with ball-rod hardening/ In the collection: Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Proceedings of XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". Ser. "Smart Innovation, Systems and Technologies" Singapore, 2022. pp. 1-12.

14 Beskopylny A., Meskhi B., Veremeenko A., Isaev A. Influence of boundary conditions on the strengthening technology of a welded joint with a ball-rod hardener / In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. "International Scientific and Practical Conference En-vironm.

15 Kudryavtsev I.V. etc. Increasing the strength and durability of large machine parts by surface peening. M. NIINFORMTYAZHMASH, 1970, - 144s.

DOI: [10.34220/2311-8873-2024-32-43](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2024-32-43)



УДК 621.9.07

UDC 621.9.07

2.5.6 – технология машиностроения

**ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ
ДВОЙНИКОВ СТАНОЧНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ
ПРОЕКТИРОВАНИИ СРЕДСТВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ**

**THE USING DIGITAL TWINS OF
MACHINING FACILITIES IN THE
DESIGN OF JIGS, FIXTURES AND TOOLS**

✉¹ **Рябинина Ольга Алексеевна**,
аспирант кафедры «Технология машино-
строения» Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж,
e-mail: ryabinina_olya@mail.ru

✉¹ **Ryabinina Olga Alekseevna**,
postgraduate student of the department of
Mechanical engineering technology, Voronezh
state technical university, Voronezh,
e-mail: ryabinina_olya@mail.ru

Болдырев Александр Иванович,
д.т.н., профессор кафедры «Технология
машиностроения», Воронежский государ-
ственный технический университет,
г. Воронеж.

Boldyrev Alexander Ivanovich,
doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of Mechanical engineering Technology,
Voronezh state technical university, Voronezh.

Болдырев Александр Александрович,
к.т.н., доцент кафедры «Технология маши-
ностроения», Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж.

Boldyrev Alexander Alexandrovich,
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of Mechanical engineering
technology, Voronezh state technical university,
Voronezh.

Левин Дмитрий Юрьевич,
старший преподаватель кафедры графики,
конструирования и промышленного ди-
зайна, Воронежский государственный тех-
нический университет, г. Воронеж.

Levin Dmitry Yurievich,
senior lecturer, department of graphics, construc-
tion and industrial design, Voronezh state technical
university, Voronezh.

Аннотация. В статье рассмотрена актуальность применения технологии цифрового двойника, его развитие и возможности применения на предприятиях машиностроительного профиля различных отраслей промышленности. Рассмотрен цифровой двойник как инструмент сокращения цикла технологической подготовки производства за счет создания цифровой библиотеки станочного оборудования и ее использования как базы для проектирования средств технологического оснащения. Дан алгоритм формирования библиотеки цифровых двойников станочного оборудования с пояснениями, а также приведены

Annotation. The article considers the relevance of digital twin technology, its development and possibilities of application at mechanical industry. The article considers the digital twin as a tool to reduce the engineering process preparation by creating a digital library of machining facilities and its use as a basis for the design of jigs, fixtures and tools. The algorithm of formation of the digital twin library of machining facilities with explanations is given, and also technical recommendations on designing of means of technological tools on the basis of the created digital twin library of the machining facilities with explanations are given.

технические рекомендации по проектированию средств технологического оснащения на основе созданной библиотеки.

Ключевые слова: ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ, ТРЕХМЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ, СТАНОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА, ЦИФРОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, СРЕДСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ.

Keywords: DIGITAL TWINS, 3D SCANNING, MACHINING FACILITIES, DIGITAL MANUFACTURING PROCEDURE, JIGS, FIXTURES AND TOOLS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В машиностроении средствам технологического оснащения отводится значительная роль. Наиболее существенное значение они имеют в процессе автоматизации технологических процессов (ТП) производства и повышении качества производственных операций. В настоящее время для ускорения процессов проектирования на предприятиях активно внедряются новые информационные технологии. Примером может являться цифровая модель производства, основанная на создании цифровых двойников.

Целью подготовки производства является обеспечение эффективного, безопасного и качественного производственного процесса. Задача подготовки производства состоит в том, чтобы обеспечить необходимые условия для функционирования производственного процесса [1, 2].

Внедрение современных технологий позволяет улучшать показатели технологической подготовки производства (ТПП). Одним из примеров технологий, которые активно популяризируются в машиностроительной отрасли – это цифровые двойники. Создание виртуальных или цифровых двойников (ЦД) для установок и физических объектов появилось в начале XXI века.

ЦД представляет собой виртуальную копию физического мира, виртуальную модель реального объекта или ситуации, которая на микро- и макроуровне с помощью набора математических моделей описывает состояние объекта и всех его элементов [3].

Понятия ЦД чаще всего используются для виртуальной модели цеха или предприятия в целом. Данная технология дает возможность воспроизводить различные ситуации, которые могут возникать на производстве в процессе производства продукции. Это позволяет подбирать наиболее адекватные сценарии ТП изготовления изделий заданной программы выпуска, позволяющих избежать сбоев и аварийные ситуации при их реализации.

При этом следует понимать, что ЦД – это лишь инструмент оптимизации работы специалистов, а не автоматическое решение проблем, возникающих на производстве. В зависимости от специфики работы предприятия и текущих приоритетов его развития функционал и интерфейс двойника может быть «заточен» под решение тех или иных задач. Он позволяет воссоздать инфраструктуру и логику операций предприятия в виртуальной реальности [4].

Однако, для полной оцифровки работы цеха или предприятия в целом требуется следовать правилам декомпозиции и создавать виртуальный макет не только производства, но и его отдельных составляющих, таких как станочное оборудование. Полученные модели можно будет использовать в дальнейшем в автоматизированных системах управления предприятием, а также при грамотном проектировании планировок участков и производственных потоков в трехмерном пространстве, где двойник выступит в качестве 3D-темплета оборудования для более оптимальной организации производственного процесса [5-8].

ЦД оборудования представляют собой мощный инструмент для оптимизации производственных процессов. Еще один из вариантов их применения на машиностроительных предприятиях – разработка цифровых технологических процессов (ЦТП). В рамках ЦТП за счет использования технологии цифровых двойников имеется возможность визуализировать организационно-технологические процессы, производить их обработку и тестирование, создавать цифровые фабрики, производить 3D моделирование, симуляцию и оптимизацию производственно-логистических процессов, выполнять удалённое программирование автоматизированного оборудования с ЧПУ и роботов [9-13].

Применение ЦД станочного оборудования на этапе ТПП также возможно при проектировании средств технологического оснащения (СТО), в частности оснастки. Чаще всего проблемы на данном этапе ТПП возникают в связи с тем, что при автоматизированном проектировании станочных приспособлений (СП) в большинстве случаев не учитывается большинство из характеристик станка и прочих СТО, которые уже были задействованы в технологическом процессе. Чаще всего конструктор по проектированию оснастки имеет базовый набор параметров, которыми он руководствуется при создании СП: габариты рабочей зоны станка и присоединительные размеры мест крепления (например, Т-образные пазы на рабочем столе) [3, 14]. Дальнейшие изменения в конструкцию приспособления вносятся уже по месту, либо установка проходит несколько стадий доработки, что занимает определенное количество времени.

Решить большую часть из выявленных выше проблем позволит работа с более подробной входной информацией. Здесь предлагается использование ЦД станочного оборудования и проектирование приспособления в контексте имеющейся сборки. Получение ЦД позволит учесть все факторы, которые могут повлиять на конструкцию оснастки и сократит время на ее доработку по месту. При этом цифровая модель оборудования не обязательно должна быть полной, достаточно той части, где будет применяться оснастка. Чаще всего это рабочая область и другие СТО, которые могут влиять на размещение проектируемого приспособления.

2 Материалы и методы

Библиотека ЦД представляет собой набор цифровых данных (начиная с цифровых прототипов и заканчивая общими сведениями) о существующей материальной базе предприятия, его станочном оборудовании и уже существующих СТО.

Последовательность действий при формировании библиотеки ЦД станочного оборудования будет определяться множеством факторов, которые необходимо учесть. На рисунке 1 приведен алгоритм процесса формирования библиотеки в виде блок-схемы.

Алгоритм формирования библиотеки ЦД станочного оборудования представляется рядом последовательных этапов:

Этап 1. Определить цель создания библиотеки.

Для формирования библиотеки цифровых двойников ЦД станочного оборудования важно определиться с ее назначением. Самым распространенным вариантом является создание цифровой модели цеха и/или производства в целом. Полученные модели используются для проектирования и расчетов производственных процессов и не требуют точной детализации каждого из станочного оборудования.

Другим вариантом использования ЦД являются проектирование и автоматизация процессов планировки участков и производственных потоков. Обычно это происходит на 2D схемах с применением «темплетов», которые показывают контуры станков в двух координатах, без учета высоты цеха и самого оборудования. Объемный вариант позволит более оптимально расставить оборудование, учитывая расстояние между станками, которое можно задействовать для перемещения или размещения заготовок.

Наиболее интересным и малораспространенным вариантом использования станочного оборудования является проектирование СТО по месту, в рамках модели станка, напрямую

учитывая все параметры их мест расположения и крепления. В данной статье упор сделан именно на такое применение библиотеки ЦД;

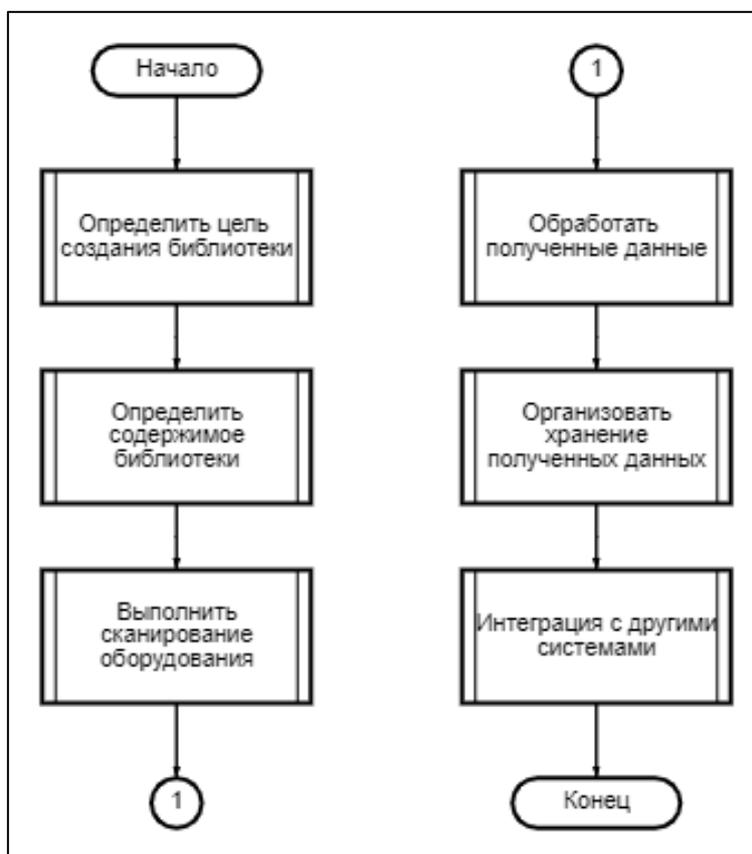


Рисунок 1 – Алгоритм формирования библиотеки ЦД

Этап 2. Определить содержимое библиотеки.

Выявить какие станки будут оцифрованы и занесены в библиотеку, а также СТО, которое уже имеется у данного станочного оборудования и тоже будет участвовать в сканировании. Определить в каких положениях и конфигурациях требуется отсканировать оборудование в зависимости от дальнейшего применения полученной модели (рекомендуется сразу формировать полную конфигурацию и учесть все положения работы оборудования);

Этап 3. Выполнить сканирование оборудования.

Произвести оцифровку станочного оборудования и СТО по номенклатуре, составленной на этапе 2.

Этап 4. Обработать полученные данные.

Все полученные сканы станочного оборудования сразу после этапа сканирования представляются в проектах как набор облаков точек. В этом случае пользуются специальным программным обеспечением и объединяют («сшивают») полученные модели в одну по общим опорным точкам. Если разные компоненты станка были отсняты одним и тем же оборудованием в рамках одного проекта, то данный процесс производится в той же программе для сканирования. Если же станочное оборудование довольно объемное и его снимали разными устройствами, то пользуются специальным программным обеспечением, которое имеет более широкий функционал и позволяет работать с файлами, полученными с помощью разных устройств.

В полученных моделях убираются артефакты (отсканированные части сторонних объектов), которые попали в скан и «зашиваются» все дыры в модели, которые получились в затемнённых участках.

Этап 5. Организовать хранение полученных данных.

Рекомендуется стандартизировать модели ЦД для обеспечения единообразия библиотеки цифровых двойников. Следует структурировать библиотеку, например, рассортировать модели по типам станочного оборудования, как каждому станку создать ветки с различными положениями и конфигурациями.

Этот этап включает в себя и перевод полученных моделей в различные форматы (облака точек или mesh-модели) и расширить библиотеку для использования по различным назначениям.

Рекомендуется также вести сопутствующую документацию, которая будет хранить информацию о моделях: когда был получен скан, какое использовалось оборудование для сканирования, программы обработки, какие специалисты занимались наполнением библиотеки, где были уже использованы полученные модели и т.д. Это позволит вовремя отследить нарушения в работе с ЦД, а также дополнять библиотеку учитывая уже имеющиеся параметры как новыми сканами, так и моделями спроектированных СТО.

Этап 6. Интеграция с другими системами.

Полученные ЦД можно передавать в системы, занимающиеся организацией работы производства, например, в системы управления:

- жизненным циклом изделия (PLM-системы);
- хранением данных и документами об изделии (PDM-системы);
- и планирования ресурсов предприятия (ERP-системы);
- производственными процессами (MES-системы).

Использование библиотеки ЦД станочного оборудования при проектировании СТО позволит, в первую очередь, сократить количество ошибок и итераций внесения изменений, так как позволит сразу учесть все элементы конструкции станка и других объектов, которые могут повлиять на геометрию и установку оснастки. Следовательно, они позволят сократить расход временных ресурсов на данный процесс вне зависимости от квалификации конструктора вследствие того, что учитывается большее количество входных параметров. Использование ЦД станка позволит в рамках сборки провести расчеты на пересечения, инженерные расчеты, а также провести симуляцию процессов установки и работы проектируемых объектов. В результате представляется возможным повысить степень унификации СТО за счет использования уже разработанных и протестированных устройств

3 Результаты исследований

Использование библиотеки ЦД станочного оборудования в процессе проектирования СТО позволяет решить проблемы, которые возникают в связи с тем, что при автоматизированном проектировании СП в большинстве случаев не учитывается большинство из характеристик станка и прочих СТО, которые уже были задействованы в технологическом процессе. Чаще всего конструктор по проектированию оснастки имеет базовый набор параметров, которыми он руководствуется при создании СП: габариты рабочей зоны станка и присоединительные размеры мест крепления (например, Т-образные пазы на рабочем столе). Дальнейшие изменения в конструкцию приспособления вносятся уже по месту, либо установка проходит несколько стадий доработки, что занимает определенное количество времени.

Решить большую часть из выявленных выше проблем позволит работа с более подробной входной информацией. Здесь предлагается использование ЦД станочного оборудования и проектирование приспособления в контексте имеющейся сборки. Получение ЦД позволит учесть все факторы, которые могут повлиять на конструкцию оснастки и сократит время на ее доработку по месту. При этом цифровая модель оборудования не обязательно должна быть полной, достаточно той части, где будет применяться оснастка. Чаще всего это рабочая область и другие СТО, которые могут влиять на размещение проектируемого приспособления.

Снятие размеров является важным этапом при проектировании станочных приспособлений, поскольку точные размеры и параметры деталей позволяют создать соответствующие

приспособления, которые будут правильно взаимодействовать с обрабатываемыми деталями. Для снятия размеров деталей используются различные измерительные инструменты, такие как штангенциркуль, микрометр, шаблоны, угольник и прочие. Соответствующий инструмент выбирается в зависимости от требуемой точности измерений.

Однако, такой вид обратного инжиниринга (обратной разработки) довольно трудоемок и по временным затратам может быть сравним с обычной доработкой приспособлений. Целесообразно получать ЦД таким методом только при условии, что на данном оборудовании производится частая смена оснастки. Но и здесь есть решение, которое позволит сократить сроки получения цифровой модели станка. Использование технологии трехмерного сканирования позволит довольно быстро и с высокой точностью получить 3D-модель оборудования, которую потребуется лишь немного доработать в системе автоматизированного проектирования (САПР) для дальнейшего использования в процессе проектирования оснастки.

Использование такого решения более эффективно в процессе проектирования станочных приспособлений за счет применения нисходящего метода проектирования (в контексте сборки), который позволяет контролировать изменения взаимосвязанных параметров в различных компонентах сборки, а также при необходимости заранее (еще до разработки моделей деталей и сборочных единиц) определять их параметры.

В связи с этим были выделены следующие технические рекомендации для проектирования средств технологического оснащения на основе созданной библиотеки ЦД станочного оборудования:

1. Провести анализ библиотеки цифровых двойников. Проверить, есть ли в имеющейся библиотеке необходимое оборудование, для которого будет выполняться проектирование оснастки. Если оно имеется, проверить, удовлетворяет ли качество существующей модели и всех компонентов, которые будут задействованы в дальнейшем проектировании.

2. Проверить в каком формате находится модель выбранного станка (облако точек или mesh-модель). Если САПР, которая будет использоваться для проектирования оснастки, не поддерживает существующий формат (например, многие системы не работают с облаками точек, а только с полигональными моделями), то следует воспользоваться специальными конвертерами, которые могут перевести модель к нужному виду.

3. Осуществить контроль передачи данных в САПР. Важно, чтобы данный процесс произошел без ошибок и потери данных.

4. Проконтролировать точность размеров у существующей виртуальной модели станка. Важно понимать какую погрешность мог допустить сканер в своей работе, чтобы затем учесть ее при проектировании СТО.

5. Определить тип и вид оснастки, которая будет спроектирована, ее назначение и геометрию. Это нужно для понимания того, как и где она будет крепиться на станочном оборудовании и с какими участками будет «взаимодействовать».

6. Определить те участки оборудования, которые будут использоваться как основа при проектировании оснастки «по месту». Убедиться, что вся геометрия передалась верно и имеется возможность четко определить формы и размеры рабочих элементов станочного оборудования.

7. Если какие-либо части элементов были плохо отсканированы и не имеется возможность определить геометрию или размеры, то следует воспользоваться дополнительно традиционными средствами обратного инжиниринга, и с помощью метрологического инструмента собрать недостающие данные.

8. Выделенные в п.6 компоненты станка, которые будут участвовать непосредственно в закреплении оснастки или напрямую влиять на ее конструкцию, требуется «отвердотелить», то есть частично перевести модель из поверхностной в твердотельную, чтобы эти элементы в дальнейшем можно было использовать для проектирования и отработки оснастки.

9. Смоделировать оснастку в САПР с применением нисходящего метода проектирования (в контексте сборки станочного оборудования).

