

На правах рукописи



Чечуев Василий Евгеньевич

**МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ
ПАРКА МАШИН КРУПНОЙ
ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ
ОРГАНИЗАЦИИ**

Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные
и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Репин Сергей Васильевич

Официальные оппоненты: **Молев Юрий Игоревич**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р. Е. Алексеева»,
кафедра «Строительные и дорожные машины»,
профессор;

Кобзарь Андрей Александрович
кандидат военных наук, Военный институт
(Железнодорожных войск и военных сообщений)
ФГКВБОУ ВО «Военная академия материально-
технического обеспечения имени генерала армии
А.В. Хрулева», кафедра организации повседневной
деятельности и безопасности военной службы,
доцент.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения имени Императора
Александра I».**

Защита состоится «04» октября 2022 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/chechuev-vasiliy-evgenevich>

Автореферат разослан «25» августа 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А. В. Терентьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационного исследования

Программа развития Российской Федерации до 2030 года предусматривает расширение объемов строительства, особенно транспортного, в Северных регионах страны, что относится и к Вологодской области, данные по строительным предприятиям которой использовались в настоящей работе. Однако, выполнение намеченных планов затрудняет недостаточная мощность парка строительных машин (ПСМ), как по количественным, так и по качественным показателям. Отставание по количественным показателям обусловлено низким коэффициентом обновления парка машин 6...8%, что в два раза ниже нормативного. Изношенность ПСМ составляет более 50%, что характеризует невысокий уровень качественных показателей машин. Поэтому ПСМ остается старым, несущим большие издержки на эксплуатацию и ремонт вследствие низкой надежности машин, а простой машин по причине неработоспособности достигают 40% фонда рабочего времени.

Отсутствие инженерных методик оптимального формирования ПСМ заставляет каждое предприятие решать самостоятельно проблему обновления парков техники, что приводит к нерациональному использованию ресурсов, низкому уровню работоспособности машин.

Поэтому разработка научных методов обновления ПСМ, позволяющих проводить реновацию по критериям максимальной надежности, представляется особенно актуальной.

Степень разработанности темы

Имеется большое количество трудов, посвященных вопросам реновации парков оборудования, разработано много различных методик. Так, теоретической базой формирования ПСМ и повышения его эффективности служат разработки ученых в областях: обновления парков машин (Л.Л. Вегер, Р.Н. Колегаев, Кобзарь А.А., Ю.И. Молев, Н.К. Ховалыг); оптимизации сроков службы (Л.Л. Вегер, Р.М. Петухов, А.И. Селиванов); эффективности применения машин (С.И. Абрамов, В.И. Баловнев, М.И. Грифф, Е.И. Зайцев, Е.М.Кудрявцев, С.Е. Канторер, А.П. Ковалев); обеспечения работоспособности строительных машин (О.А. Бардышев, С.М. Грушецкий, П.В. Дружинин, С.А. Евтюков, В.А. Зорин, Б.Г. Ким, Ю.А. Корытов, И.А. Луйк, С.Е. Максимов, С.Н. Николаев, А.Н. Новиков, С.В. Репин, А.В. Рубайлов).

Наиболее полное решение задачи повышения надежности ПСМ с точки зрения теоретической и практической значимости было получено учеными кафедры наземных транспортно-технологических машин СПбГАСУ. Однако, разработанные подходы не учитывают влияние

динамически меняющихся условий формирования ПСМ, не дают сравнительной оценки вариантов оптимизации ПСМ, не отражают достаточно полно условия обеспечения главной характеристики парка машин – наработки. Именно наработка ПСМ является базовым элементом при расчете показателей надежности и эффективности.

Рабочая гипотеза

Оптимизация ПСМ в меняющихся условиях эксплуатации представляет собой многопараметрическую и многокритериальную задачу, которую можно решить путем применения объектно-ориентированных моделей формирования показателей надежности и эффективности, решаемых методами линейного и нелинейного программирования.

Цели и задачи исследований

Цель диссертационной работы – разработка методики многопараметрической оптимизации ПСМ в меняющихся условиях эксплуатации, учитывающей условия формирования главной характеристики парка машин – наработки и обеспечивающей сравнительную оценку вариантов оптимизации ПСМ.

Объект исследования – парк строительных машин.

Предмет исследования – процессы формирования наработки ПСМ, показателей надежности и эффективности.

Задачи диссертационной работы

– анализ состояния, динамики и тенденций развития парка строительных машин в РФ.

– исследование рейтинга потребительских качеств строительных машин.

– разработка математической модели многопараметрической оптимизации ПСМ на основе показателей надежности и эффективности.

– разработка математической модели формирования операционного времени работы ПСМ.

– разработка математической модели расчета коэффициента сохранения эффективности, как основной целевой функции оптимизации ПСМ.

– разработка математических моделей процессов, описывающих условия эксплуатации и влияющих на формирование ПСМ.

– разработка методики многопараметрической оптимизации ПСМ.