10. Провести отработку конструкции СТО на совместимость с другими компонентами станочного оборудования (проверку на пересечения в крайних положениях, просимулировать установку и работу оснастки на станочном оборудовании с разными типами заготовок). Провести инженерные расчеты полученной оснастки в рамках ее нахождения на станке (прочностной анализ и анализ нагрузок).

11. Создать технологическую документацию для производства оснастки.

Важно отметить, что данные технические рекомендации не заменяют стандартную последовательность проектирования СТО, а лишь расширяют ее и дают пояснения к определенным этапам, где будет задействована библиотека ЦД станочного оборудования.

Апробация выделенных алгоритма и технических рекомендаций была произведена на лабораторном оборудовании кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета. Были получены отсканированные цифровые модели станка с ЧПУ фрезерно-гравировального настольного AMAN и станка электроэрозионного копировально-прошивочного 4Г721Э. Оцифровка проводилась с помощью оптического сканера SHINING 3D EinScan Pro EP. Оборудование напрямую подключалось к программному обеспечению (ПО) ExScan Pro, благодаря чему отсканированные области отображаются в реальном времени, облако точек строится автоматически. Также отображается видео с камеры, установленной на сканере для более удобной ориентации пользователя в пространстве (рис. 2).

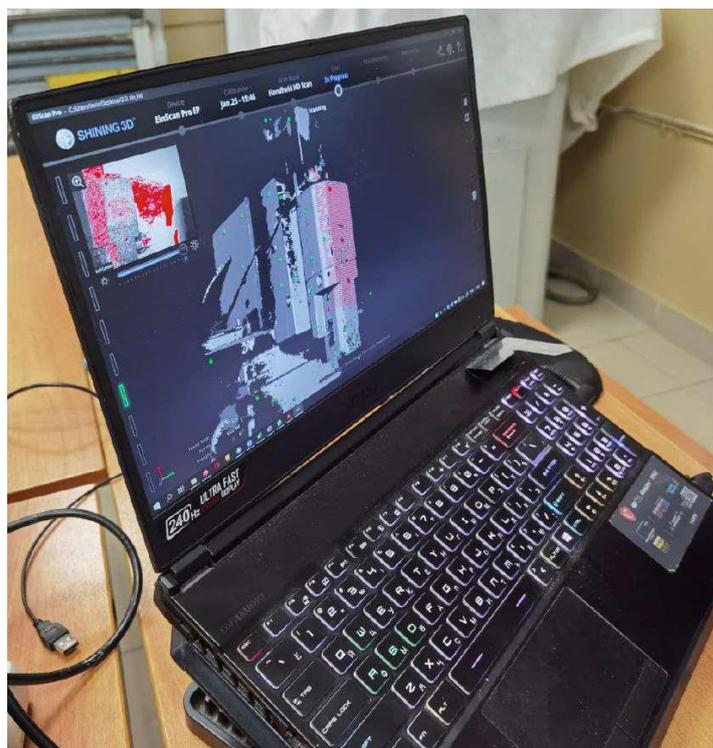


Рисунок 2 – Построение облака точек при сканировании

После этапа сканирования полученная модель нуждалась в доработке, прежде чем использоваться по прямому назначению. Данный этап можно производить либо в той же программе сканирования, если ее функционал позволяет, либо воспользоваться специальными программами для работы с облаками точек и mesh-моделями. В зависимости от размера оборудования может потребоваться выполнение нескольких сканов. Так, для сканирования фрезерно-гравировального настольного станка с ЧПУ было достаточно одного скана, тогда как для получения 3D-модели электроэрозионного копировально-прошивочного станка потребовалось создать три скана с разных сторон установки и сшить их по общим опорным точкам (рис. 3).

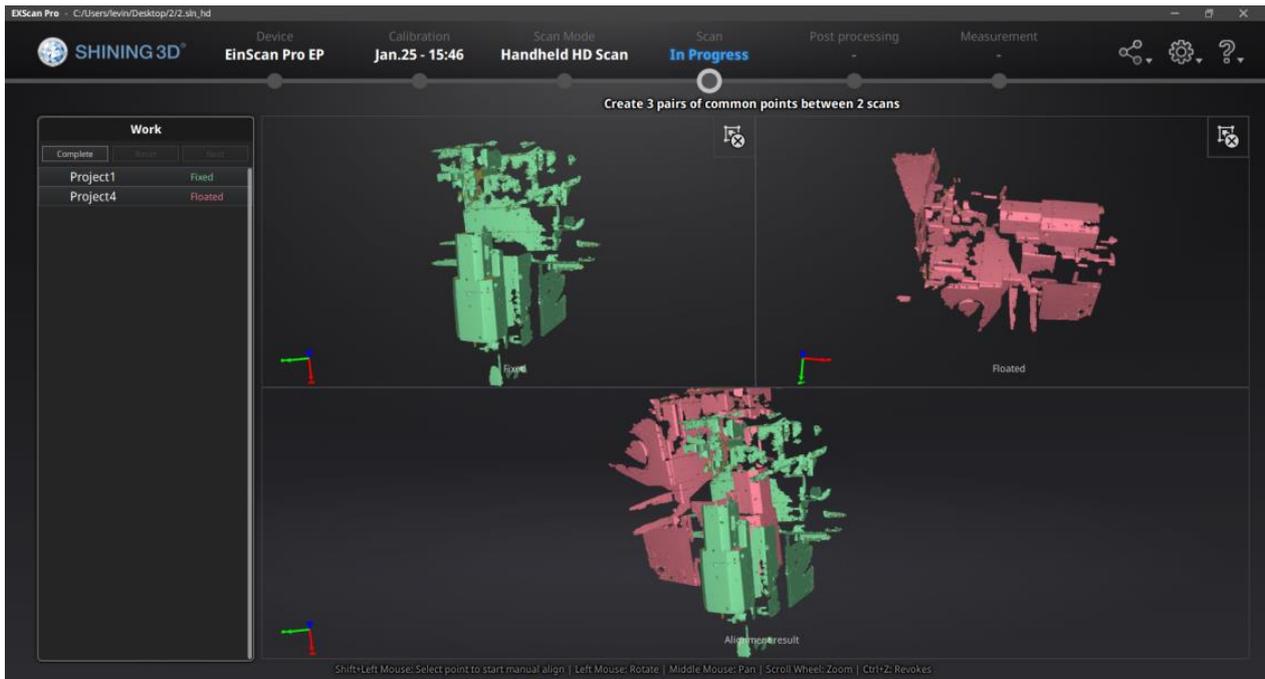


Рисунок 3 – Сшивка нескольких сканов в рамках одного проекта

Затем полученные модели были очищены от артефактов (отсканированные части сторонних объектов), которые попали в скан, а затем «защиты» все дыры в модели. Для этого также был использован функционал ExScan Pro. Готовое облако точек можно сохранить в файл и импортировать в САПР. Если же система не позволяет работать с такими данными, то файл следует перевести в полигональную модель. На рис. 4 представлена готовая модель в виде облака точек станка электроэрозионного копировально-прошивочного 4Г721Э.

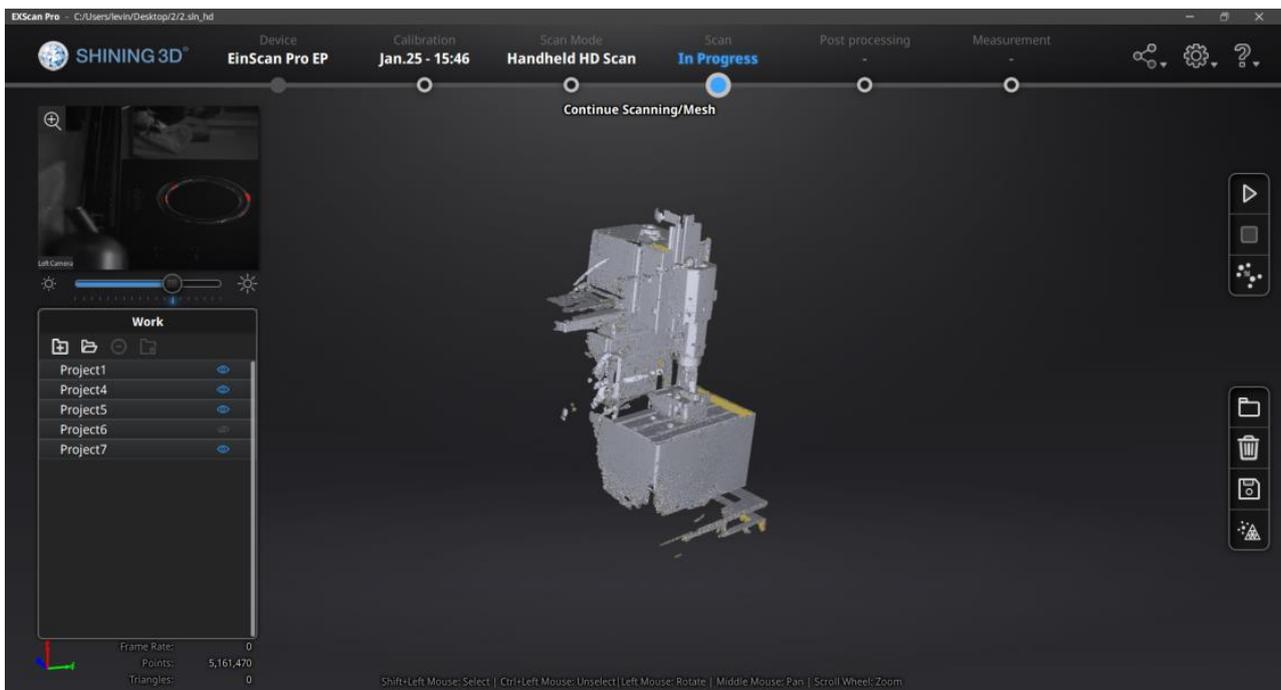


Рисунок 4 – Готовое облако точек цифровой модели станка 4Г721Э

Следующий этап постобработки проводился в САПР. Вначале были определены части станочного оборудования, которые требовалось «отвердетелить» (перевести из поверхностной в твердотельную параметрическую модель). Это элементы рабочей зоны станка, по которым в дальнейшем будет производиться проектирование оснастки и других СТО. Используя инструменты системы, было выполнено моделирование рабочего стола станка 4Г721Э по размерам, полученным из скана, а также с помощью мерительного инструмента. Дополнительные работы по обмеру элементов оборудования потребовались в связи с техническими ограничениями процесса сканирования – внутренние части Т-пазов на рабочем столе не попали в скан из-за того, что находились в тени основной конструкции. Результат постобработки станка электроэрозионного копировально-прошивочного представлен на рис. 5. Результат постобработки фрезерно-гравировального настольного станка с ЧПУ представлен на рис. 6.

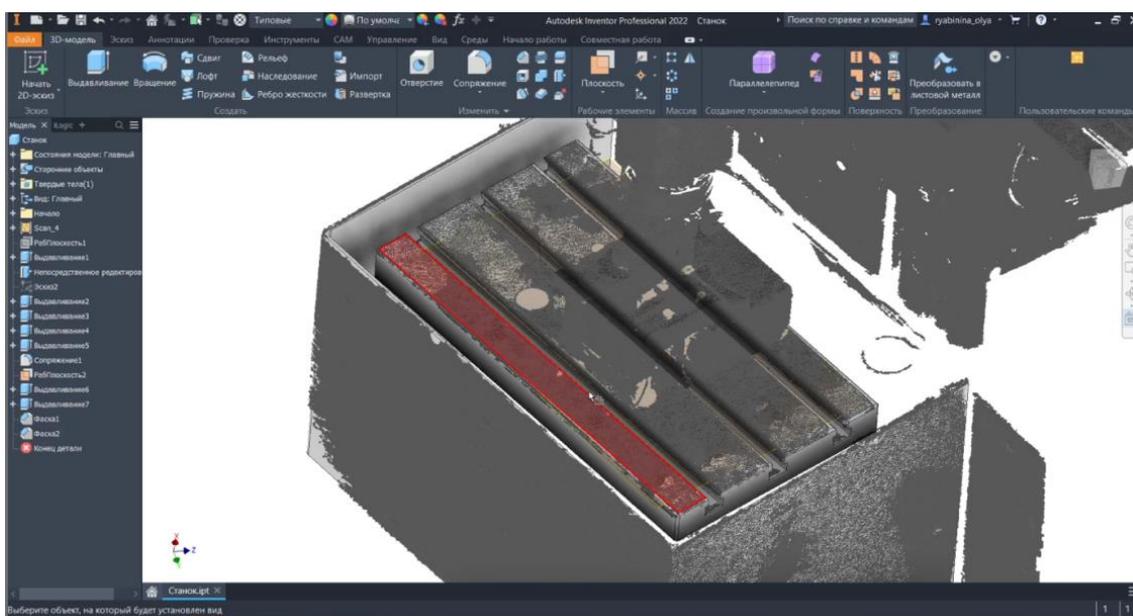


Рисунок 5 – Результат «отвердетеливания» рабочих зон станка 4Г721Э

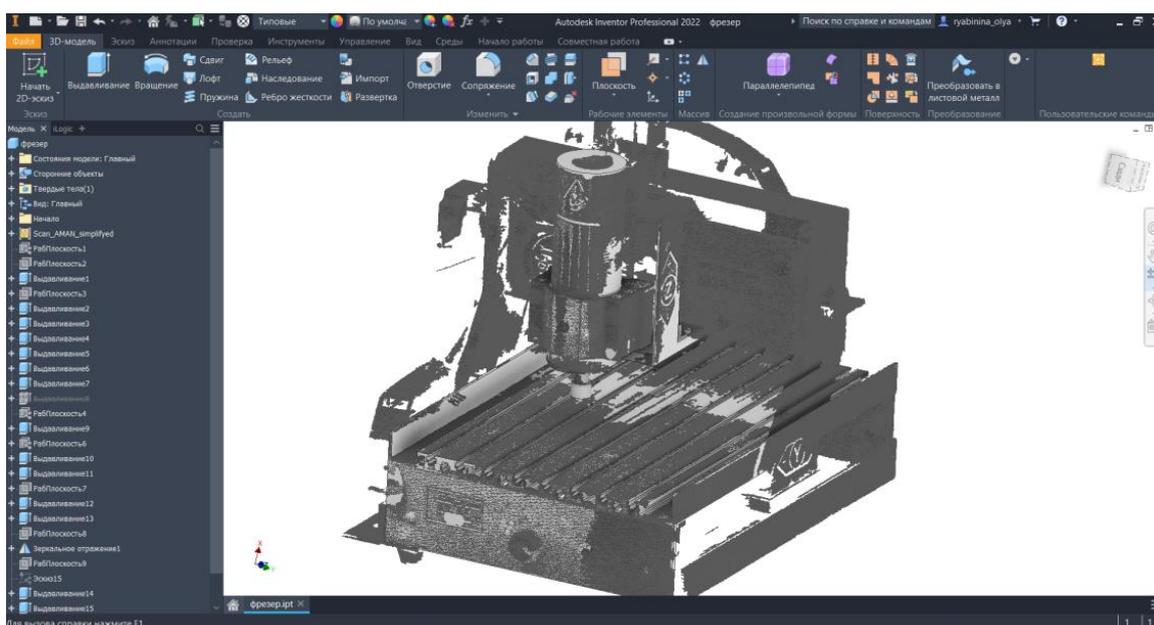
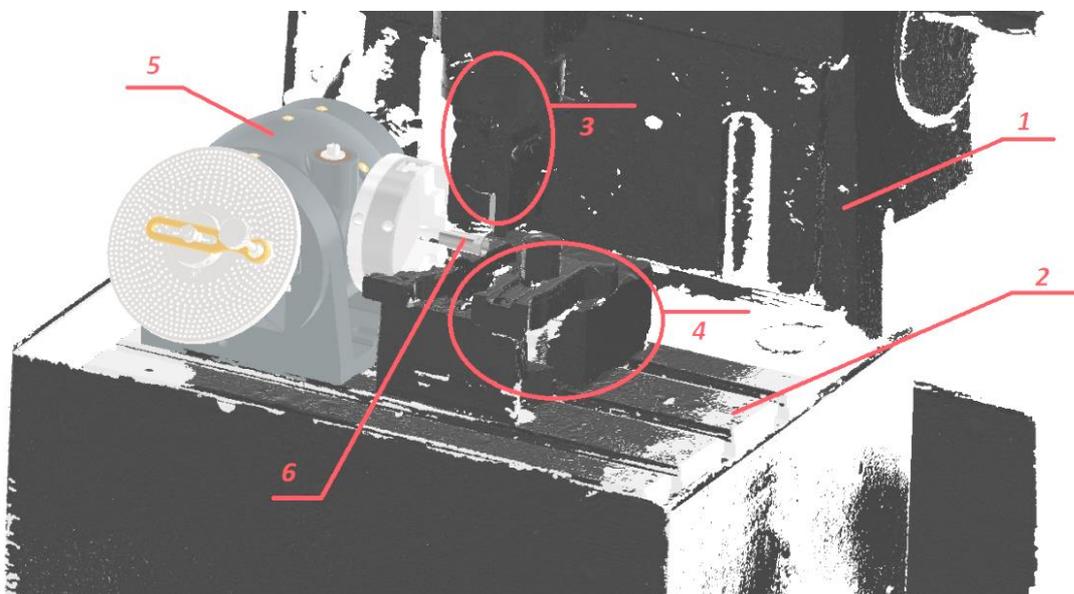


Рисунок 6 – Результат «отвердетеливания» рабочих зон станка AMAN

Как можно увидеть, что твердотельной была создана не вся рабочая зона станков, а некоторые ее элементы. Они выбраны в результате анализа тех поверхностей, которые непосредственно будут участвовать в закреплении оснастки или напрямую влиять на ее конструкцию. Остальные же части скана можно использовать в исходном виде для визуального контроля и контроля пересечений.

Применение нисходящего метода проектирования (в контексте сборки) позволяет контролировать изменения взаимосвязанных параметров в различных компонентах сборки, а также при необходимости заранее (еще до разработки моделей деталей и сборочных единиц) определять их параметры.

Для электроэрозионного копировально-прошивочного станка 4Г721Э было выбрано проектирование головки делительной универсальной. Использование данного оборудования для станков позволяет формировать грани на деталях, фрезеровать шлицы и пазы. В данном случае в качестве заготовки был взят патрубок с шестигранным адаптером, на каждой из сторон которого планируется прошить отверстие на рассматриваемом станочном оборудовании. Результат проектирования представлен на рис. 7.



1 – отсканированная модель станка, 2 – «отвердотеленная» с помощью инструментов САПР рабочая зона, 3 – инструмент, 4 – старая оснастка, которая будет утилизирована, 5 – новое станочное приспособление, 6 – изготавливаемое изделие.

Рисунок 7 – Использование цифрового двойника оборудования 4Г721Э, полученного 3D-сканированием в процессе проектирования СП

Для фрезерно-гравировального настольного станка с ЧПУ в качестве апробации было спроектировано устройство зажимное с поршневым пневмоцилиндром. Для этого вначале рабочая зона станка была переведена в твердотельную модель на основе полигональной модели скана, а затем спроектировано специальное приспособление, с учетом геометрических характеристик станочного оборудования (рис. 8).

Апробация показала работоспособность предложенной методики, в том числе продемонстрировала сокращение времени и получение более обширной входной информации для проектирования СП, а также сделало возможным проектирование подобных конструкций инженером, не имеющим специальной квалификации.

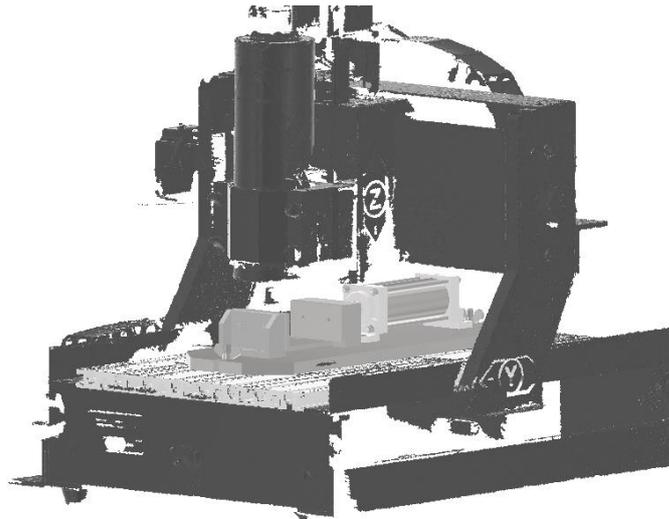


Рисунок 8 – Использование цифрового двойника оборудования AMAN, полученного 3D-сканированием в процессе проектирования СП

4 Обсуждение и заключение

Проектирование станочных приспособлений является важным этапом в создании эффективной технологической оснастки для обработки деталей на станках и представляет из себя довольно сложный процесс, который требует внимательного анализа требований, технической экспертизы и использования современных инструментов проектирования.

Создание библиотеки ЦД станочного оборудования позволит сократить сроки технологической подготовки производства в процессе проектирования технологической оснастки и других СТО за счет использования в качестве опорной геометрии рабочей зоны и использовать «слепые зоны» для оптимизации конструкции приспособления. Следующим этапом развития ЦД в их использование при проектировании средств технологического оснащения может стать применение генеративного дизайна

Список литературы

- 1 Рябина О.А., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Левин Д.Ю. Анализ проблем, возникающих при автоматизированном проектировании станочных приспособлений. – Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. научных трудов Национальной научно-техн. конференции с международным участием: АПИР-28, 2023, С. 176-180.
- 2 Болдырев, А. И. Организационно-технологическая подготовка производства в машиностроении: учеб. пособие / А.И. Болдырев, В.А. Лебедев, А.А. Болдырев, Д.В. Моисеев. – М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 144 с.
- 3 Пономарев, К.С. Цифровой двойник производства как инструмент цифровизации технологических процессов предприятия / К.С. Пономарев, А.Н. Феофанов // Актуальные тренды и перспективы развития науки, техники, технологий: сб. научных трудов по материалам между. науч.-практ. конф. Под общ. ред. Е. П. Ткачевой. – Белгород: АПНИ, 2019. – С. 141-145.
- 4 Luo W, Hu T, Zhang C, Wei Y, Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. J Ambient Intell Humaniz Comput, 10 (2018), pp. 2–5.
- 5 Brian Curless, "From range scans to 3D models", ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 33 (4) (2000), pp. 38–41.
- 6 Александрова В. В., Зайцева А. А., Брысковский Г. В. Цифровые программируемые 3D-технологии. Материалы конф. «Информационные технологии в управлении». 2012. С. 547 -553.
- 7 Болдырев А.А., Левин Д.Ю., Рябина О.А., Болдырев А.И. К вопросу технологичности изделий сниженной массы в авиационной и ракетно-космической технике, полученных с помощью дегенеративного дизайна // Воронежский научно-технический вестник. 2021. №4 (38). С. 29-35

- 8 Белов, В. Б. Новая парадигма промышленного развития Германии - стратегия «Индустрия 4.0» // Современная Европа. - 2016. - № 9 (71) - С. 11-22.
- 9 Фюер, Ц. Преимущества "цифрового двойника" / Ц. Фюер, Ц. Вейсманн // CAD/CAM/CAE Observer. 2017. - №5 (113) - С. 50-53
- 10 Glaessgen E, Stargel D The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct Struct Dyn Mater Conf AIAA/ASME/AHS Adapt Struct Conf AIAA (2012), pp. 1–14.
- 11 Tao F, Cheng J, Qi Q, Zhang M, Zhang H, Sui F Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. Int J Adv Manuf Technol 94 (2018), pp. 3563–3576.
- 12 Шулаева Е.А., Пенкин И.А. Перспективы внедрения цифрового двойника производства // Наука и инновационные технологии. 2023. №1 (26) С. 334-340.
- 13 Ильченко И.А., Пегашкин В.Ф. Классификация технологий для обеспечения создания цифрового двойника машиностроительного производства. – В сборнике: Молодежь и наука. Материалы XVIII международной научно-практической конференции старшеклассников, студентов и аспирантов. В 2-х томах. Нижний Тагил, 2022. С. 43-45.
- 14 Феофанов, А. Н. Разработка производственных исполнительных систем в условиях цифрового производства / А.Н. Феофанов, М. А. Шутиков, К. С. Пономарев // Вестник машиностроения. - 2018. - №9. - С. 25-29.

References

- 1 O.A. Ryabinina, A.I. Boldyrev, A.A. Boldyrev, D.Y. Levin. Analysis of problems arising in the automated design of technological tooling. – Tula: TulSU, 2023. pp. 176-180
- 2 A.I. Boldyrev, A.A. Boldyrev, V.A. Lebedev, D.V. Moiseev. Organizational and technological manufacturing preparation at mechanical industry. – Moscow, Vologda: Infra-Inginiring, 2024 (p. 144).
- 3 K.S. Ponomarev, A.N. Feofanov. Digital twin of production as a tool for digitalization of enterprise technological processes. – Belgorod: APNI, 2019. pp. 141-145.
- 4 Luo W, Hu T, Zhang C, Wei Y, Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. J Ambient Intell Humaniz Comput, 10 (2018), pp. 2–5.
- 5 Brian Curless, "From range scans to 3D models", ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 33 (4) (2000), pp. 38–41.
- 6 V.V. Aleksandrova, A.A. Zaitseva, G.V. Bruskovskii. Digital programmable 3D technologies. Moscow: MIAN. 2012. pp. 547 -553.
- 7 A.A. Boldyrev, D.Y. Levin, O.A. Ryabinina, A.I. Boldyrev. On the question of reduced mass articles technological effectiveness in aviation and rocket-space equipment accessed with degenerative design. – Voronezh: VGLTA. 2021. pp. 29-35.
- 8 V.B. Belov. A new paradigm for Germany's industrial development - the Industry 4.0 strategy // Modern Europe - 2016. - № 9 (71) - pp. 11-22.
- 9 Feuer Z., Weissman Z. Advantages of digital twin. CAD/CAM/CAE Observer. No5 (113), (2017). pp. 50-53.
- 10 Glaessgen E, Stargel D The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct Struct Dyn Mater Conf AIAA/ASME/AHS Adapt Struct Conf AIAA (2012), pp. 1–14.
- 11 Tao F, Cheng J, Qi Q, Zhang M, Zhang H, Sui F Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. Int J Adv Manuf Technol 94 (2018), pp. 3563–3576.
- 12 Prospects for the introduction of digital twin of production // Science and Innovative Technologies, №1 (26), (2023), pp. 334-340
- 13 I.A. Ilchenko, V.F. Pegashkin. Classification of technologies to ensure the creation of a digital twin of mechanical industry. – Nizhny Tagil (2022), pp. 43-45.
- 14 Feofanov A.N., Shutikov M.A., Ponomarev K.S. Development of production executive systems in digital production conditions // Russian Engineering Research, №9 (2018), pp. 25-29.

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-44-51



УДК 656.13.08

UDC 656.13.08

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ
АВТОТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ
ДТП С УЧЕТОМ СЦЕПНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ШИН**

**INCREASING THE RELIABILITY
OF THE CAR TECHNICAL
EXAMINATION OF AN ACCIDENT,
TAKING INTO ACCOUNT THE
COUPLING CHARACTERISTICS
OF TIRES**

Ефимов Артём Дмитриевич,
к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Между-
народные логистические системы и ком-
плексы (МЛСК)» Южно-Российский государ-
ственный политехнический университет
(НПИ) имени М. И. Платова, г. Новочеркасск,
e-mail: e1984ad@mail.ru

Efimov Artem Dmitrievich,
candidate of technical sciences, associate professor,
head of the department of International logistics sys-
tems and complexes (ILSC) South Russian state pol-
ytechnic university (NPI) named after M. I. Platova,
Novocherkassk, e-mail: e1984ad@mail.ru

✉¹ **Алибагандов Алибаганд Омарович**,
ассистент кафедры «Международные логи-
стические системы и комплексы (МЛСК)»
Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова, г. Новочеркасск,
e-mail: Alibagand1999@mail.ru

✉¹ **Alibagandov Alibagand Omarovich**,
assistant of the department International logistics sys-
tems and complexes (ILSC) South Russian state pol-
ytechnic university (NPI) named after M. I. Platova,
Novocherkassk, e-mail: Alibagand1999@mail.ru

Локтионов Вячеслав Вячеславович,
к.т.н., доцент кафедры «Международные ло-
гистические системы и комплексы (МЛСК)»
Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова, г. Новочеркасск,
e-mail: eshtar1980@mail.ru

Loktionov Vyacheslav Vyacheslavovich,
candidate of technical sciences, associate professor of
the department International logistics systems and
complexes (ILSC) South Russian state polytechnic
university (NPI) named after M. I. Platova, Novo-
cherkassk, e-mail: eshtar1980@mail.ru

Бессарабов Евгений Николаевич,
к.т.н., доцент кафедры «Международные ло-
гистические системы и комплексы (МЛСК)»
Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова, г. Новочеркасск,
e-mail: bess.555en@ya.ru

Bessarabov Evgeniy Nikolayevich,
candidate of technical sciences, associate professor of
the department International logistics systems and
complexes (ILSC) South Russian state polytechnic
university (NPI) named after M. I. Platova, Novo-
cherkassk, e-mail: bess.555en@ya.ru

Аннотация. Во многих случаях аварийно-
опасные ситуации обусловлены тем, что сцеп-
ление шин с дорогой существенно отличается
от нормативных значений. Исходя из этого,

Annotation. In many cases, emergency situations
are caused by the fact that the adhesion of tires to
the road differs significantly from the standard val-
ues. Based on this, there are problems

возникают проблемы, связанные с адекватной оценкой влияния коэффициента сцепления в той или иной дорожно-транспортной ситуации на курсовую устойчивость автомобиля и его тормозной путь. Экспертные организации, а также государственные органы МВД нуждаются в информации о влиянии коэффициента сцепления при различных эксплуатационных факторах на тормозной путь автомобиля, при решении своих непосредственных служебных задач. В результате выполненных исследований, были получены значения корректирующих коэффициентов для теоретических расчетов коэффициентов сцепления колес с дорогой как в различных дорожных условиях, так и с учетом эксплуатационного состояния шин, которые можно использовать в практике экспертов-автотехников.

Ключевые слова: ЭКСПЕРТИЗА ДТП, ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО, КОЭФФИЦИЕНТ СЦЕПЛЕНИЯ ШИН С ДОРОГОЙ, СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН, ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ.

associated with an adequate assessment of the influence of the coefficient of adhesion in a particular road traffic situation on the course stability of the car and its braking distance. Expert organizations, as well as state bodies of the Ministry of Internal Affairs need information about the influence of the coefficient of adhesion under various operational factors on the braking distance of the car, when solving their immediate official tasks. As a result of the research carried out, the values of correction coefficients for theoretical calculations of wheel-to-road coupling coefficients were obtained both in various road conditions and taking into account the operational condition of tires, which can be used in the practice of automotive experts.

Keywords: ACCIDENT EXAMINATION, VEHICLE, COEFFICIENT OF ADHESION OF TIRES TO THE ROAD, SPEED OF MOVEMENT, OPERATIONAL CONDITION OF CAR TIRES, BRAKING DISTANCE.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В Российской Федерации относительно недавно стали особое внимание уделять выяснению истинных причин возникновения ДТП при проведении автотехнической экспертизы. Резонансные происшествия на автомобильном транспорте получают широкую огласку в прессе и средствах массовой информации. И очень часто выяснить истинные причины таких ДТП в виду отсутствия средств видеофиксации весьма сложная задача. Поэтому особая роль отводится расчетным методам и моделированию в рамках судебной автотехнической экспертизы [1-7].

По большей части методики проведения экспертизы ДТП уже весьма устарели и не отражают полную картину процессов, происходящих в зоне контакта колеса автомобиля с дорогой. Нормативные коэффициенты, используемые экспертами, были получены практически в идеальных условиях и на шинах, значительно отличающихся от современных по своим характеристикам [8-13].

Зачастую сотрудники ДПС на месте дорожно-транспортного происшествия лишь фиксируют состоявшийся факт того, что водитель не справился с управлением. При этом под данной скупой формулировкой могут быть скрыты различные обстоятельства, значительно влияющие на процесс движения и административного наказания водителя. Во многих случаях аварийноопасные ситуации обусловлены тем, что сцепление шин с дорогой существенно отличается от нормативных значений [8, 14-20].

Исходя из этого, возникают проблемы, связанные с адекватной оценкой влияния коэффициента сцепления в той или иной дорожно-транспортной ситуации на курсовую устойчивость автомобиля и его тормозной путь, что определяет актуальность выбранной темы диссертационной работы.

Экспертные организации, а также государственные органы МВД нуждаются в информации о влиянии коэффициента сцепления при различных эксплуатационных факторах на тормозной путь автомобиля, при решении своих непосредственных служебных задач.

Основной задачей проведения исследований является анализ влияния на коэффициент сцепления автомобильных шин с дорогой различных эксплуатационных параметров и разработка соответствующих корректирующих коэффициентов для существующих методик расчета.

2 Материалы и методы

В сложившейся практике судебной автотехнической экспертизы (САТЭ) ДТП применяется стандартная методика определения скорости движения автомобиля (1) перед началом аварийного торможения, которая предусматривает, что:

$$V_a = 0,5 \cdot t_3 \cdot j_3 + \sqrt{2 \cdot S_p \cdot j_3}, \quad (1)$$

где S_p – длина следа торможения на дорожном покрытии, м.; t_3 – время нарастания замедления, с; j_3 – замедление транспортного средства (2).

$$j_3 = \varphi_x g, \quad (2)$$

где φ_x – коэффициент сцепления колёс с дорогой.

Значение коэффициента сцепления шин автомобиля с дорогой (3) выбирается из рекомендованной справочной литературы и не учитывает конкретных эксплуатационных характеристик последних в сложившихся дорожных условиях. Поэтому многие авторы рекомендуют применять скорректированное значение коэффициента сцепления (4) [1, 4, 18-20]:

$$\varphi_\phi = \varphi_n \cdot k_\phi, \quad (3)$$

где φ_n – справочное нормативное значение коэффициента сцепления; k_ϕ – коэффициент состояния коэффициента сцепления, включающий конкретные значения следующих коэффициентов:

$$\varphi_\phi = \varphi_n \cdot k_{ДП} \cdot k_{СП} \cdot k_{ш} \cdot k_{шг} \cdot k_{ров} \cdot k_{кол} \cdot k_i \cdot k_{i_{non}} \cdot k_p \cdot k_{t_{ш}} \cdot k_{t_{д}} \cdot k_{t_{oc}}, \quad (4)$$

где $k_{ДП}$ – коэффициент вида дорожного покрытия; $k_{СП}$ – коэффициент состояния дорожного покрытия; $k_{ш}$ – коэффициент шероховатости поверхности дорожного покрытия; $k_{шг}$ – коэффициент гидравлической шероховатости; $k_{ров}$ – коэффициент ровности дорожного покрытия; $k_{кол}$ – коэффициент колеяности дорожного покрытия; k_i – коэффициент продольного уклона; $k_{i_{non}}$ – коэффициент поперечного уклона; k_p – коэффициент давления в шинах; $k_{t_{ш}}$ – температурный коэффициент шин; $k_{t_{д}}$ – температурный коэффициент дороги; $k_{t_{oc}}$ – температурный коэффициент окружающей среды.

Кроме того, значительное влияние на коэффициент сцепления оказывает существенное влияние состояние самих автомобильных шин, а именно, их износ и давление воздуха в них.

Износ шин транспортных средств определяется уменьшением высоты протектора в процессе эксплуатации. На его изменение оказывают влияние большое количество факторов – от манеры управления водителем до технического состояния автомобиля.

Выполним исследования зависимости тормозного пути «типового автомобиля» Хендай Солярис от давления воздуха и степени износа протектора шин. В качестве объекта исследования использовались шины марки Cordiant Road Runner 185/65 R15. Давление воздуха в шинах

определяли с помощью цифрового манометра Тугерго. На первом образце шины износ составлял 30 %, второй – 50 %, а третий – представлен новыми шинами с износом не более 10 % протектора. При этом скорость транспортного средства в момент торможения составляла 40 км/ч.

Влияние изменения давления в шине на замедление автомобиля, полученное в результате исследований, представлено в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1 – Влияние давления в шинах на замедление автомобилей

Давление в шинах, кПа	Тормозной путь транспортного средства, м	Замедление, м/с ²	Коэффициент сцепления
1,4	9,1	6,87	0,7
1,6	8,74	7,16	0,73
1,8	8,6	7,26	0,75
2,0	8,2	7,65	0,78
2,2	9,2	6,92	0,71
2,4	9,4	6,67	0,68

Анализ полученных результатов показывает, что изменение тормозного пути и коэффициента сцепления от величины давления воздуха в шинах транспортных средств осуществляется по нелинейной зависимости.