Научная новизна заключается в

– получении результатов анализа состояния, динамики, тенденций развития парка строительных машин в РФ и рейтинга потребительских качеств строительных машин.

– разработке математической модели многопараметрической оптимизации ПСМ, учитывающей современные тенденции развития парка

строительных машин в РФ, предусматривающая оптимизацию по целевым функциям различной направленности.

- разработке математической модели расчета операционного времени работы ПСМ, отражающей влияние различных видов эксплуатации.

- разработке математической модели расчета коэффициента сохранения эффективности, учитывающей операционное время работы машины на объектах, их характеристики и возраст.

- разработке математических моделей процессов, описывающих условия эксплуатации и влияющих на формирование ПСМ.

- разработке методики многопараметрической оптимизации ПСМ.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость заключается в разработке математической модели многопараметрической оптимизации ПСМ, учитывающей современные тенденции развития парка строительных машин в РФ и предусматривающей оптимизацию по целевым функциям, основанным на показателях надежности и эффективности.

Практическая значимость работы

Практическая значимость заключается в разработке инженерной методики многопараметрической оптимизации ПСМ по заданной производственной программе и требуемой целевой функции с учетом современных тенденций развития парка строительных машин, реализуемой в программной среде Excel.

Практическая значимость диссертационной работы подтверждена актами внедрения в ООО «Севердорстрой» и использования в учебном процессе в СПбГАСУ. Практические результаты исследования могут быть использованы строительными предприятиями в целях эффективного управления парками машин.

Методология и методы исследования

Теоретические исследования выполнялись на основе применения методов математического моделирования процессов формирования и оптимизации ПСМ, в том числе статистических методов оценки динамики показателей состояния ПСМ и рынка строительной техники, методов нелинейного программирования динамических моделей.

Положения, выносимые на защиту

- математическая модель многопараметрической оптимизации ПСМ, предусматривающая оптимизацию по целевым функциям, основанным на показателях надежности и эффективности.

- математическая модель расчета операционного времени работы ПСМ, отражающая влияние различных видов эксплуатации и срок службы машин.

– математическая модель расчета коэффициента сохранения эффективности, учитывающая операционное время работы машин, их характеристики и возраст.

– результаты анализа состояния, динамики, тенденций развития парка строительных машин в РФ и рейтинга потребительских качеств строительных машин.

– математические модели процессов, описывающих условия эксплуатации и влияющих на формирование ПСМ.

– методика многопараметрической оптимизации ПСМ.

Личный вклад автора. Все основные положения и разработки исследования, сформировавшие основу научно-методического подхода к методике оптимизации ПСМ, принадлежат автору.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов исследований обеспечивается применением фундаментальных положений теории надежности, методов математического моделирования и современных вычислительных методов и подтверждается сходимостью результатов исследований с результатами других авторов.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 05.05.04 – «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины», п. 2 – «Методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчета технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения», п. 5 – «Методы повышения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации машин, машинных комплектов и систем».

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования докладывались на 72-й, 73-й и 74-й научных конференциях профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2016, 2017, 2018 гг.); 69-й, 70-й, 73-й, 74-й межвузовских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2016, 2020, 2021 гг.); 71-й, 72-й всероссийских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2018, 2019 гг.); Contemporary Problems of Architecture and Construction. Proceedings of the 12th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction (ICCPAC-2020), November 25-26, 2020, Saint Petersburg, Russia.

Публикации

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 9 печатных работах на 3,88 п.л., в числе которых 4 статьи в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 1 статья в изданиях, индексируемых в базе данных Скопус, 3 статьи в сборниках тезисов и докладов научных конференций и других изданиях.

Структура и объем диссертационного исследования

Работа состоит из: введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Материалы диссертации содержат 152 страницы основного текста, 118 рисунков, 11 таблиц, 7 страниц приложений. Библиографический список литературы включает 126 наименований. Общий объем диссертации составляет 159 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы его цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ исследований в предметной области диссертационной работы. Выявлены существенные недостатки методов формирования парков машин и оборудования. Проанализированы критерии оптимизации парков. Сформулированы требования к методике формирования парка строительных машин. Обоснованы цели и задачи исследований.

Во второй главе представлен научно-методический замысел диссертационной работы, выполнен анализ динамики и состояния парка строительных машин в РФ. Исследовано состояние производства строительных машин в России и за рубежом, динамика их рыночной стоимости, достоинства и недостатки различных методов формирования парка машин. Проанализированы тенденции развития рынка строительной техники. Исследован рейтинг потребительских качеств строительных машин.

В третьей главе разработана математическая модель многопараметрической оптимизации ПСМ, предусматривающая оптимизацию по целевым функциям, основанным на показателях надежности и эффективности, математические модели критериев оптимизации ПСМ и процессов, влияющих на формирование парков, а именно, расчета коэффициентов готовности и сохранения эффективности и их составляющих, оценки целесообразности покупки машин со сроком эксплуатации и проведения капитального ремонта, расчета операционного времени работы ПСМ, отражающего влияние различных видов эксплуатации и срока службы машин.