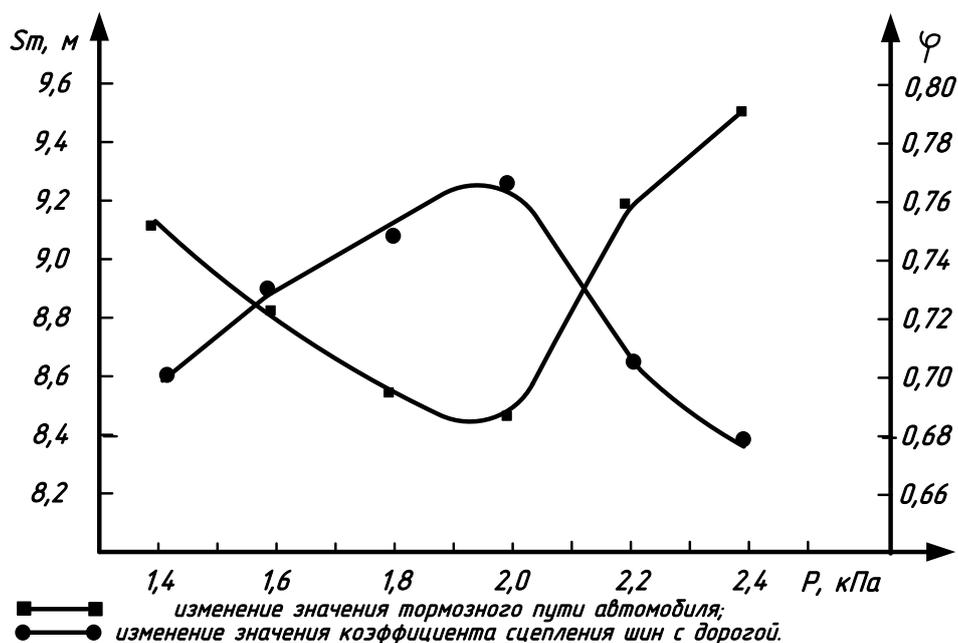


Рисунок 1 – Влияние давления в шинах на тормозной путь автомобиля и значение коэффициента сцепления шин с дорогой

При этом, следует отметить, что при давлении 2,2 кПа и выше величина тормозного пути и коэффициента сцепления стабилизируется, но не в минимальных значениях. Наименьшее значение тормозного пути, а, следовательно, максимальный коэффициент сцепления, наблюдаются при давлении 2,0 кПа.

Поэтому для проведения дальнейших исследований влияния износа протектора шины на коэффициент сцепления было выбрано в качестве рабочего именно давление в шинах, составляющее 2,0 кПа. Как было отмечено выше, проводились исследования на автомобиле с износом резины примерно 30 % и 50 %. Результаты исследований представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Анализ полученных данных показывает, что при увеличении износа протектора шин существенно возрастает значение тормозного пути в связи с уменьшением коэффициента сцепления. Причем, в процентном соотношении, изменение тормозного пути прямо пропорционально изменению коэффициента сцепления.

На основании проведенных исследований рассчитаны значения поправочного коэффициента для расчета объективного коэффициента сцепления шин с покрытием проезжей части с учетом износа протектора, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние протектора шин на коэффициент сцепления шин автомобилей

Износ протектора шин, %	Тормозной путь транспортного средства, м	Коэффициент сцепления	Значение поправочного коэффициента, учитывающего износ шин, K_u
10	8,2	0,78	1
20	8,5	0,75	0,96
30	8,9	0,72	0,92
40	10,8	0,6	0,77
50	11,2	0,57	0,73

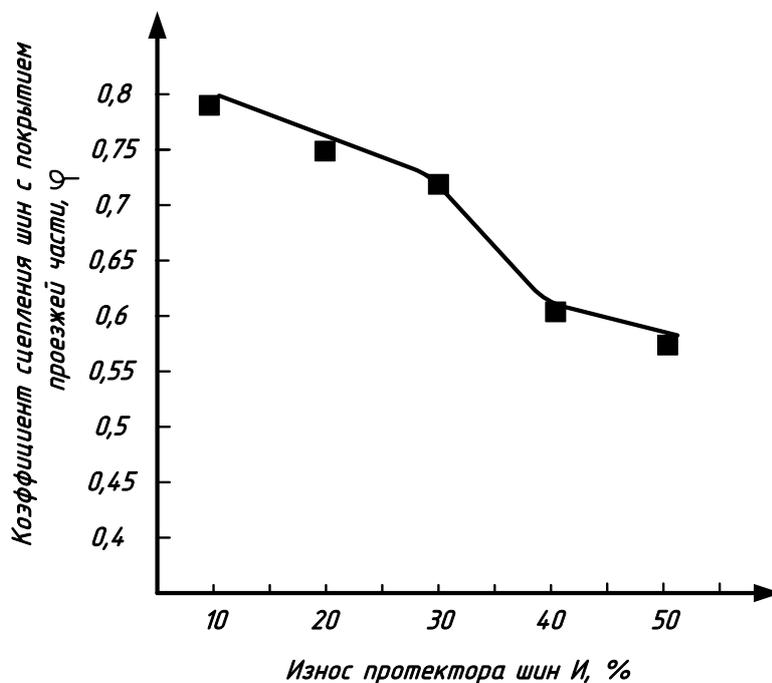


Рисунок 2 – Влияние износа протектора шин на коэффициент сцепления

Таким образом, полученные нами поправочные коэффициенты необходимо подставить в ранее рассмотренное выражение для расчета коэффициента сцепления и получим следующее выражение:

$$\varphi_{\phi} = \varphi_n \cdot k_{ДП} \cdot k_{СП} \cdot k_{ш} \cdot k_{шг} \cdot k_{ров} \cdot k_{кол} \cdot k_i \cdot k_{i_{нон}} \cdot k_p \cdot k_{t_{ш}} \cdot k_{t_{д}} \cdot k_{t_{ос}} \cdot K_{(нопр)max} \cdot K_u$$

где K_u – поправочный коэффициент учитывающий износ шин; $K_{(нопр)max}$ – поправочный коэффициент учета давления в шинах автомобиля.

3 Результаты исследований

Полученное выражение для расчета сцепления рекомендуется использовать при проведении автотехнической экспертизы ДТП, для установления технической возможности у водителя избежать происшествия при возникновении аварийной ситуации.

Рассмотрим, насколько изменяется значение скорости движения транспортного средства, рассчитанное с применением установленной методики в САТЭ от вычисленного с использованием корректирующих коэффициентов.

Рассмотрим случай экстренного торможения автомобиля Хендай Солярис на сухом, ровном, чистом асфальтобетонном покрытии проезжей части, зафиксированная длина следа юза составила 20 м, при этом давление в шинах составляло 2,2 МПа, а износ их протектора – 30 % от исходного значения. В результате расчетов по установленной методике вычисляем значение скорости перед началом торможения, км/ч:

$$V_a = 3,6 \cdot (0,5 \cdot 0,4 \cdot 6,2 + \sqrt{2 \cdot 20 \cdot 6,2}) = 61$$

В тоже время расчет с учетом скорректированного значения коэффициента сцепления шин с дорогой дает следующее значение скорости движения, км/ч :

$$V_a = 3,6 \cdot (0,5 \cdot 0,4 \cdot 5,05 + \sqrt{2 \cdot 20 \cdot 5,05}) = 55$$

Расчеты показывают, что даже при равных остальных условиях эксплуатационное состояние шин автомобиля существенно влияет на его тормозной путь, а, соответственно, определяет обоснованность экспертных решений в судебной практике по ДТП.

4 Обсуждение и заключение

В результате выполненных исследований установлено, что достаточно большой вклад в отклонение величины коэффициента сцепления от нормативных значений вносит разность давлений в шинах и их износ в процессе эксплуатации. Выполненные теоретические и эмпирические исследования позволили получить поправочные коэффициенты, позволяющие нивелировать разницу нормативных и фактических значений. Данные поправочные коэффициенты могут быть рекомендованы для использования экспертами-автотехниками в своей практики для повышения достоверности расчетов и выводов.

Список литературы

- 1 Драгунов, А. Ф. Некоторые особенности проведения автотехнической экспертизы дорожно-транспортных происшествий [Текст] / Драгунов А.Ф., Ляпустин П.К., Минько А.М. // Сборник научных трудов ангарского государственного технического университета - 2008. - №1. - С. 26-29. - EDN RDIMZT.
- 2 Тарасов, Е. А. Пример судебной автотехнической экспертизы по исследованию обстоятельств ДТП [Текст] / Тарасов Е.А., Волков Н.М., Дегтев Д.Н., Никитин С.А., Щиенко А.Н. // Высокие технологии в строительном комплексе - 2021. - №2. - С. 116-124. - EDN DIJELR.
- 3 Шашко, Ю. В. Сущность и значение судебной автотехнической экспертизы [Текст] / Шашко Ю.В. // Тенденции развития науки и образования - 2023. - №9 6-6. - С. 103-106. - EDN JYBDNX.
- 4 Петрова, М. Г. Проблемы и несовершенство назначения и проведения автотехнической экспертизы [Текст] / Петрова М.Г., Мамонтова Э.А. // Новое слово в науке: перспективы развития. - 2015. - №4(6). - С. 296-297. - EDN XXXTER.
- 5 Аметов, В. А. Проблемы автотехнической экспертизы: химмотологический подход [Текст] / Аметов В.А., Беляев М.К., Зубрицкий А.В., Шальков А.В. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2020. - №4. - С. 15-27. - EDN YFBSCB.

- 6 Агафонов, А. С. Алгоритм действий эксперта-автотехника при производстве судебной автотехнической экспертизы по исследованию маркировочных обозначений транспортных средств [Текст] / Агафонов А.С. // Криминалистика: вчера, сегодня, завтра. - 2023. - №1(25). - С. 7-22. - EDN UAUOHF.
- 7 Багичев, С. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния рамы автоприцепа - комплексный инструмент в производстве автотехнической экспертизы [Текст] / Багичев С. А., Прошин Д. Н., Алтышев А. И. // Транспортные системы. - 2023. - №3 (29). - С. 28-37. - EDN FWZXCXV.
- 8 Карев, Б. Н. Обоснование необходимости уточнения основных понятий и формул автотехнической экспертизы [Текст] / Карев Б.Н., Волков А.А. // INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED STUDIES - 2023. - №1. - С. 7-23. - DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-1-7-23>.
- 9 Ефимов А.Д., Биюшкин Н.А. Разработка методики оценки вероятности возникновения аварийно-опасных ситуаций на улично-дорожной сети // Современная наука. 2021. № 5. - С. 29-33. DOI 10.53039/2079-4401.2021.7.5.006.
- 10 Ефимов, А. Д. Субъективный фактор в повышении достоверности экспертных исследований дорожно-транспортных происшествий/ Ефимов А. Д. - Текст: непосредственный // Организация и безопасность дорожного движения: материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения проф. Л. Г. Резника / отв. редактор Д. А. Захаров. - Тюмень: ТИУ, 16 марта 2017 г. - в 2 т. - Т. 1. - С. 268-273.
- 11 Жакулин С.Ш. Применение инновационных технологий при расследовании нарушений правил дорожного движения или эксплуатации транспортных средств лицами, повлекших смерть человека [Текст] / Жакулин С.Ш. // Современный ученый. - 2023. - № 6. - С. 310-319. EDN SBRRMI.
- 12 Семенов, Е. А. Роль специальных знаний при расследовании преступлений в области дорожного движения (Российский и зарубежный опыт) [Текст] / Семенов Е.А., Рожкова А.С. // Общество, право, государственность: ретроспектива и перспектива. - 2023. - № 4(16). - С. 48-53. - EDN WYQQMV.
- 13 Рожков, М. А. Практика применения организационно-технологических средств обеспечения безопасности дорожного движения в регионе [Текст] / Рожков М.А., Шаловал Ж.А. // MODERN SCIENCE. - 2022. - № 6-4. - С. 143-150. -EDN NEPUHF.
- 14 Витолин, С. В. Основы методологии управления транспортными потоками на улично-дорожной сети крупного города при светофорном регулировании [Текст] / Витолин С.В. // Мир транспорта. - 2020. - № 4 (89). - С. 148-155. - DOI 10.30932/1992-3252-2020-18-148-155.
- 15 Царегородцева, Е. А. О возможности использования временных рядов дорожно-транспортной аварийности [Текст] / Царегородцева Е.А. // Современная наука. - 2022. - № 4. - С. 64-66. - EDN ZSHBYI.
- 16 Пумбрасова, Н. В. Проблемные аспекты регулирования тарифов при организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах [Текст] / Пумбрасова Н.В., Упадышева Е.В. // Вестник Екатеринбургского института. - 2021. № 1 (53). - С. 66-75. - EDN RERUYE.
- 17 Зубов, В. В. Оценка влияния модернизации транспортных средств на безопасность транспортных процессов [Текст] / Зубов В. В., Крепаков Д. А., Антоненко Д. В. // Современные прикладные исследования. - 2021. - С. 125-130. - EDN ENMXRE.
- 18 Султанова, Л. М. Анализ факторов, влияющих на вероятность возникновения дорожно-транспортных происшествий / Султанова Л.М., Алиев К.Ш. // Неделя науки-2022. - 2022. - С. 323-324. - EDN BKCMAC.
- 19 Абдулгасис, У. А. К определению продольного и поперечного коэффициентов сцепления шины с полотном дороги при автотехнической экспертизе ДТП [Текст] / Абдулгасис У.А., Абдулгасис А.У., Феватов С.А., Шемиев С.Б. // Вестник современных технологий. - 2016. № 2 (2). - С. 4-13. - EDN YFMTIV.
- 20 Чудакова, Н. В. Влияние сезонности и степени износа шин на установившееся замедление автомобиля [Текст] / Чудакова Н.В. // Вестник гражданских инженеров. - 2016. № 1 (54). - С. 141-145. - EDN VURIBR.

References

- 1 Dragunov A.F. Some peculiarities of the autotechnical examination of road traffic accidents [Text] / Dragunov A.F, Lyapustin P.K.; Minko A.M. // Collection of scientific works of Angarsk State Technical University - 2008. – No 1. - pp. 26-29. - EDN RDIMZT.
- 2 Tarasov E.A. Example of forensic automobile technical expertise to investigate the circumstances of a traffic accident [Text] / Tarasov E.A., Volkov N.M., Degtev D.N., Nikitin S.A., Shchienko A.N. // High technologies in the construction complex - 2021. - No 2. - pp. 116-124. - EDN DIJELR.
- 3 Shashko Y.V. The essence and significance of forensic automobile technical expertise [Text] / Shashko Y.V. // Trends in the development of science and education - 2023. - No 96-6. - pp. 103-106. - EDN JYBDNX.

4 Petrova M.G. Problems and imperfections of the appointment and conduct of automobile technical expertise [Text] / Petrova M.G., Mamontova E.A. // New word in science: prospects of development. - 2015. - No 4(6). - pp. 296-297. - EDN XXXTER.

5 Ametov V.A. Problems of an autotechnical examination: chemotological approach [Text] / Ametov V.A., Belyaev M.K., Zubritskiy A.V., Shalkov A.V. // Transport. Transportation facilities. Ecology. - 2020. - No 4. - pp. 15-27. - EDN YFBSCB.

6 Agafonov, A.S. Algorithm of actions of an expert-autotechnician in the production of forensic automobile technical expertise in the study of markings of vehicles [Text] / Agafonov A.S. // Forensics: yesterday, today, tomorrow. - 2023. - No 1(25). - pp. 7-22. - EDN UAUOHF

7 Bagichev S.A. Modeling of the stress-strain state of the trailer frame - a complex tool in the production of automotive technical expertise [Text] / Bagichev, S.A., Proshin, D.N., Altyshev A.I. // Transport systems. - 2023. - No 3(29). - pp. 28-37. - EDN FWZXCXV.

8 Karev B.N. Justification of the necessity to clarify the basic concepts and formulas of automobile technical expertise [Text] / Karev B.N., Volkov A.A. // INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED STUDIES - 2023. - No 1. - pp. 7-23. - DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-1-7-23>

9 Efimov A.D., Biyushkin, N.A. Development of a methodology for estimating the probability of emergency-hazardous situations on the street-road network // Modern Science. 2021. No 5. - pp. 29-33. DOI 10.53039/2079-4401.2021.7.5.006.

10 Efimov A. D. Subjective factor in increasing the reliability of expert studies of road traffic accidents / Efimov A. D. - Text: direct // Organization and safety of road traffic: proceedings of the X International Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of the birth of Prof. L. G. Reznik / editor-in-chief D. A. Zakharov. - Tyumen: TIU, March 16, 2017. - In 2 vol. - T. 1. - pp. 268-273.

11 Zhakulin S.Sh. Application of innovative technologies in the investigation of violations of traffic rules or operation of vehicles by persons who caused the death of a person [Text] / Zhakulin S.Sh. // Modern scientist. - 2023. - No 6. - pp. 310-319. EDN SBRRMI.

12 Semenov E.A. The role of special knowledge in the investigation of traffic offenses (Russian and foreign experience) [Text] / Semenov E.A., Rozhkova A.S. // Society, law, statehood: retrospect and prospect. - 2023. - No 4(16). - pp. 48-53. - EDN WYQQMV.

13 Rozhkov M.A. Practice of application of organizational and technological means of road traffic safety in the region / Rozhkov M.A., Shaloval. J.A. // MODERN SCIENCE. - 2022. - No 6-4. - pp. 143-150. - EDN HEPUHF.

14 Vitolin S.V. Fundamentals of the methodology of traffic flow control on the street-road network of a large city under traffic light regulation [Text] / Vitolin S.V. // World of Transport. - 2020. - No 4 (89). - pp. 148-155. - DOI 10.30932/1992-3252-2020-18-148-155.

15 Tsaregorodtseva E.A. On the possibility of using time series of road traffic accidents [Text] / Tsaregorodtseva E.A. // Modern Science. - 2022. - No 4. - pp. 64-66. - EDN ZSHBYI

16 Pumbrasova N.V. Problem aspects of tariff regulation in the organization of regular passenger transportation on municipal routes [Text] / Pumbrasova N.V., Upadyшева E.V. // Bulletin of Ekaterininsky Institute. - 2021. No 1 (53). - pp. 66-75. - EDN RERUYE.

17 Zubov V.V. Evaluation of the impact of vehicles modernization on the safety of transport processes / Zubov V.V., Krepakov, D.A., Antonenko, D.V. // Modern Applied Research. - 2021. - pp. 125-130. - EDN ENMXRE.

18 Sultanova L.M. Analysis of factors affecting the probability of road traffic accidents / Sultanova L.M., Aliyev K.Sh. // Week of Science-2022. - 2022. - pp. 323-324. - EDN BKCMAC.

19 Abdulgazis U.A. To determine the longitudinal and transverse coefficients of adhesion of the tire with the roadbed in the autotechnical examination of traffic accidents [Text] / Abdulgazis U.A., Abdulgazis A.U., Fevatov S.A., Shemiev S.B. // Bulletin of Modern Technologies. - 2016. No 2 (2). - pp. 4-13. - EDN YFMTIV.

20 Chudakova N.V. Influence of seasonality and degree of tire wear on the steady-state deceleration of the car [Text] / Chudakova N.V. // Bulletin of Civil Engineers. - 2016. No 1 (54). - pp. 141-145. - EDN VURIBR.

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-52-63



УДК 656.13

UDC 656.13

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАССАЖИРСКИХ АВТОБУСНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ПРИМЕРЕ МАРШРУТА № 169А Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

PASSENGER OPTIMIZATION BUS TRANSPORTATION ON EXAMPLE OF ROUTE №169A ST. PETERSBURG

✉¹ Шаврина Валентина Сергеевна, студент, Санкт-Петербургский Горный университет Императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, e-mail: shavrinavalentina@yandex.ru

✉¹ Shavrina Valentina Sergeevna, student, St. Petersburg Mining university of Empress Catherine II, St. Petersburg, e-mail: shavrinavalentina@yandex.ru

Чудакова Наталья Вячеславовна, к.т.н., доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский Горный университет Императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург.

Chudakova Natalia Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, associate professor of the department of transport technological processes and machines, St. Petersburg Mining university of Empress Catherine II, St. Petersburg.

Аннотация. В статье представлена характеристика исследуемого маршрута, выбран метод обследования пассажиропотоков, с помощью которого в дальнейшем проведены соответствующие исследования. На основании полученных данных в качестве мероприятий по оптимизации маршрута решено изменить расписание движения автобусов. Таким образом, предложенное мероприятие позволило добиться снижения эксплуатационных затрат предприятия, при этом не снижая социальную эффективность.

Annotation. The article contains the characteristics of the route under study, a method of surveying passenger flows was selected, with the help of which corresponding studies were subsequently carried out. Based on the data obtained, it was decided to change the bus schedule as measures to optimize the route. Thus, the proposed measure made it possible to reduce the operating costs of the enterprise without reducing social efficiency.

Ключевые слова: ГОРОДСКОЙ ОБЩЕСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТ, ПАССАЖИРОПОТОК, ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ, ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ, РАСПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ.

Keywords: URBAN PUBLIC TRANSPORT, PASSENGER FLOW, ECONOMIC EFFECT, PASSENGER TRANSPORTATION, TRAFFIC SCHEDULE.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Общественный транспорт оказывает значительное влияние на обеспечение социально-экономического развития всех населенных пунктов Российской Федерации, особенно городов-миллионников, одним из которых является город Санкт-Петербург. Исходя из данных,

представленных Комитетом по транспорту Санкт-Петербурга автобусные перевозки занимают второе место после метрополитена по количеству перевезенных пассажиров [1], что подтверждает значимость автобусных перевозок для населения северной столицы.

Ведущую роль в системе городского транспорта общего пользования в сфере автобусных перевозок играет Санкт-Петербургское государственное унитарное предприятие пассажирского автомобильного транспорта (СПб ГУП «Пассажиравтотранс») [2]. Ежегодно подвижной состав предприятия перевозит более 300 млн. пассажиров по 101 городскому и пригородному маршруту [2]. Отмечая важность и значимость данного предприятия в транспортной системе Санкт-Петербурга, было принято решение в качестве объекта исследования выбрать один из маршрутов, обслуживаемых СПб ГУП «Пассажиравтотранс». Именно поэтому в настоящей работе будет рассмотрен городской автобусный социальный маршрут № 169А «Станция метро Площадь Александра Невского – Московский вокзал».

Характерная особенность автобусного маршрута №169А заключается, в первую очередь, в том, что в связи с закрытием на реконструкцию станции метро «Чернышевская», данный маршрут обеспечивает транспортную доступность той части населения, которая временно осталась без возможности воспользоваться ближайшей станцией метро, поскольку трасса автобусного маршрута, пролегает между станциями метро «Площадь Александра Невского» и «Площадь Восстания». В этой связи было решено более подробно изучить данный маршрут, в результате чего выявить недостатки и предложить мероприятия для их решения.

Актуальность работы обусловлена сложностью организации пассажирских перевозок в условиях городов-миллионников, а также необходимостью обеспечения качественного транспортного обслуживания населения. Показатели, характеризующие качество транспортного обслуживания, и которые учитываются в данной работе, отображены в соответствующих ГОСТах, Социальном стандарте и Правилах перевозок пассажиров [3-7]. Цель данной работы заключается в разработке мероприятий по оптимизации автобусного маршрута №169А, а объектом исследования выступает вышеуказанный маршрут.

Практическая значимость проведенных исследований в рамках данной работы состоит в возможности применения разработанных мероприятий организации маршрутов движения общественного транспорта, повышающих экономический эффект предприятий, осуществляющих перевозки пассажиров.

Научная новизна заключается в следующем:

- установлено фактическое количество пассажиропотока на исследуемом участке;
- определены остановочные пункты с наибольшим пассажирообменом;
- разработаны мероприятия для оптимизации организации маршрутов движения общественного транспорта, повышающих экономический эффект предприятий.

Автобусный маршрут № 169А обслуживает Центральный район Санкт-Петербурга и является маршрутом с перекрывным тарифом. Количество остановок на маршруте – 18 в прямом направлении и 19 в обратном направлении. Длина маршрута же составляет 7,42 км и 8,21 км в прямом и обратном направлении соответственно [8]. Исследуемый маршрут имеет несколько крупных пассажирообразующих пунктов, таких как: большой концертный зал «Октябрьский», торговый центр «Галерея», Таврический сад, различные медицинские и образовательные учреждения и т.д.

На маршруте эксплуатируется подвижной состав производства Ликийского автобусного завода – ЛиАЗ 5292. Данная модель автобуса является низкопольной, большого класса, для городских перевозок и обладает пассажироместимостью в размере 111 человек [9]. Подвижной состав эксплуатируется на маршруте с 06:00 до 00:00 по будним дням.

Одной из важнейших характеристик автобусного маршрута является расчет технико-эксплуатационных показателей работы подвижного состава. Данные показатели представлены в виде табл.1. В качестве исходных данных для определения технико-эксплуатационных показателей взята информация с официального сайта «Организатор перевозок» [10].

Таблица 1 - Техничко-эксплуатационные показатели

Техничко-эксплуатационный показатель	Прямое направление	Обратное направление
Время движения ($t_{дв}$), ч	0,323	0,4
Время простоя на промежуточных остановочных пунктах ($t_{по}$), ч	0,0117	0,0117
Время сообщения (t_c), ч	0,53	0,6
Время рейса (t_p), ч	0,55	0,6
Среднетехническая скорость (V_T), км/ч	22,97	20,525
Скорость сообщения (V_C), км/ч	14	13,68
Эксплуатационная скорость ($V_э$), км/ч	13,49	13,68
Производительный пробег (L_M), км	912,66	1 009,83
Нулевой пробег суточный (L_H), км	159,2	
Общий пробег за сутки ($L_{общ\ сут}$), км	2 149,49	
Коэффициент использования пробега (β)	0,89	
Коэффициент нулевых пробегов (ω)	0,074	

Важно отметить, что нулевой пробег определяется для всего подвижного состава, работающего на маршруте, в совокупности, поскольку каждый автобус в зависимости от начального и конечного пункта маршрута имеет отличное от других значение нулевого пробега.

Таким образом, была отмечена высокая значимость СПб ГУП «Пассажиравтотранс» в транспортной системе Санкт-Петербурга, обоснован выбор исследуемого автобусного маршрута, представлена его характеристика и особенности.

2 Материалы и методы

Для проведения необходимых мероприятий в области оптимизации маршрута необходимо, в первую очередь, определить спрос на предоставляемые услуги по перевозке пассажиров городским общественным транспортом. В этой связи, требуется проведение обследования пассажиропотоков, которые характеризует количество пассажиров, проезжающих в определенный момент времени в одном направлении [11].

Виды обследования пассажиропотоков подразделяются на четыре группы, в зависимости от способа проведения измерений [12]. Данные группы представлены на рис. 1 в виде схемы.



Рисунок 1 – Виды обследования пассажиропотоков

В ходе работы в качестве метода обследования пассажиропотоков был выбран один из натуральных методов, а именно – визуальный (глазомерный) метод.

Визуальный метод заключается в фиксации фактического количества вошедших и вышедших пассажиров на каждом остановочном пункте. Преимущество данного метода заключается в том, что с его помощью можно получить информацию о наполняемости подвижного

состава по конкретным участкам маршрута. Кроме того, использование визуального метода рационально для остановочных пунктов, которые характеризуются большими значениями пассажирообмена [11].

Таким образом, из всех возможных методов обследования пассажиропотоков был выбран наиболее подходящий и эффективный способ, непосредственно с помощью которого были проведены дальнейшие исследования.

3 Результаты исследований

В результате проведения обследования пассажиропотоков была собрана информация по количеству входящих и выходящих пассажиров, а также по наполнению салона автобуса в прямом и обратном направлении.

Затем были представлены значения максимального пассажиропотока по часам суток в прямом и обратном направлениях в виде эпюры, для чего рассчитали значения максимального пассажиропотока в прямом и обратном направлениях по формуле 1:

$$Q_{\text{час}} = Q_{\text{max}} \cdot n_{p/\text{ч}}, \text{ пасс./ч}, \quad (1)$$

где Q_{max} – максимальное значение количества пассажиров, находящихся в салоне автобуса за рейс, чел.; $n_{p/\text{ч}}$ – число рейсов, которое совершается за определенный период (час), ед.

Количество рейсов за каждый час было определено в соответствии с расписанием движения автобусов на маршруте.

Пример собранных данных для определения пассажиропотока для соответствующих остановочных пунктов, а также максимального значения количества пассажиров, находящихся в салоне автобуса за рейс представлен в табл. 2.

Таблица 2 - Данные исследования пассажиропотока на рейсе 8.00-9.00 (прямое направление; утренний час пик)

Остановочные пункты	Вошло пассажиров	Вышло пассажиров	Пассажиров в салоне
Ст. метро Площадь Ал. Невского	16	10	17
Исполкомская ул.	5	0	22
Конная ул.	2	0	24
Пр. Бакунина	0	0	24
8-я Советская ул., уг. Новгородской ул.	0	3	21
Ул. Моисеенко	2	6	17
Кирочная ул. уг. Суворовского пр.	0	1	16
Тульская ул.	0	3	13
Лафонская ул.	6	2	17
Смольный собор	21	0	38
Шпалерная ул., уг. Таврической ул.	12	0	50
Шпалерная ул., уг. Потемкинской ул.	8	2	56
Ул. Чайковского	5	1	60
Потемкинская ул.	2	0	62
Ст. метро Чернышевская	8	3	67
Ул. Некрасова	0	1	66
Ковенский пер.	0	11	55
БКЗ Октябрьский	0	18	37
Московский вокзал	0	37	0
Всего	87	98	662

Аналогично были определены значения максимального пассажиропотока в течение суток. Затем, используя полученную информацию, были построены эпюры распределения пассажиропотока по часам суток в прямом и обратном направлениях, которые представлены на рис. 2 – 3.

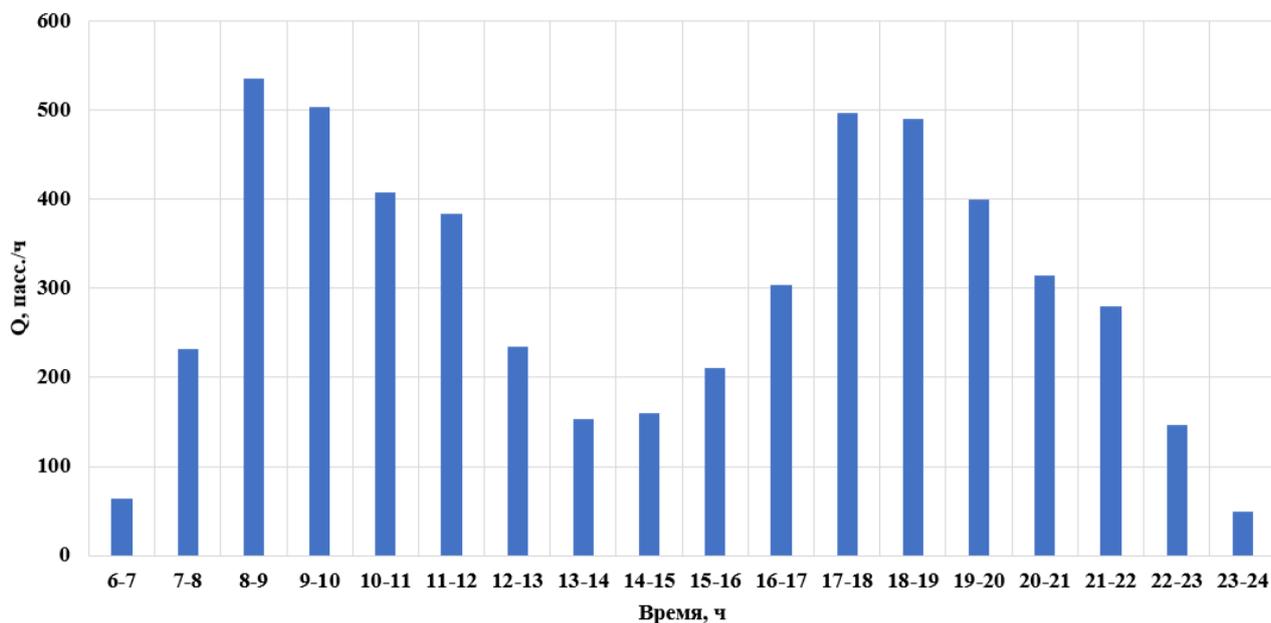


Рисунок 2 – Эпюра распределения пассажиропотока по часам суток (прямое направление)

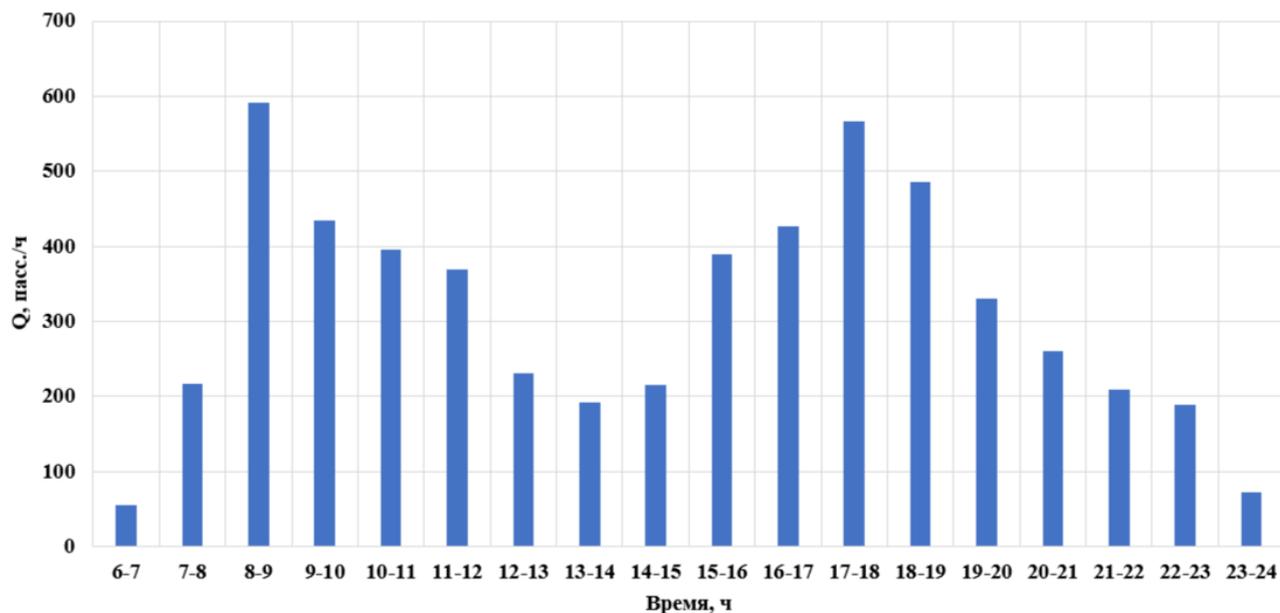


Рисунок 3 – Эпюра распределения пассажиропотока по часам суток (обратное направление)

Далее полученных значения по пассажиропотоку по часам суток в прямом и обратном направлениях были проанализированы, вследствие чего был отмечен значительный спад, который приходится на промежуток с 11 до 15 часов, так называемый «межпиковый период».

Для определения суточного объема перевозок была построена гистограмма, аналогичная рис.4 – 5, но тремя ключевыми точками уже были не данные по наполнению подвижного состава, а количество пассажиров, купивших билет с учетом количества выполненных за час рейсов.

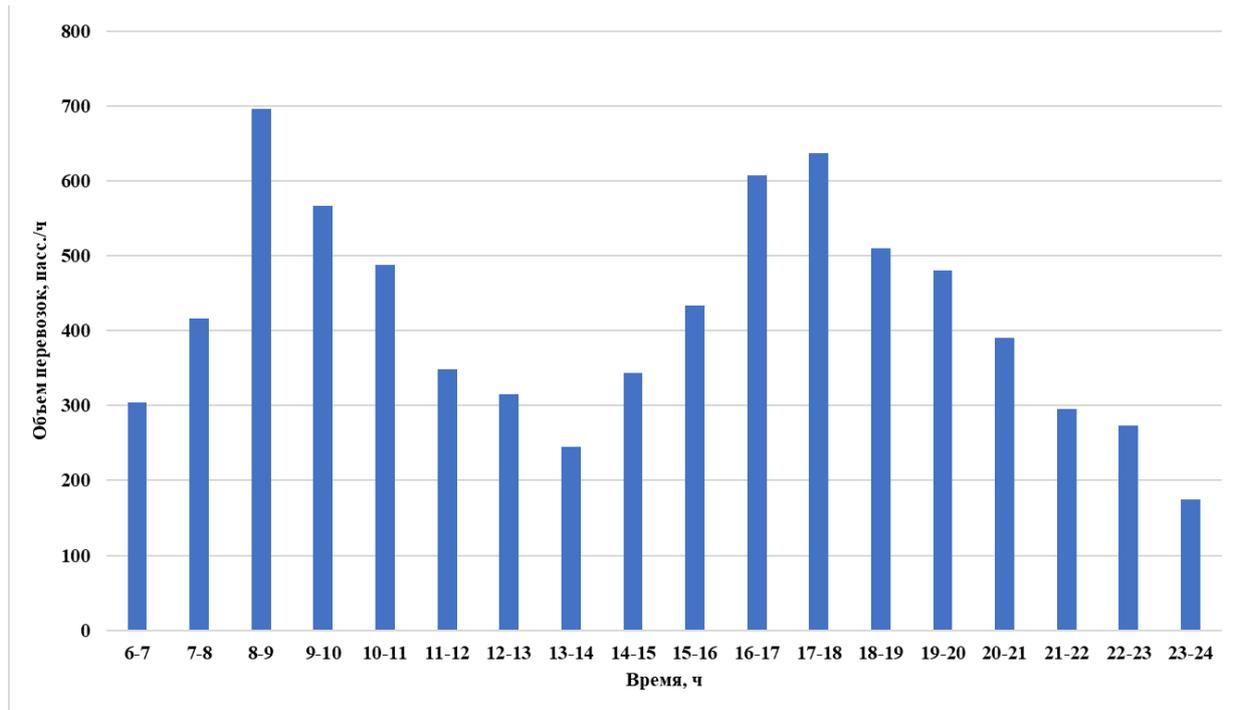


Рисунок 4 – Объем перевозок (прямое направление)

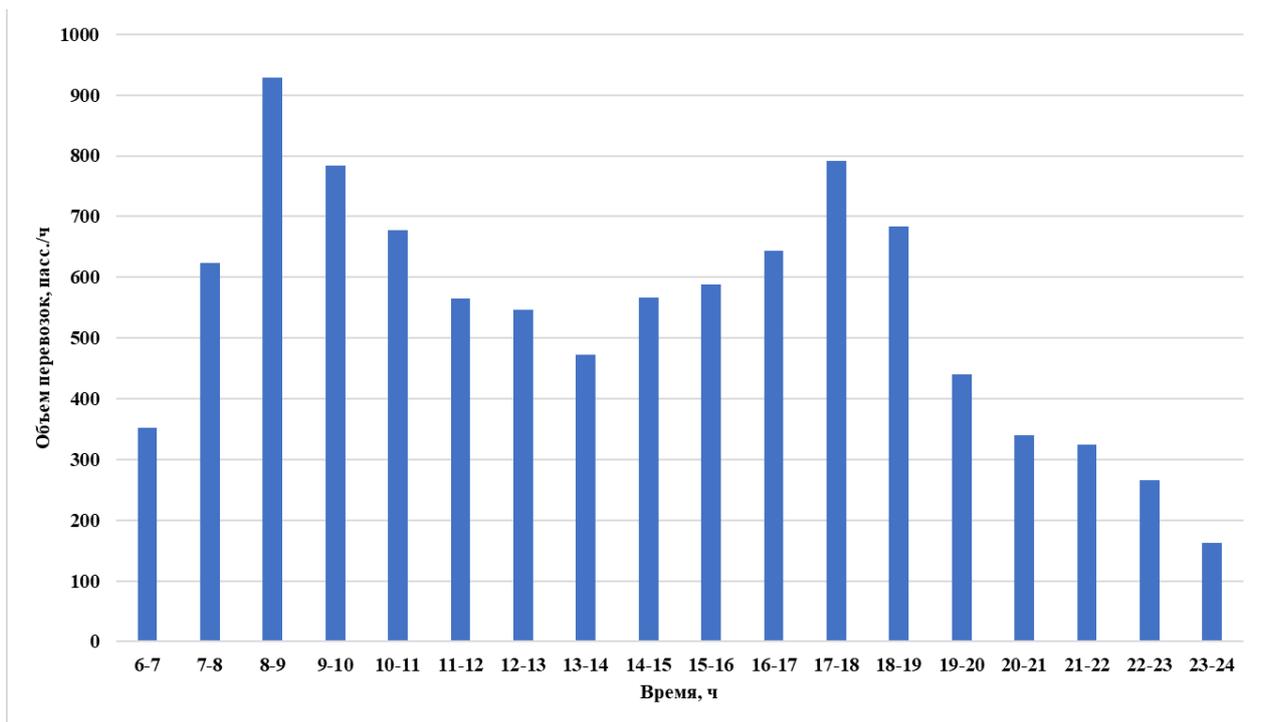


Рисунок 5 – Объем перевозок (обратное направление)

Далее был просуммирован объем перевозок в прямом и обратном направлении и определено количество пассажиров, перевезенных за сутки – 17 280 пасс/сут.