В четвертой главе разработана методика оптимизации ПСМ, базирующаяся на новой программе расчета на ЭВМ, включающей математическую модель оптимизации ПСМ, подпрограммы оценки влияния

утилизационного сбора и инфляции на процессы формирования парков строительных машин, оптимизации парков по ряду новых критериев, в том числе коэффициенту сохранения эффективности. Проведен технико-экономический расчет эффективности от внедрения и использования разработанной методики.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Математическая модель многопараметрической оптимизации ПСМ

ПСМ представляет собой сложную техническую систему, обладающую набором внутренних свойств и взаимодействующую со внешней средой. Внутренние свойства ПСМ характеризуются структурой по номенклатуре и сроку службы и техническим состоянием. Внешняя среда для ПСМ является источником: пополнения парка; запросов на выполнение работ; информации о предпочтениях потребителей. Поэтому процесс оптимизации структуры ПСМ определяется большой совокупностью показателей и требует поиска эффективных решений по достаточно большому количеству критериев.

Из множества парков машин оптимальным будет парк, который может обеспечить выполнение заданных объемов работ при наилучшем значении критерия оптимизации. В зависимости от типов машин, условий эксплуатации, запросов потребителей критерии могут быть различными. Поэтому рассматриваемая задача является многокритериальной.

Разрабатываемая методика справедлива применительно к крупной дорожно-строительной организации, под которой подразумевается предприятие с количеством машин одного наименования не менее 10 единиц (например, экскаваторов, самосвалов). Количество таких организаций в России несколько тысяч. Методика применима и ко всем строительным организациям, а также и транспортным. Ее можно применять и на менее крупных предприятиях, но эффективность оптимизации будет не столь ощутима.

Учет специфики применения машин базируется на большом количестве переменных факторов, влияющих на величину критериев оптимизации. Поэтому имеем дело с многофакторной задачей.

Концепция научного подхода к определению оптимальной структуры ПСМ строится на базовом алгоритме дискретного целочисленного линейного программирования для задач, относящихся к типу многопараметрических,

детерминированных, статических. Метод решения – сплошной поиск, позволяющий найти глобальное решение на всем интервале, если существует несколько локальных экстремумов. Алгоритм указанного типа задач реализуется встроенными средствами развитых вычислительных систем, таких как MS Excel.

Результатом оптимизации является количество единиц техники поступающих в парк или выводимых из него принятыми вариантами реновации ПСМ.

Математическая модель оптимизации ПСМ представляет собой набор частных математических моделей, описывающих процессы формирования парка машин, связываемых между собой определенным образом для нахождения экстремального значения заданной целевой функции F с учетом ограничений входящих в формулы параметров:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underset{\vec{X}}{\text{extr}} F_h \left(\sum_i X_i \cdot C_i, \vec{U}, \vec{V} \right); \\ \vec{\alpha} \left(\vec{X} \right) = A_i, i = 1, m, \\ \vec{\beta} \left(\vec{U} \right) = B_j, j = 1, n, \\ \vec{\gamma} \left(\vec{V} \right) = D_l, l = 1, k. \end{array} \right. \quad (1)$$

где F – целевая функция с размерностью h ; X_i – параметры, подлежащие оптимизации (управляемые параметры); C_i – стоимостная характеристика управляемого параметра; \vec{U} – управляющие параметры; \vec{V} – задаваемые параметры; $\vec{\alpha} \left(\vec{X} \right) = A_i$ – функциональные ограничения на управляемые параметры, описываемые функцией A_i ; m – размерность пространства управляемых параметров; $\vec{\beta} \left(\vec{U} \right) = B_j$ – функциональные ограничения на управляющие параметры, описываемые функцией B_j ; n – размерность пространства управляющих параметров; $\vec{\gamma} \left(\vec{V} \right) = D_l, l$ – функциональные ограничения на задаваемые параметры, описываемые функцией D_j ; k – размерность пространства задаваемых параметров.

В разрабатываемой математической модели (1) параметры X_i , подлежащие оптимизации, определяют возможные способы реновации ПСМ, а именно, количество: новых машин, приобретаемых за собственные средства предприятия, в лизинг или в кредит ($i = 1$); покупаемых машин со сроком службы ($i = 2$); подлежащих капитальному ремонту ($i = 3$); продаваемых машин со сроком службы ($i = 4$); подлежащих списанию ($i = 5$).

Управляющие параметры \vec{U} представлены математическими моделями процессов, влияющих ход принятия решений по вариантам реновации ПСМ. Это модели параметров, зависящих от срока службы машин: годовой наработки машин; остаточного ресурса; коэффициента готовности; коэффициента сохранения эффективности и другие.