Затем, используя данные об отправлении и прибытии подвижного состава с сайта «TransportSPb» [8], было определено необходимое количество автобусов для обеспечения уста-

новленного интервала движения. Согласно исходным данным, подвижной состав, обслуживая автобусный маршрут №169А, ежедневно совершает 123 рейса, для обеспечения которых, необходимо 14 единиц подвижного состава.

В качестве примера закрепления автобусов за конкретными рейсами было представлено в виде графика расписание отправления автобусов в прямом направлении с начала движения подвижного состава до конца утреннего часа пик с учетом особенностей труда и отдыха водителей [13]. График отображен на рис. 6. Аналогично произведено закрепление автобусов за рейсами в течение всего дня.

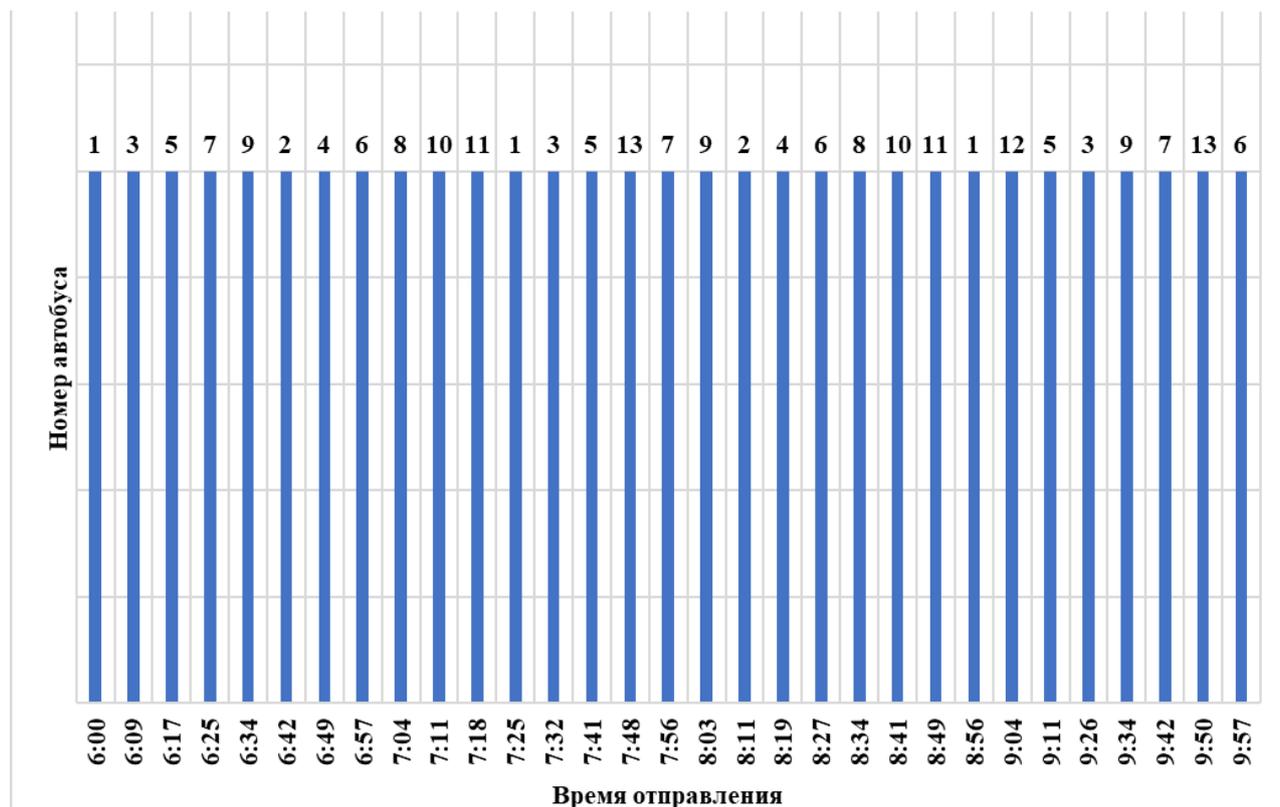


Рисунок 6 – Закрепление автобусов за рейсами в базовом варианте

Таким образом, изучив данные автобусному маршруту № 169А, а именно значения пассажиропотока и расписание движения автобусов, было решено, что в рамках оптимизации маршрута целесообразно будет сократить количество рейсов. Это объясняется, в первую очередь, спадом пассажиропотока в «межпиковый период» и низкой наполняемостью автобусов по сравнению с их номинальной пассажироместимостью. Изменение расписания движения автобусов позволило сократить требуемое количество автобусов на маршруте, что в свою очередь снизило эксплуатационные затраты предприятия.

Важно отметить, что в процессе составления нового расписания движения автобусов также были учтены расписания движения дублирующих маршрутов [14,15].

Для наглядного сравнения базового варианта с проектируемым было представлено в виде графика, который представлен на рис.7, расписание отправления автобусов в прямом направлении с начала движения подвижного состава до конца утреннего часа пик.

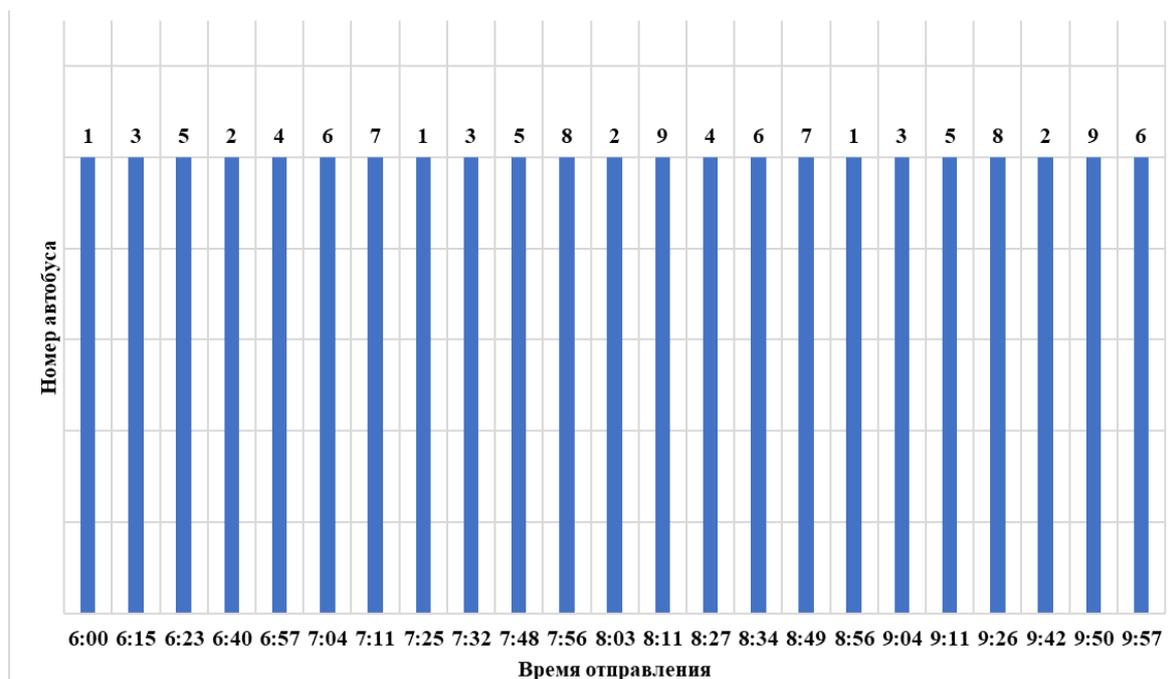


Рисунок 7 – Закрепление автобусов за рейсами в проектируемом варианте

Таким образом, в результате изменения расписания движения автобусов по маршруту 169А, количество рейсов в проектируемом варианте сократилось до 93. Далее было определено, что для обслуживания данного количества рейсов, в результате закрепления автобусов, требуется 10 единиц подвижного состава, что, в свою очередь, на 4 единицы меньше, чем в базовом варианте.

Далее, согласно исследованию, удалось провести сравнительный анализ объема перевозок до и после проведения предложенного мероприятия. В качестве исходных данных взята информация, полученная в результате обследования пассажиропотоков натурным методом.

Изучив данные по пассажиропотоку в базовом варианте, можно сделать вывод о том, что в проектируемом варианте только 20% пассажиров, перевезенных за сутки, в результате увеличения интервала движения автобуса, следующего по маршруту №169А, могут воспользоваться дублирующими маршрутами, оставшиеся 80% будут дожидаться маршрут №169А. Это обосновано следующим. Наибольшее количество пассажиров садится на остановках «Смольный собор» - 13 пасс., «Смольный» - 15 пасс., «ул. Моисеенко» - 29 пасс. и «ст. метро Площадь Ал. Невского» - 16 пасс., «Шпалерная ул.» - 10 пасс., а также «10-я Советская ул.» - 2 пасс. «Синопская наб.» - 3 пасс., которые не имеют дублирующих маршрутов, вследствие чего можно утверждать, что пассажиры будут дожидаться именно исследуемого маршрута.

Далее был рассчитан процент пассажиров, сложив количество пассажиров, зашедших на остановках, не имеющих дублирующих маршрутов, и разделив на общее количество зашедших пассажиров, %:

$$Q_{\%1} = \frac{Q_{с.с.} + Q_{с.} + Q_{у.м.} + Q_{пл.а.} + Q_{ш.у.} + Q_{10.с} + Q_{с.н.}}{Q_{общ.пр.}} = \frac{13 + 15 + 29 + 16 + 10 + 2 + 3}{113} = 78. \quad (2)$$

Кроме того, большая часть пассажиров выходит на остановках «Амбарная» - 69 пасс. и «ст. метро Площадь Ал. Невского» - 10 пасс., до которых не проложены трассы дублирующих маршрутов, что в свою очередь говорит о том, что наибольшему количеству пассажиров необходимо добраться до этих остановок, воспользовавшись маршрутом №169А.

Рассчитана доля (%) пассажиров, сложив количество пассажиров, вышедших на этих остановках и разделив на общее количество вышедших пассажиров:

$$Q_{\%2} = \frac{Q_A + Q_{пл.А.}}{Q_{общ.обр.}} = \frac{69 + 10}{96} = 82. \quad (3)$$

Далее найдено среднее от полученных значений:

$$Q_{\%} = \frac{Q_{\%1} + Q_{\%2}}{2} = \frac{78 + 82}{2} = 80. \quad (4)$$

Соответственно, можно утверждать, что, согласно проведенным выше расчетам, объем перевозок за сутки после изменения расписания движения автобусов будет составлять 80 % от объема перевозок в базовом варианте и будет равен соответственно 13824 пасс/сут.

Затем была аргументирована рациональность и уместность предложенного мероприятия, для чего, в свою очередь, были произведены соответствующие расчеты, в результате которых определен годовой экономический эффект [16] с помощью формулы 5.

$$\Delta_{год} = (C_{экспл баз} + E_n KB_{баз}) \frac{Q_{год пр}}{Q_{год баз}} - (C_{экспл пр} + E_n KB_{пр}), \text{ руб./год}, \quad (5)$$

где $C_{экспл баз}$ и $C_{экспл пр}$ – эксплуатационные затраты в базовом и проектируемом вариантах, руб./год; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (на автотранспорте 0,15); $KB_{баз}$ и $KB_{пр}$ – капитальные вложения в базовом и проектируемом вариантах, руб.; $Q_{год пр}$ и $Q_{год баз}$ – объем перевозок в базовом и проектируемом вариантах, пасс./год.

Первым шагом в базовом и в проектируемом варианте были проведены расчеты эксплуатационных затрат и капитальных вложений [17], для чего, соответственно, были использованы формулы 6 и 7.

$$KB = A_{сп} S_{пс}, \text{ руб}, \quad (6)$$

где $A_{сп}$ – количество автобусов списочное, ед.; $S_{пс}$ – стоимость автобуса, руб./ед.

$$C_{эксп} = C_{зп} + C_{топл} + C_{см} + C_{ш} + C_{тоир} + C_{ам} + C_{накл}, \quad (7)$$

где $C_{зп}$ – заработная плата водителей руб./год; $C_{топл}$ – затраты на топливо, руб./год; $C_{см}$ – затраты на смазочные и другие эксплуатационные материалы, руб./год; $C_{ш}$ – затраты на приобретение и ремонт шин, руб./год; $C_{тоир}$ – затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт, руб./год; $C_{ам}$ – затраты на амортизацию, руб./год; $C_{накл}$ – накладные расходы, руб./год [18].

Так, например, при расчете затрат на шины был использован "Акт министерств и ведомств "РД 3112199-1085-02. Временные нормы эксплуатационного пробега шин автотранспортных средств" [19], а при расчете затрат на топливо - Акт министерств и ведомств "РД 3112199-1085-02. Временные нормы эксплуатационного пробега шин автотранспортных средств" [20].

Затем была рассчитана рентабельность перевозок в проектируемом и в базовом варианте по формуле 8.

$$R = \frac{\Pi}{C_{экспл}} 100, \%. \quad (8)$$

Для расчета рентабельности необходимо определить результирующие экономические показатели, а именно – доход и прибыль с помощью формул 9 и 10.

$$D = Q_{\text{год}} C_{\text{б}}, \text{руб./год}; \quad (9)$$

$$П = D - C_{\text{экспл.}} \text{руб./год.} \quad (10)$$

Все данные, полученные в ходе расчета вышеперечисленных показателей, представлены в виде табл. 3.

Таблица 3 - Экономические показатели

Экономические показатели	Базовый вариант	Проектируемый вариант
Заработная плата водителей ($C_{\text{зп}}$), руб./год	22 157 989,96	16 158 189,9
Затраты на топливо ($C_{\text{т}}$), руб./год	25 175 572,77	18 969 200,1
Затраты на смазочные материалы ($C_{\text{см}}$), руб./год	3 776 335,916	2 845 380,01
Затраты на приобретение и ремонт шин ($C_{\text{ш}}$), руб./год	1 113 435,82	838 947,62
Затраты на ТО и ТР ($C_{\text{ТОиР}}$), руб./год	835 076	29 210,715
Затраты на амортизацию ($C_{\text{ам}}$), руб./год	14 196 306,71	10 696 582,2
Накладные расходы ($C_{\text{накл}}$), руб./год	13 294 793,98	9 694 913,94
Эксплуатационные затраты ($C_{\text{эксп}}$), руб./год	80 549 512,02	59 832 424,4
Капитальные вложения на подвижной состав (КВ), руб.	240 000 000	165 000 000
Доход (D), руб./год	89 510 400	71 608 320
Прибыль (П), руб./год	8 960 887,98	11 775 896
Рентабельность (R), %	11,125	19,68
Экономический эффект (Э), руб./год	61 104 466	

Транспорт общего пользования, в частности автобусный, в первую очередь, обеспечивает потребности населения в передвижении. Именно поэтому в процессе оптимизации транспортного обслуживания необходимо осознавать социальную значимость предложенных изменений для пассажиров. В этой связи, несмотря на положительный экономический эффект от проведенных мероприятий, важно отметить, что в результате совершенствования маршрута, качество транспортного обслуживания пассажиров по сравнению с базовым вариантом не пострадало. Это обусловлено наличием дублирующих автобусных маршрутов и их согласованному расписанию рейсов, благодаря чему средний интервал движения вследствие проведения предложенного мероприятия увеличился меньше, чем на одну минуту.

Таким образом, в ходе проведения исследования пассажиропотоков на автобусном маршруте №169А и выявления значительного спада наполняемости подвижного состава в «межпиковый период», было уменьшено количество рейсов, в результате чего сократились эксплуатационные затраты предприятия и возросла рентабельность.

4 Обсуждение и заключение

В ходе проделанной работы был рассмотрен базовый вариант перевозки пассажиров автобусным маршрутом №169А и предложено мероприятие для его оптимизации. На основании полученных данных было принято решение изменить расписание движения автобусов на маршруте, а именно – сократить количество рейсов.

Таким образом, для обоснования предложенных мероприятий были рассчитаны эксплуатационные затраты в базовом и проектируемом варианте, и с помощью сравнительного анализа определены результирующие экономические показатели. В результате удалось сократить требуемое количество автобусов, уменьшить пробег подвижного состава, вследствие чего сократить эксплуатационные затраты. Кроме того, годовой экономический эффект оказался положителен и равен 61 104 466 руб., а прибыль возросла на 2 815 008,02 руб., следовательно, можно сделать вывод о том, что проектируемый вариант оказался выгоднее для предприятия, что также подтверждает увеличение рентабельности с 11,125 % в базовом варианте до 19,68 % в проектируемом.

Список литературы

- 1 Комитет по транспорту Санкт-Петербурга: официальный сайт. – Санкт-Петербург. – URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/
- 2 Маршруты / [Электронный ресурс] // СПб ГУП Пассажиравтотранс – URL: <https://www.avtobus.spb.ru/?ysclid=luvm9ykt6l489707806>
- 3 ГОСТ 51006-96 – Услуги транспортные. Термины и определения: дата введения 1997-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1997. – 11 с.
- 4 ГОСТ 51825-2001 – Услуги пассажирского автомобильного транспорта. Общие требования: дата введения 2002-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 13 с.
- 5 ГОСТ 51004-96 – Услуги транспортные. Пассажирские перевозки. Номенклатура показателей качества: дата введения 1997-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 8 с.
- 6 Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом: распоряжение Министерства транспорта Российской Федерации от 31 января 2017 г. № НА-19-р (в ред. распоряжений Минтранса России от 18.10.2023 № КБ-46-р). – М., 2017. – 27 с.
- 7 Правила перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом: утверждены Постановлением Правительства РФ от 14.02.2009 N 112. – М.: 2009. – 22 с.
- 8 Маршрут автобуса 169А на карте СПб / [Электронный ресурс] // TransportSPb. – URL: https://transportspb.com/find/avtobus_169A?ysclid=lpb71q3dh258290227
- 9 ЛиАЗ 5292 низкопольный автобус – характеристики / [Электронный ресурс] // bus.ru. – URL: <https://bus.ru/buses/liaz-5292-restayling/?ysclid=lpb74qt05o972388990>
- 10 СПб ГКУ «Организатор перевозок»: официальный сайт. – Санкт-Петербург. – URL: <https://orgp.spb.ru/?ysclid=luz93z5gbs548203397>
- 11 Менухова Т.А. Методические рекомендации по выполнению курсовой работы по учебной дисциплине «Пассажирские перевозки» / Санкт-петербургский горный университет - 2017. – С.: - 22 с.
- 12 Ларин О.Н. Пассажирские перевозки: учебное пособие / О.Н. Ларин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 121 с.
- 13 Об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха водителей автомобилей: положение утв. Приказом Минтранса России от 20.08.2004 N 15. – М.: 2004. – 10 с.
- 14 Маршрут автобуса 105 на карте СПб / [Электронный ресурс] // TransportSPb. – URL: https://transportspb.com/find/avtobus_105?ysclid=lpb71q3dh258290227
- 15 Маршрут автобуса 136 на карте СПб / [Электронный ресурс] // TransportSPb. – URL: https://transportspb.com/find/avtobus_136?ysclid=lpb71q3dh258290227
- 16 Матанцева О.Ю. Основы экономики автомобильного транспорта : учебное пособие / О.Ю. Матанцева. – М. : Юстицинформ, 2020. – 256 с.
- 17 Семенихин, В. В. Перевозки и автотранспорт / В. В. Семенихин. — 5-е изд., перераб. и доп. — Москва : ГроссМедиа, 2019. — 1112 с. — ISBN 978-5-4230-0652-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/143535>
- 18 Расчет экономических показателей деятельности автотранспортного предприятия: методические указания для студентов направления «Технология транспортных процессов» профиля «Организация перевозок на автомобильном транспорте» / сост.: Л.С. Трофимова, С.В. Сорокина, Е.С. Хорошилова. Омск: СибАДИ, 2012. 34 с.
- 19 Акт министерств и ведомств "РД 3112199-1085-02. Временные нормы эксплуатационного пробега шин автотранспортных средств" (утв. Минтрансом РФ 04.04.2002) (вместе с "Классификацией автотранспортных средств") (с изм. от 07.12.2006)" от 04.04.2002 № РД 3112199-1085-02 с изм. и допол. в ред. от 07.12.2006. – М.: 2006. – 20 с.
- 20 Акт министерств и ведомств "Распоряжение Минтранса России от 14.03.2008 N АМ-23-р (ред. от 30.09.2021) "О введении в действие методических рекомендаций "Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте"" от 14.03.2008 № АМ-23-р с изм. и допол. в ред. от 30.09.2021. – М.: 2008. – 198 с.

References

- 1 Transport Committee of St. Petersburg: official website. - Saint Petersburg. – URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/
- 2 Routes / [Electronic resource] // St. Petersburg State Unitary Enterprise Passazhiravtotrans - URL: <https://www.avtobus.spb.ru/?ysclid=luvm9ykt6l489707806>
- 3 GOST 51006-96 – Transport services. Terms and definitions: date of introduction 1997-01-01. M.: Publishing house of standards, 1997. – 11 p.
- 4 GOST 51825-2001 – Passenger road transport services. General requirements: date of introduction 2002-07-01. – M.: Standards Publishing House, 2001. – 13 p.
- 5 GOST 51004-96 – Transport services. Passenger Transportation. Nomenclature of quality indicators: date of introduction 1997-01-01. – M.: Standards Publishing House, 1996. – 8 p.
- 6 On approval of the social standard of transport services for the population when transporting passengers and luggage by road and urban ground electric transport: order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated January 31, 2017 No. NA-19-r (as amended by orders of the Ministry of Transport Russia dated October 18, 2023 No. KB-46-r). – M., 2017. – 27 p.
- 7 Rules for the transportation of passengers and luggage by road and urban ground electric transport: approved by Decree of the Government of the Russian Federation of February 14, 2009 N 112. – M.: 2009. – 22 p.
- 8 Bus route 169A on the map of St. Petersburg / [Electronic resource] // TransportSPb. – URL: https://transportspb.com/find/avtobus_169A?ysclid=lpb71q3dh258290227
- 9 LiAZ 5292 low-floor bus - characteristics / [Electronic resource] // bus.ru. – URL: <https://bus.ru/buses/liaz-5292-restayling/?ysclid=lpb74qt05o972388990>
- 10 St. Petersburg State Public Institution “Transportation Organizer”: official website. - Saint Petersburg. – URL: <https://orgp.spb.ru/?ysclid=luz93z5gbs548203397>
- 11 Menukhova T.A. Methodological recommendations for completing coursework in the academic discipline “Passenger transportation” / St. Petersburg Mining University - 2017. – P.: - 22 p.
- 12 Larin O.N. Passenger transportation: textbook / O.N. Larin. – Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2011. – 121 p.
- 13 On the peculiarities of working hours and rest time for car drivers: provisions approved. By Order of the Ministry of Transport of Russia dated August 20, 2004 N 15. – M.: 2004. – 10 p.
- 14 Bus route 105 on the map of St. Petersburg / [Electronic resource] // TransportSPb. – URL: https://transportspb.com/find/avtobus_105?ysclid=lpb71q3dh258290227
- 15 Bus route 136 on the map of St. Petersburg / [Electronic resource] // TransportSPb. – URL: https://transportspb.com/find/avtobus_136?ysclid=lpb71q3dh258290227
- 16 Matantseva O.Yu. Fundamentals of the economics of road transport: textbook / O.Yu. Matantseva. – M.: Justitsinform, 2020. – 256 p.
- 17 Smenikhin, V.V. Transportation and motor transport / V.V. Semenikhin. — 5th ed., revised. and additional — Moscow: GrossMedia, 2019. — 1112 p. — ISBN 978-5-4230-0652-5. — Text: electronic // Lan: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/143535>
- 18 Calculation of economic indicators of the activity of a motor transport enterprise: guidelines for students of the direction “Technology of transport processes” of the profile “Organization of transportation in road transport” / compiled by: L.S. Trofimova, S.V. Sorokina, E.S. Khoroshilova. Omsk: SibADI, 2012. 34 p.
- 19 Act of ministries and departments "RD 3112199-1085-02. Temporary standards for the operational mileage of vehicle tires" (approved by the Ministry of Transport of the Russian Federation on 04.04.2002) (together with the "Classification of vehicles") (as amended on 07.12.2006)" dated 04.04.2002 No. RD 3112199-1085-02 with amendments and additions as amended on 07.12.2006. – M.: 2006. – 20 p.
- 20 Act of ministries and departments “Order of the Ministry of Transport of Russia dated March 14, 2008 N AM-23-r (as amended on September 30, 2021) “On the implementation of methodological recommendations “Consumption standards for fuels and lubricants in road transport”” dated March 14. 2008 No. AM-23-r with amendments and additions as amended on September 30, 2021 – M.: 2008. – 198 p.

DOI: [10.34220/2311-8873-2024-64-74](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2024-64-74)



УДК 629.331

UDC 629.331

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ
АВТОМОБИЛЯ НА БЕЗОПАСНОСТЬ
ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ**

**STATISTICAL STUDY OF THE
INFLUENCE OF VEHICLE POWER
DENSITY ON ROAD SAFETY**

Черевастов Максим Геннадьевич,
аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины», Нижегородский государственный технический университет им. Алексеева, г. Нижний Новгород, e-mail: Chermaxim_1978@mail.ru

Cherevastov Maxim Gennadievich,
postgraduate student of the department of Construction and road machines, Nizhny Novgorod state technical university named after Alekseev, Nizhny Novgorod, e-mail: Chermaxim_1978@mail.ru

Аннотация. Проведено статистическое исследование влияния удельной мощности автомобиля на дорожную аварийность. Для оценки аварийности использован относительный показатель, получаемый как отношение количества дорожно-транспортных происшествий на единицу длины пробега автомобилей. Получена стохастическая связь аварийности от удельной мощности автомобиля. Даны рекомендации по возможности замены двигателя внутреннего сгорания при переоборудовании автомобиля.

Annotation. The study of the influence of the specific power of the car on the road accident rate. To assess the accident rate, a relative indicator is used, obtained as the ratio of the number of road accidents per unit length of the mileage of cars. A stochastic relationship between the accident rate and the specific power of the car was obtained. Recommendations are given on the possibility of replacing the internal combustion engine during the conversion of the car.

Ключевые слова: БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ, ВНЕСЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЮ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА, УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ АВТОМОБИЛЯ.

Keywords: MAKING CHANGES TO THE DESIGN OF THE VEHICLE, ROAD SAFETY, SPECIFIC POWER OF THE CAR.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Вопрос установления связи между мощностью двигателя автомобиля и дорожной аварийностью периодически возникает в разное время. Основной интерес к наличию или отсутствию данной связи проявляют страховые компании, осуществляющие страхование транспортных средств. По их мнению, данная связь существует, что в значительной степени оправдывает наличие коэффициента, связанного с мощностью двигателя, при формировании стоимости полиса ОСАГО. Существует также и другая точка зрения, в своей основе полагающая отсутствие таковой связи, и необходимости неприменения данного коэффициента. Обращаем внимание, что в указанных выше случаях говорится о величине мощности двигателя без учета массы автомобиля, однако существует множество вариантов, в которых при равных мощностях транспорт-

ные средства обладают значительно разными массами. Таким образом, в целях нашего исследования мы будем нормализовать представление мощности двигателя автомобиля по его массе, что, по сути, означает удельную мощность.

Вместе с тем определение наличия связи между удельной мощностью автомобиля и аварийностью, потенциально позволит вносить рекомендации о возможности изменения конструкции автомобиля, например, в части замены двигателя внутреннего сгорания.

Изменения, вносимые в конструкцию транспортного средства на стадии его эксплуатации, или как их еще называют переоборудованием, в настоящее время приобрели широкий масштаб. Само по себе изменение, зачастую, диктуется не условием улучшения конструкции автомобиля, как при тюнинге [1], а пожеланием потребителя или потенциального собственника. В основном целью является либо сокращение себестоимости перевозок, либо приспособленность транспортного средства к определенным видам (особенностям) грузов, категорий пассажиров или условиям эксплуатации, либо повышение общей экономической эффективности использования автомобиля. При этом переоборудование не всегда осуществляется в рамках сформировавшихся научных основ проектирования автомобиля, направленных, в частности, на увеличение грузоподъемности транспортных средств за счет снижения снаряженной массы автомобиля без уменьшения прочности и надежности при сохранении его полной массы, а также на уменьшение материалоемкости [2]. Между тем, как показывает практика, значительное количество случаев внесения изменений, наоборот, сопровождается увеличением снаряженной массы автомобиля и снижением его грузоподъемности, что, как следствие, приводит к ухудшению тягово-скоростных свойств автомобиля. В случаях изменения (зачастую увеличение) габаритной длины транспортного средства при его переоборудовании, увеличивается материалоемкость автомобиля и уменьшается его компактность, вместе с этим изменяется и длина колесной базы, которая, в свою очередь, оказывает непосредственное влияние на управляемость автомобиля. Таким образом, нельзя забывать о том, что измененная конструкция в определенной степени влияет на эксплуатационные свойства автомобиля, а значит, может повлиять на безопасность дорожного движения.

Анализ научных работ и публикаций, относящихся к тематике переоборудования автомобилей, в целом, обозначил направленность исследований в отношении вопросов установки газобаллонного оборудования, в целях повышения экологической безопасности, а также использования альтернативного топлива меньшей стоимостью. Однако, авторы данных научных публикаций не учитывали возможное изменение эксплуатационных свойств транспортных средств после их переоборудования, но, к примеру, при установке газобаллонного оборудования отмечается увеличение снаряженной массы автомобиля и уменьшение мощности двигателя [3, 4]. Необходимо отметить работы Зубрицкого С.Г. [5], Кириллова К.А. [6] и Белехова А.А., [7]. Данные авторы направили свои исследования в сферу обеспечения безопасности транспортных средств с измененной конструкцией. Однако, учитывая изложенную информацию, можно говорить о недостаточной изученности как взаимосвязи удельной мощности автомобиля и аварийности, так и влияния конструктивных изменений при переоборудовании, способных воздействовать на различные эксплуатационные свойства, в том числе и тягово-скоростные, на безопасность дорожного движения.

2 Материалы и методы

По оценкам, сделанным нами при анализе сведений о количестве выданных разрешений на внесение изменений в конструкцию находящегося в эксплуатации колесного транспортного средства [8], удельный объем переоборудованных автомобилей составляет практически 5%, а их количество неуклонно растет. Разновидность изменений достаточно разнообразна, она затрагивает множество систем и элементов конструкции. Наиболее востребованными, принимая во

внимание обобщенную статистику [8], являются: установка газобаллонного оборудования, установка тягово-сцепного устройства, замена двигателя внутреннего сгорания (далее - ДВС) и ряд других изменений.

За период с 2015 по 2020 годы количество замен ДВС, в случаях переоборудования транспортных средств, выросло практически в два раза (см. рис. 1), при этом общий годовой объем переоборудований за тот же период времени возрос в четыре раза.

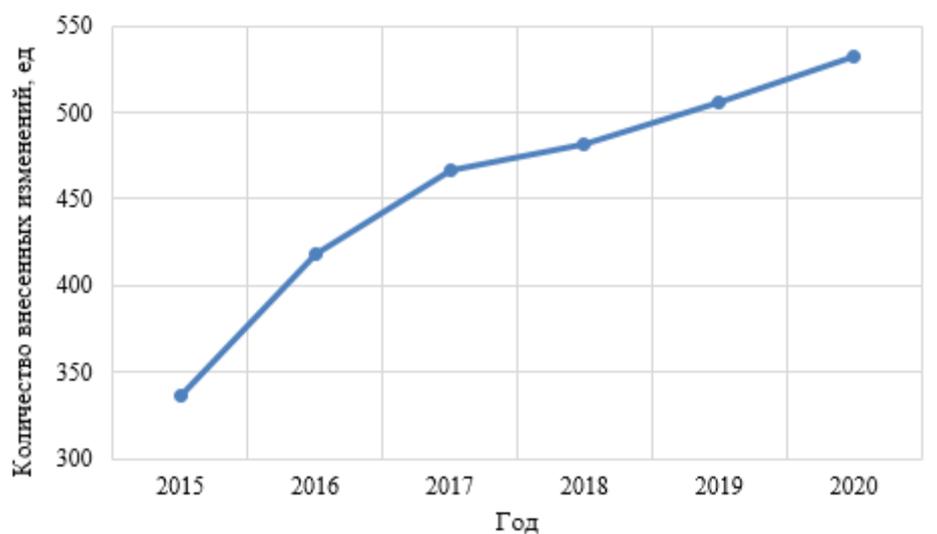


Рисунок 1 – Распределение по годам вносимых изменений – «замена ДВС»

Значительный интерес к изучению, учитывая количество обращений в органы госавтоинспекции, представляет замена ДВС при переоборудовании автомобилей. В ходе исследования были получены следующие данные. Практически в 40% случаев замена ДВС осуществляется на грузовых автомобилях категории N_1 , в 30% случаев на легковых автомобилях категории M_1 . В подавляющих случаях устанавливаемый взамен старого двигатель обладает большей максимальной мощностью (примерно 90% изменений), при этом снаряженная масса автомобиля практически не изменяется. В половине случаев возрастание максимальной мощности происходит примерно на 40%. Фиксируются также случаи, когда двигатель заменяется на менее мощный (около 10% изменений). При этом уменьшение мощности обычно происходит на величину не более 20%. Следовательно, очевидным образом при замене двигателя автомобиля изменяется его удельная мощность, что непосредственно влияют на тягово-скоростные свойства. В нашем случае под термином «удельная мощность автомобиля» мы будем понимать отношение максимальной мощности двигателя к снаряженной массе транспортного средства.

Выражение для удельной мощности выглядит следующим образом:

$$P_{уд} = \frac{P_{дв}}{m_{сн}}, \quad (1)$$

где $P_{дв}$ – максимальная мощность двигателя; $m_{сн}$ – снаряженная масса автомобиля.

Проведем статистическое исследование влияния удельной мощности автомобиля на дорожную аварийность. Для этого нами был собран массив данных о 5000 транспортных средств, включающий в себя информацию о модели, пробеге, количестве дорожно-транспортных происшествий (далее - ДТП), максимальной мощности ДВС и снаряженной массе, различных категорий, годов выпуска и имеющих разную удельную мощность [9]. Полученные сведения легли в основу выборки. Доля автомобилей с измененной конструкцией в данной выборке составила 6%. Для оценки аварийности нами применялся показатель безопасности дорожного движения

(далее - БДД), получаемый отношением количества дорожно-транспортных происшествий к длине пробега автомобиля [10].

Сведения из выборки позволили получить динамический ряд, где в качестве признака, по которому производится упорядочивание показателя БДД, выбрано отношение снаряженной массы автомобиля к его максимальной мощности двигателя, округленное до целого числа. Выбор признака упорядочивания, таким образом, позволил получить ряд с равноотстоящими уровнями при изменении признака от 7 до 46 кг/л.с. с шагом 1 кг/л.с. Внутри 40 полученных групп (уровней ряда) были рассчитаны показатели БДД после определения общего пробега и общего количества ДТП. На рис. 2 представлен полученный динамический ряд.