Задаваемые параметры \vec{V} устанавливают область поиска оптимальных решений и представлены численными значениями: требуемой мощности парка машин по годовой наработке; максимального количества машин в парке; минимума коэффициента сохранения эффективности; максимума капитальных вложений в реновацию парка и другими.

Размерность h целевой функции F определяет количество критериев оптимизации ($h = 12$), которые можно разделить на группы по функциональному назначению. Показатели надежности: максимум коэффициента сохранения эффективности; максимум коэффициента готовности. Показатели парка машин: минимум машин в парке; максимум наработки. Экономические показатели: минимум капитальных вложений и срока их окупаемости и другие.

Новизной представленной математической модели являются:

- большее количество управляющих параметров и целевых функций, в частности, коэффициент сохранения эффективности, и их математические модели;

- учет при выборе целевых функций предпочтений потребителей техники, которые были определены в процессе диссертационного исследования;

- учет современного состояния рынка строительной техники, выраженный в исследованиях динамики рынка и влияния на него утилизационного сбора и инфляции, что отражено в математических моделях управляющих параметров;

- математическая модель формирования главной характеристики ПСМ – наработки машин, построенная с учетом влияния всех видов эксплуатации – технической, производственной, коммерческой и срока службы машин.

Все новые математические модели входят в виде подпрограмм в программу оптимизации ПСМ.

2. Математическая модель расчета операционного времени работы ПСМ

Суммарное время выполнения рабочих операций парком машин на объектах (операционное время) $\Sigma T_{pp\text{э}p}$ является одной из главных характеристик ПСМ, отражающих его работоспособность, и зависит от надежности машин и уровня организации всех видов эксплуатации - технической, производственной и коммерческой, определяемого посредством разработанных в диссертации показателей (рис. 1, таблица 1).

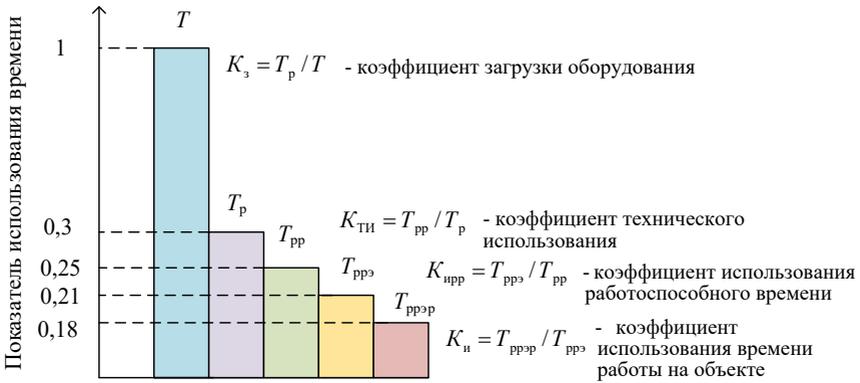


Рис. 1. Ступени формирования $T_{pp\text{э}p}$ – времени выполнения рабочих операций машиной на объекте (операционного времени):
 T – календарное время; T_p – рабочее время на предприятии;
 T_{pp} – время пребывания машины в работоспособном состоянии;
 $T_{pp\text{э}}$ – время эксплуатации (пребывания) машины на объекте

Таблица 1. Составляющие эксплуатации машин и их показатели

Вид эксплуатации	Показатель	Формула
Техническая	Коэффициент технического использования	$K_{тн}(t) = \frac{T_{pp}(t)}{T_p(t)}$
Коммерческая	Коэффициент использования работоспособных машин	$K_{ирп}(t) = \frac{T_{pp\text{э}}(t)}{T_{pp}(t)}$
Производственная	Коэффициент использования времени работы на объекте	$K_и(t) = \frac{T_{pp\text{э}p}(t)}{T_{pp\text{э}}(t)}$

На основании изложенного формула расчета операционного времени работы ПСМ примет вид:

$$\sum T_{pp\text{pp}i}(t) = \sum T_i \cdot K_{zi} \cdot K_{\text{ти}i}(t) \cdot K_{\text{пп}i} \cdot K_{\text{и}i}. \quad (2)$$

В математической модели оптимизации ПСМ $\sum T_{pp\text{pp}}$ выступает в качестве задаваемого параметра, характеризующего его работоспособность.

3. Математическая модель расчета коэффициента сохранения эффективности.

Согласно ГОСТ 27.002-2015 коэффициент сохранения эффективности K_3 является комплексным показателем надежности и представляет собой «отношение значения показателя эффективности использования объекта за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают».