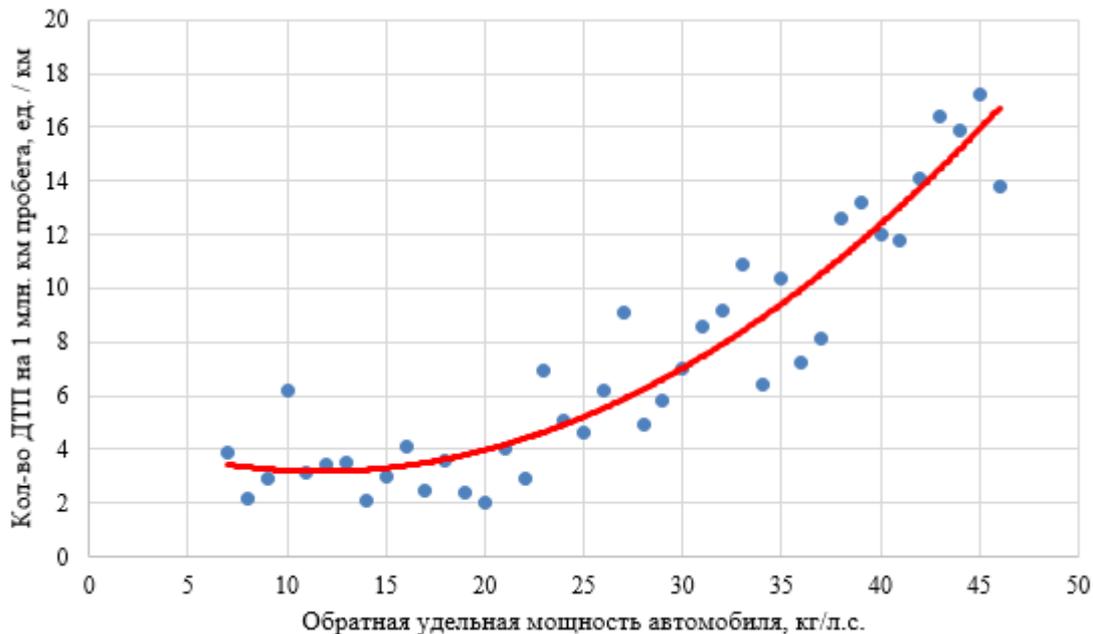


Рисунок 2 – Распределение количества ДТП на единицу длины пробега по признаку упорядочивания

Проведем обработку данных, содержащихся в полученном ряде, в целях установления тренда (динамики) либо его отсутствия [11]. Разбив динамический ряд на две равные части, определим расчетное значение критерия, используя выражение (2). Сопоставив полученное значение с его критической величиной, примем решение о случайности либо неслучайности тенденции (тренда) ряда.

$$t_{расч} = \frac{\bar{y}_I - \bar{y}_{II}}{\sqrt{(n_I - 1)d_I + (n_{II} - 1)d_{II}}} \cdot \sqrt{\frac{n_I n_{II} (n_I + n_{II} - 2)}{n_I + n_{II}}}, \quad (2)$$

где n_I и n_{II} - число уровней первой и второй половины ряда ($n_I = n_{II} = 20$); \bar{y}_I и \bar{y}_{II} - оценки математического ожидания первой и второй половин ряда; d_I и d_{II} - оценки дисперсий первой и второй половин ряда.

Указанные выше числовые параметры определяются по нижеприведенным формулам (3) – (6):

$$\bar{y}_I = \frac{1}{n_I} \sum_{p=7}^{26} y_p, \quad (3)$$

$$\bar{y}_{II} = \frac{1}{n_{II}} \sum_{p=27}^{46} y_p, \quad (4)$$

$$d_I = \frac{1}{n_I - 1} \sum_{p=7}^{26} (y_p - \bar{y}_I)^2, \quad (5)$$

$$d_{II} = \frac{1}{n_{II} - 1} \sum_{p=27}^{46} (y_p - \bar{y}_{II})^2, \quad (6)$$

где y_p – значение уровня ряда [количество ДТП на единицу длины пробега]; p – признак группировки [кг/л.с.].

Результаты проведенных вычислений сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения числовых характеристик

Половина ряда	Оценка математического ожидания	Оценка дисперсии
I	$\bar{y}_I = 3,73$	$d_I = 2,05$
II	$\bar{y}_{II} = 10,73$	$d_{II} = 13,36$

Поставив в выражение (2) данные из табл. 1, получим:

$$t_{расч} = -8,0.$$

Принимая во внимание уровень значимости $\alpha = 0,05$ и число степеней свободы $df = n_I + n_{II} - 2 = 38$, необходимые для получения критической (табличной) величины распределения Стьюдента $t_{кр}$ [7], получим:

$$t_{кр} = 2,02.$$

Сравним вычисленное расчетное значение (по абсолютной величине) с критическим:

$$|t_{расч}| = 8,0 > 2,02.$$

В результате проведенных действий нами делается вывод с вероятностью ошибки 5%, утверждающий наличие динамики ряда, или присутствие тренда, что тоже самое, а сам исследуемый динамический ряд не стационарен.

Далее получим уравнение тренда динамического ряда как функции удельной мощности автомобиля. Для этого, применяя метод наименьших квадратов, произведем аналитическое выравнивание статистических данных, изображенных на рис. 2. Для представления динамики нами применена полиномиальная функция.

В общем виде уравнение динамики имеет следующий вид:

$$\hat{y}_p = ap^2 + bp + c, \quad (7)$$

где a, b, c – постоянные коэффициенты.

Вычислим недостающие коэффициенты [7], решив систему уравнений (8):

$$\begin{cases} a \sum_{p=7}^{46} p^4 + b \sum_{p=7}^{46} p^3 + c \sum_{p=7}^{46} p^2 = \sum_{p=7}^{46} p^2 y_p \\ a \sum_{p=7}^{46} p^3 + b \sum_{p=7}^{46} p^2 + c \sum_{p=7}^{46} p = \sum_{p=7}^{46} p y_p \\ a \sum_{p=7}^{46} p^2 + b \sum_{p=7}^{46} p + 40c = \sum_{t=7}^{46} y_p \end{cases}, \quad (8)$$

В результате расчетов получим: $a = 0,012$, $b = -0,275$ и $c = 4,88$.

Окончательно запишем уравнение динамики следующим образом:

$$\hat{y}_p = 0,012 p^2 - 0,275 p + 4,88. \quad (9)$$

Теперь, на основе F – критерия Фишера, в целом проверим статистическую значимость уравнения, используя расчетное выражение:

$$F_{расч} = \frac{\sum_{p=7}^{46} \left(\hat{y}_p - y_p \right)^2}{\sum_{p=7}^{46} \left(\hat{y}_p - y_p \right)^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m}, \quad (10)$$

где $m+1$ – число коэффициентов уравнения тренда; $n = 40$ – количество уровней динамического ряда.

В результате вычислений определяем, что $F_{расч} = 145,36$.

Принимая во внимание уровень значимости $\alpha = 0,05$ и число степеней свободы $df_1 = m = 2$ и $df_2 = n - m - 1$, выберем по табличным данным [3] критическое значение распределения Фишера:

$$F_{кр} = 3,26.$$

Сравним вычисленное расчетное значение с критическим:

$$F_{расч} = 145,36 > 3,26.$$

Таким образом, с вероятностью ошибки 5% уравнение тенденции динамического ряда в целом статистически адекватно (значимо).

3 Результаты исследований

Учитывая определение показателя БДД, применяемого в настоящей работе, а также понятие признака, по которому производится упорядочивание данного показателя, уравнение тренда можно представить следующим образом:

$$\frac{N}{L} \cdot 10^6 = 0,012 \cdot \left(\frac{1}{P_{y\partial}} \right)^2 - 0,275 \cdot \frac{1}{P_{y\partial}} + 4,88, \quad (11)$$

где N – количество ДТП; L – пробег транспортного средства [км].

На рис. 3 изображена стохастическая связь аварийности от удельной мощности автомобиля, определяемая выражением (11).

Ход кривой (см. рис. 3), условно, можно разделить на три участка. На первом участке показатель БДД существенно уменьшается при увеличении удельной мощности автомобиля с 0,02 до 0,04 л.с./кг. При этом уменьшение показателя происходит более чем в 3 раза. На втором участке при увеличении удельной мощности с 0,04 до 0,06 л.с./кг уменьшение показателя менее значительное, а на третьем отрезке, где удельная мощность более 0,06 л.с./кг показатель БДД практически не изменяется и без существенной потери точности может считаться постоянным.

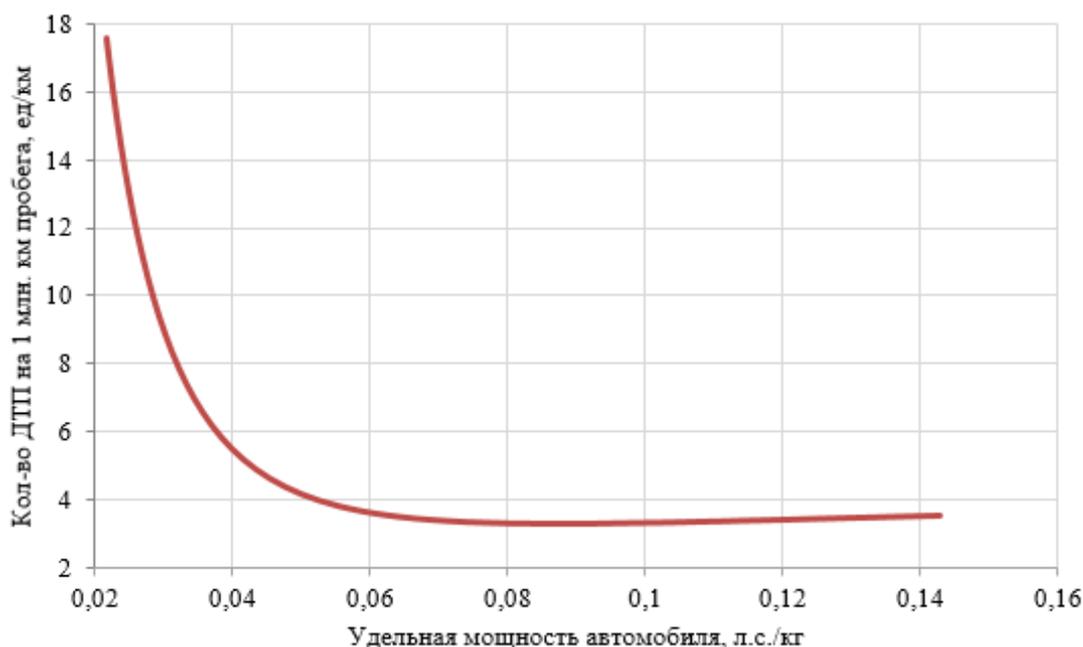


Рисунок 3 – Стохастическая связь аварийности с удельной мощностью автомобиля

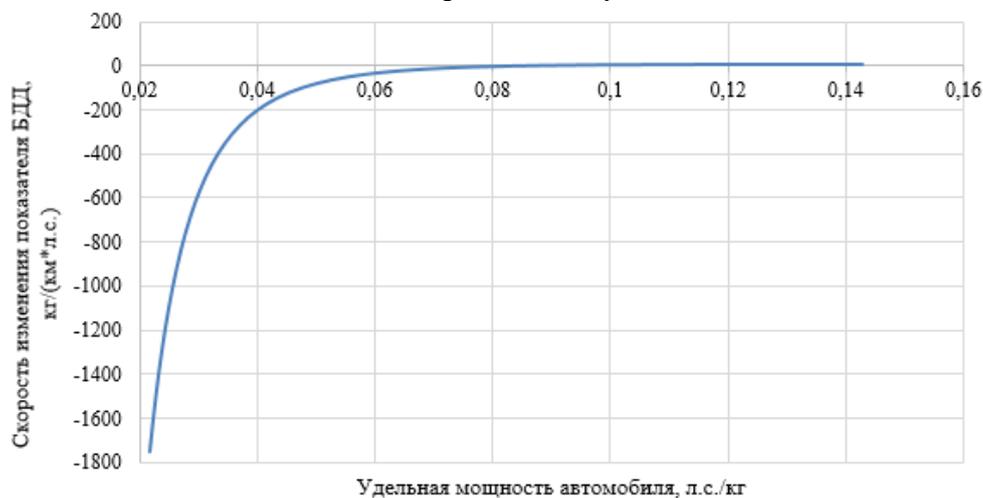


Рисунок 4 – Скорость изменения аварийности по удельной мощности автомобиля

На рис. 4 проведено дифференцирование графика, изображенного на рис. 3. Наблюдается существенное уменьшение, по модулю, скорости изменения показателя БДД при увеличении удельной мощности автомобиля с 0,02 до 0,04 л.с./кг.

В настоящее время определено нормирование [12] мощности устанавливаемого двигателя в пределах 25% от самого мощного двигателя, предусмотренного типом транспортного средства, либо от штатного двигателя (при отсутствии одобрения типа транспортного средства), при этом, каких-либо ограничений на уменьшение мощности нет. Вместе с тем проведенное исследование показывает, что уменьшению удельной мощности (энерговооруженности) автомобиля ниже 0,04 л.с./кг сопутствует значительный рост показателя БДД и это обстоятельство заслуживает внимательного изучения.

4 Обсуждение и заключение

В завершение, обобщая полученные результаты статистического исследования, делаем следующие выводы:

- установлена стохастическая связь между показателем БДД (аварийностью) и удельной мощностью транспортных средств;
- получено уравнение регрессии указанной выше связи и определена его статистическая значимость;
- сформирована рекомендация – не допускать уменьшение удельной мощности автомобиля ниже значения 0,04 л.с./кг в случае переоборудования автомобиля – «замена двигателя».

Список литературы

- 1 Функциональный тюнинг автомобилей [Текст] / А.С. Денисов и [др.] // Совершенствование автотранспортных систем и сервисных технологий: материалы XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 95-летию юбилею доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ Авдонькина Фёдора Николаевича (1923-1996). – Саратов, 2018. – С. 222 – 230.
- 2 Кравец, В. Н. Проектирование автомобиля [Текст]: учеб. пособие. / В.Н. Кравец. – 2-е изд., перераб. – Н. Новгород, Нижегород. политехн. ин-т., 1992. - 230 с.
- 3 Молев, Ю.И. Теоретическая оценка влияния установки газобаллонного оборудования на управляемость автобуса ПАЗ 32054 [Электронный ресурс] / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов // Транспортные системы. - 2017. - №1. - Режим доступа: <https://transport-systems.ru/index/php/arkhiv/14-2017>.
- 4 Харьбина, Е.И. Автомобили фирмы MERCEDES – BENZ с водородными двигателями. «Конструкции автомобилей. Зарубежный опыт» [Текст] / Е.И. Харьбина. - М.: НИИСтандартавтосельхозмаш. - Выпуск 8, 1991, С. 21 – 23.
- 5 Зубрицкий, С.Г. Оценка влияния конструктивных изменений автотранспортных средств на безопасность их использования [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / С.Г. Зубрицкий. - М., 2003. – 185 с.
- 6 Кириллов, К.А. Методика обеспечения безопасности колесных транспортных средств при внесении изменений в их конструкцию [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Кириллов Кирилл Александрович. - М., 2020. - 231с.
- 7 Белехов, А.А. Метод предварительной технической экспертизы транспортных средств при изменении их конструкции в эксплуатации [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 2.9.5 / А.А. Белехов. – Санкт-Петербург, 2023. - 213с.
- 8 Анализ изменений, внесенных в конструкции транспортных средств, при производстве переоборудования автомобилей на территории Нижегородской области в 2015 году [Текст] / А.А. Аникин и [др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - 2018. - №4(123). - С. 243-248.
- 9 ГИБДД в регионах: информационно-поисковая система [Электронный ресурс] / Режим доступа: гибдд.рф. – Загл. с экрана.
- 10 Молев, Ю.И. Обеспечение дорожной безопасности автомобильного транспорта в зимний период [Текст]: дис. ... док. техн. наук: 05.22.10 / Ю.И. Молев. - Владимир, 2007. – 376 с.
- 11 Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы [Текст]: пер. с англ. И.Г. Арамановича и др. - М.: Наука, 1968. - 720 с.

12 ГОСТ 59889-2021. Транспортные средства. Внесение изменений в конструкцию транспортных средств, находящихся в эксплуатации. Технические требования, технический контроль и методы испытаний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://protect.gost.ru>.

References

1 Functional car tuning [Text] / A.S. Denisov and [others] // Improving motor transport systems and service technologies: materials XIV International scientific and technical conference dedicated to the 95th anniversary Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation Avdonkin Fyodor Nikolaevich (1923-1996). – Saratov, 2018. – P. 222 – 230.

2 Kravets, V. N. Car design [Text]: textbook. allowance. / V.N. Kravets. – 2nd ed., revised. – N. Novgorod, Nizhny Novgorod. Polytechnic int., 1992. - 230 p.

3 Molev, Yu.I. Theoretical assessment of the impact of installing a gas cylinder equipment for controllability of the PAZ 32054 bus [Electronic resource] / Yu.I. Molev, M.G. Cherevastov // Transport systems. - 2017. - №.1. - Access mode: <https://transport-systems.ru/index/php/arkhiv/14-2017>.

4 Kharybina, E.I. MERCEDES – BENZ cars with hydrogen engines. "Car designs. Foreign experience" [Text] / E.I. Kharybina. - M.: Research Institute of Standard Avtoselkhoz mash. - Issue 8, 1991, pp. 21 – 23.

5 Zubrisky, S.G. Assessing the impact of design changes in motor vehicles funds for the safety of their use [Text]: dis. ...cand. tech. Sciences: 05.05.03 / S.G. Zubrisky. - M., 2003. – 185 p.

6 Kirillov, K.A. Methodology for ensuring the safety of wheeled vehicles funds when making changes to their design [Text]: dis. ...cand. tech. Sciences: 05.05.03 / Kirillov Kirill Alexandrovich. - M., 2020. - 231 p.

7 Belekhov, A.A. Method of preliminary technical examination of transport means when changing their design in operation [Text]: dis. ...cand. tech. Sciences: 2.9.5 / A.A. Belekhov. – St. Petersburg, 2023. - 213 p.

8 Analysis of changes made to vehicle designs when production of car re-equipment in the Nizhny Novgorod region in 2015 year [Text] / A.A. Anikin and [others] // Proceedings of NSTU im. R.E. Alekseeva. - 2018. - No4(123). – pp. 243-248.

9 Traffic police in the regions: information retrieval system [Electronic resource] / Access mode: trafficpolice.rf. - Cap. from the screen.

10 Molev, Yu.I. Ensuring road safety of motor transport in winter period [Text]: dis. ...doc. tech. Sciences: 05.22.10 / Yu.I. Molev. - Vladimir, 2007. – 376 p.

11 Korn, G. Handbook of mathematics for scientists and engineers. Definitions, theorems, formulas [Text]: trans. from English I.G. Aramanovich and others - M.: Nauka, 1968. - 720 p.

12 GOST 59889-2021. Vehicles. Making changes to the design vehicles in use. Technical requirements, technical control and test methods [Electronic resource]. – Access mode: <https://protect.gost.ru>.

© Черевастов М.Г., 2024