K_3 отражает взаимосвязь надежности и эффективности машин и зависит от срока службы t . Согласно представленному выше определению может быть рассчитан как отношение уровня рентабельности $R(t)$ машин с текущим сроком службы к уровню рентабельности при отсутствии отказов, характерным для новой машины $R(0)$, прошедшей приработку:

$$K_3(t) = \frac{R(t)}{R(0)}. \quad (3)$$

В диссертации построена математическая модель $K_3(t)$, учитывающая важнейшие характеристики эксплуатации ПСМ, причем в функции срока службы t :

- время выполнения операций на объектах каждой машиной $T_{pp\text{pp}i}(t)$ (операционное время);
- производительность машин $Q_i(t)$;
- стоимость единицы продукции c_i ;
- показатель использования потенциала машины (рабочего времени, мощности, грузоподъемности и т. п.) k_i ;
- себестоимость машино-часа $C_{\text{мч}i}(t)$.

$$K_3(t) = f \left\{ \sum_{i=1}^{N_p} T_{pp\text{pp}i}(t) [Q_i(t) \cdot c_i \cdot k_i - C_{\text{мч}i}(t)] \right\}, \quad (4)$$

где N_p – количество работавших машин в парке за рассматриваемый период времени.

На рис. 2 представлены результаты численного расчета коэффициентов готовности и сохранения эффективности на примере экскаватора ЕК-270. Диаграмма снабжена линией K_{g_min} , показывающей значение

коэффициента готовности при минимально допустимом уровне рентабельности машины для предприятия по эксплуатации ПСМ, принятом равным 0,3. Точка пересечения линий Kg_min и $Kg(t)$ показывает срок службы объекта, рассчитанный при $R = 0,3$ и соответствующее ему значения $K_s(t)$, примерно равное 0,4. Это минимальное значение $K_s(t)$ призвано служить ограничением при разработке модели оптимизации ПСМ.

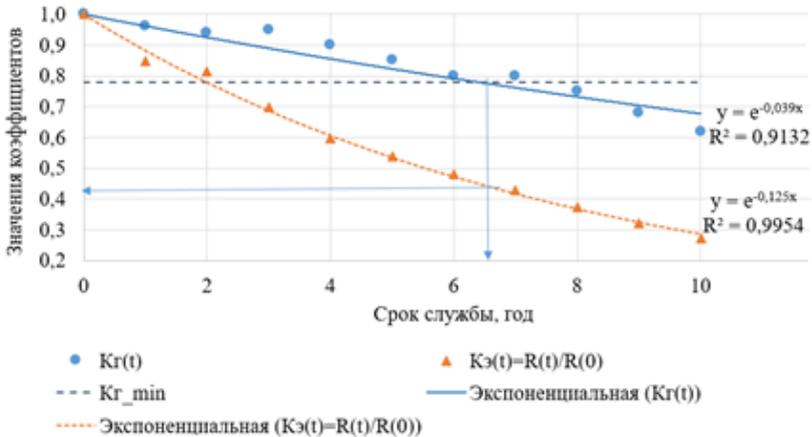


Рис. 2. Результаты расчета коэффициентов готовности и сохранения эффективности в Excel

Следует отметить еще одно преимущество использования коэффициента сохранения эффективности в качестве целевой функции оптимизации ПСМ перед коэффициентом готовности – это учет операционного времени, отражающего влияние всех служб эксплуатации техники – технической, производственной и коммерческой на эффективность работы ПСМ. Коэффициент готовности показывает только время пребывания машин в работоспособном состоянии $T_{pp}(t)$ (рис. 2), определяемое качеством работы службы технической эксплуатации.

4. Результаты анализа состояния, динамики, тенденций развития парка строительных машин в РФ и рейтинга потребительских качеств строительных машин

4.1. Основные характеристики рынка РФ на конец 2021 года, полученные в результате диссертационного исследования

Среднее количество строительных машин (СМ) с истекшим сроком службы (иными словами полностью изношенных) составляет 50% .

Количество СМ зарубежного производства составляет около 51% из общего количества типов машин.

Степень обновления ПСМ за последние три года 8...10% (для поддержания стабильного состояния ПСМ требуется 12...14%).

Доля продаж российской техники составляет порядка 30% общего объема продаж, но со второго полугодия 2021 года отмечается рост доли продаж отечественных машин вследствие увеличения утилизационного сбора (УС), в основном ведущего к удорожанию импортной техники.

За последние пять лет наблюдается рост стоимости строительной техники в пределах 7%, но на 2021 год замечено удорожание отечественных машин на 13,4%, импортных 10,6%. Отечественные машины подорожали в основном из-за двукратного роста стоимости металлов, импортные – по причине повышения УС.

С ростом УС стоимость бывшей в употреблении (БУ) техники приблизилась к стоимости новой машины, поэтому многие предприятия принимают решение в пользу покупки новой.

Власти реализации строительной техники в 2021 году наблюдался прирост объема лизинговых услуг на 17% по сравнению с 2020 годом. Данный позитивный факт вызван тем, что с середины 2020 года реализуется Программа льготного лизинга специализированной техники и оборудования в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03 июня 2020 г. №811.

Аренда спецтехники в России находится в фазе активного роста. Прирост рынка аренды строительной техники составляет около 50% в год, количество арендных компаний ежегодно удваивается.

На основании анализа рынка строительной техники можно указать основные тенденции, касающиеся формирования парка машин: преимущественный рост продаж отечественной техники; повышенный рост стоимости СМ; сокращение продаж БУ машин; возрастание доли лизинга и аренды.

4.2. Результаты анализа потребительских качеств СМ с точки зрения эксплуатирующих предприятий

При проведении анализа использованы результаты экспертных оценок, проведенных с 1993 по 2019 годы Институтом Проблем транспорта РАН, Национальным Агентством промышленного маркетинга, группой компаний «ИКО», компанией «Стройтехконсалтинг», «Научно-производственной компанией «НТМТ» и Автомобильно-дорожным факультетом СПбГАСУ, в которых участвовал автор.

Опрос проводился по 15 параметрам. В опросах предыдущих лет на первое место по рейтингу выходила надежность. Но, начиная с 2016 года, на первое место вышли «Суммарные эксплуатационные расходы» с небольшим опережением 1,0...1,5% (рис. 3). Этот показатель отражает эффективность

использования техники. Остальные 14 показателей далеко отстают от «надёжности» и «эксплуатационных расходов». Отсюда делаем вывод, что эффективность и надёжность наиболее востребованные потребителями качества машин. Поэтому эти показатели должны быть одними из основных критериев оптимизации парка техники.



Рис. 3. Результаты опроса потребителей СМ в 2019 г.

5. Математические модели процессов, описывающих условия эксплуатации и влияющих на формирование ПСМ

В качестве результатов представлены частые математические модели, входящие в состав модели многопараметрической оптимизации ПСМ – формула (1).

Динамика коэффициента готовности и стоимости машин в функции возраста

Надежность наиболее удобно описывать комплексным ее показателем – коэффициентом готовности в функции времени, который рассчитывается по снижению годовой наработки машин, которая, в свою очередь, связана с простоями в неплановых ремонтах вследствие внезапных отказов (рис. 4).

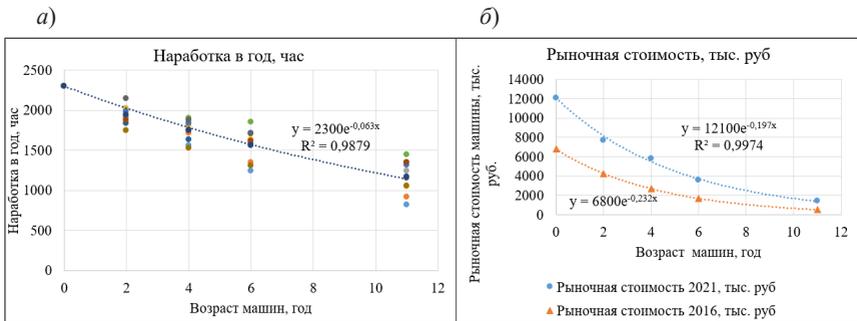


Рис. 4. Техничко-экономические показатели экскаватора ЕК-270 в функции возраста машин: а – динамика расходования ресурса на август 2021 года; б – динамика фактической стоимости на август 2021 года и 2016 год

На рис. 4 величина « $e^{-0.063x}$ » есть выражение коэффициента готовности с параметром x , отражающим срок службы.

Целесообразность покупки машин со сроком эксплуатации и проведения капитального ремонта

Линия снижения наработки (см. рис. 4, а) показывает интенсивность расходования ресурса машины, а по линии изменения фактической стоимости (см. рис. 4, б) можно судить о себестоимости единицы остаточного ресурса на момент покупки БУ машины. Поэтому соотношение снижения относительных величин наработки $T_{отн}$ и фактической стоимости $C_{отн}$ позволяет ответить на вопрос целесообразности покупки машин со сроком эксплуатации (рис. 5). Т.к. это соотношение меньше единицы, то на момент времени проведения анализа, август 2021 года, покупать БУ машины нецелесообразно. Данный факт объясняется тем, что стоимость СМ за последние два года выросла на 30...35%, а ресурс машин не увеличился. Еще три года назад покупка БУ машины, определенного интервала срока службы, была экономически выгодна.

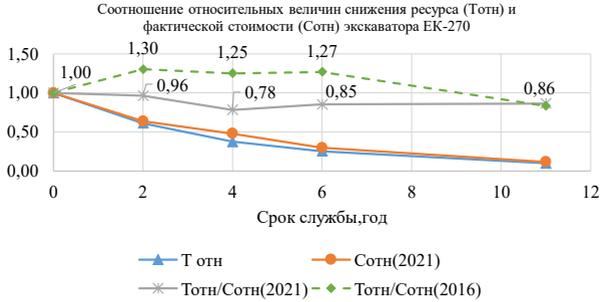


Рис. 5. Соотношение относительных величин остаточного ресурса $T_{отн}$ и фактической стоимости машины $C_{отн}$ на август 2021 года

Описанная методика позволяет ответить на вопрос и о целесообразности проведения капитального ремонта (КР) путем сравнения аналогичных относительных величин с проведением КР и без него (рис. 6). Численный расчет был выполнен по данным Челябинского завода специальных машин (ЧЗСМ) (<https://zavod-chzsm.com/pr-cat/buldozery/>). Вывод аналогичен вышепоказанному – КР проводить нецелесообразно по той же причине, а именно, удорожанию машин.

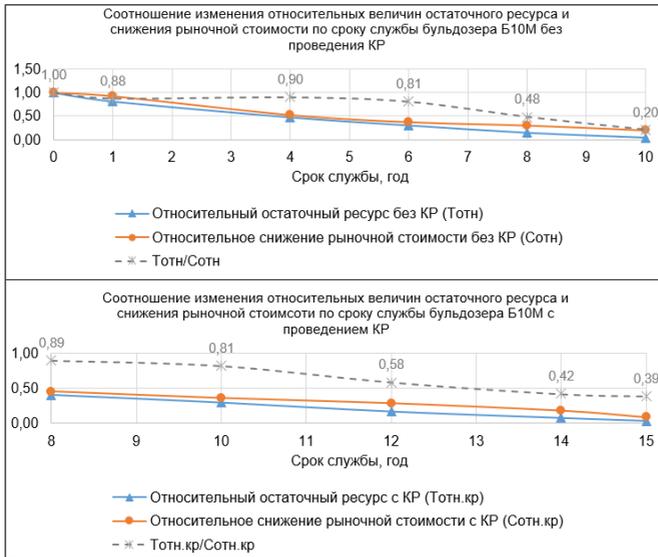


Рис. 6. Соотношение изменения относительных величин остаточного ресурса и снижения фактической стоимости по сроку службы бульдозера Б10М с проведением и без проведения КР

Полученные результаты анализа позволили сделать два важных вывода с точки зрения формирования ПСМ – покупка машин со сроком эксплуатации и проведение капитального ремонта при действующей стоимости СМ нецелесообразны.

Математическая модель влияния утилизационного сбора на процесс формирования ПСМ

Все физические и юридические лица, покупающие или выпускающие спецтехнику в России, обязаны заплатить разовый утилизационный сбор (УС). Он предназначен для сохранения и улучшения экологической ситуации и направляется в госбюджет. Постановлением Правительства РФ утверждены ставки утилизационного сбора на СМ в 2021 году.

Сумма утилизационного сбора (C_{yc}) рассчитывается по формуле:

$$C_{yc} = BC \cdot K_y,$$

где BC – Базовая ставка (172 500 рублей без НДС, 203 550 рублей с НДС); K_y – установленный коэффициент, который зависит от типа машины, её возраста и мощности двигателя и с 01.01.2021 значительно возрастает.

Для использования в программе оптимизации ПСМ математическая модель расчета фактической стоимости машины с учетом УС представлена в виде:

$$C_{my}(t) = C_m(t) \cdot BC \cdot \begin{cases} K_{y1}, & \text{если } t \leq 3 \\ K_{y2}, & \text{если } t > 3 \end{cases} \quad (5)$$

где $C_m(t)$ – фактическая стоимость машины в функции срока службы t ; BC – базовая ставка УС; K_{y1} и K_{y2} – коэффициенты УС, зависящие от срока службы машины.

Для использования в программе оптимизации ПСМ разработана подпрограмма расчета в Excel величины УС.

Математическая модель влияния инфляции на процесс формирования ПСМ

Удорожание отечественных СМ, помимо УС, обусловлено следующими причинами:

Инфляция стоимости промышленной продукции, оцениваемая с помощью «индекса стоимости производителей» (ИЦП), с 2016 года колеблется в пределах 3...5%;

Изменение стоимости импортных комплектующих, связанное с курсом иностранной валюты.

«Непредсказуемое» изменение стоимости отечественных материалов и комплектующих (так, завод «Кранэкс» с января по август 2021 года трижды корректировал стоимость своей продукции из-за удорожания металла, поставляемого «Северсталью»);

Внутри-и-внешнеполитические события, влияющие на условия производства (например, сокращение производства техники на 5...20 % в 2020 году по причине самоизоляции части сотрудников из-за коронавируса, межгосударственные санкции).

На основании изложенного можно считать среднегодовое повышение стоимости отечественных СМ равным 13%. Стоимость иностранной техники обусловлена рынком и растет в год на 10...12 %. Причем стоимость новой и БУ техники растет примерно в одинаковом размере.

Для использования в программе оптимизации ПСМ разработана подпрограмма расчета в Excel стоимости машин С_м с учетом величины инфляции, базирующаяся на уравнении

$$C_m(t_c, t_o) = C_m(1,1) \cdot \exp[-K_c \cdot (t_c - 1)] \cdot K_n^{t_o - 1}, \quad (6)$$

где K_c – коэффициент старения по фактической стоимости; K_n – коэффициент инфляции; t_c – срок службы, t_o – год оптимизации.

6. Методика выполнения многопараметрической оптимизации ПСМ в программной среде MS Excel

Задача методики – выбор оптимального состава парка по возрастной структуре, отвечающего заданной целевой функции, например, мощности парка по наработке, максимуму коэффициента сохранения эффективности, минимуму капитальных вложений, сроку окупаемости. Методика реализована в программной среде Excel.

Новизна разработанной методики заключается в следующем:

Введены блоки оптимизации по новым целевым функциям:

– коэффициенту сохранения эффективности $Kэ(t)$;

– уровню рентабельности и другим показателям, отражающим текущие параметры рынка СМ и предпочтения потребителей машин – итого 12 целевых функций по сравнению с 7, которые были в предыдущей версии программы

Введены в программу дополнительные параметры (численные характеристики изменяемых величин, ограничения, пределы изменений), позволившие применить вместо «Симплекс метода» линейной оптимизации нелинейный метод «Обобщенного понижающего градиента (ОПГ)», дающего более широкий спектр возможных решений сложных нелинейных моделей.

Введены подпрограммы расчета динамики коэффициента сохранения эффективности, прогнозирования стоимости машин с учетом утилизационного сбора и инфляции при оптимизации ПСМ.

Введены блоки сравнения показателей исходного и нового парка машин.

В результате новая версия Программы получила новые возможности, а именно:

– выдавать решение по оптимизации ПСМ, наиболее точно учитывающее текущее состояние рынка СМ и отражающее предпочтения потребителей машин;

– проводить расчеты более совершенным методом нелинейной оптимизации;

– наглядно представлять результаты расчета для выбора наиболее подходящего решения из вариантов по различным критериям оптимизации. На новую версию Программы получено Свидетельство авторского права на программу для ЭВМ № 2019619466. В основу Методики положено разбиение парка машин на возрастные группы (ВГ) по годам (рис. 7, строка 15) с последующим расчетом показателей по каждой ВГ в год.

Во втором блоке (рис. 8) приведены параметры исходного парка машин А, подлежащего изменению с заданной целью, например, повышении мощности парка по наработке с заданным интервалом, указанным ниже на рис. 4.5. Индекс «а» при параметрах показывает принадлежность к парку А. Значение $Ra0 = 0,82$ (ячейка О-37) соответствует уровню рентабельности при отсутствии отказов ($Kг = 1$). Средняя себестоимость машино-часа (ячейка М-36) служит для выбора целесообразной цены машино-часа Цмч (ячейка D-7, рис. 4.1), обеспечивающей допустимое значение коэффициента сохранения эффективности, установленное исследованиями. Естественно, Цмч должна соответствовать и рыночным ценам на аренду техники.

В третьем блоке «Результаты оптимизации парка машин» (рис. 9) показаны собственно варианты обновления ПСМ (строки 43 и 45), искомые значения количества машин X_i , рассчитанные программой, и капитальные вложения в каждый вариант. Новые машины поступают в первую ВГ, не новые во вторую-четвертую, продаются и списываются их пятой-десятой. В КР уходят из пятой ВГ и после ремонта поступают во вторую. Суммарные капитальные вложения вычисляются в ячейке М-48 (это первая целевая функция ЦФ1) и не должны превышать заданной величины (ячейка О-48). Оптимизация производится с использованием встроенной функции Excel «Поиск решения».

Четвертый блок (рис. 10) содержит параметры нового парка машин В, количество машин в ВГ которого (строка 52) равно суммам количества машин в соответствующих ВГ парка А и значений в ячейках строк 43 и 46. Результаты расчета каждого показателя парка В (столбец N) могут применяться в качестве целевых функций оптимизации ПМ. Наибольшую эффективность ПМ получаем при оптимизации по максимуму коэффициента сохранения эффективности. Также получают и высокие значения уровня надежности по коэффициентам $Kг$ и $Kэ$. Т.е. данное решение наиболее полно отвечает результатам исследования рейтинга потребительских качеств машин, полученным в диссертации.

Блок 1. Параметры возрастных групп											
Наименование параметра	Возрастная группа										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
17	Стоимость продажи машины, млн руб.	8.84	7.34	6.03	4.85	4.07	3.34	2.74	2.25	1.85	1.52
18	Стоимость покупки машины, млн руб.	9.84	8.16	6.70	5.60	4.52	3.71	3.05	2.50	2.05	1.69
19	Коэффициент готовности	0.969	0.939	0.910	0.882	0.854	0.828	0.802	0.777	0.753	0.730
22	Наработка в год, час	2228.7	2159.6	2092.6	2027.7	1964.8	1903.9	1844.9	1787.7	1732.2	1678.5
23	Затраты на эксплуатацию, млн руб.	1.15	1.10	1.03	1.07	1.31	1.35	1.30	1.44	1.49	1.53

Рис. 7. Параметры возрастных групп

Блок 2. Характеристики исходного парка машин												
Наименование параметра	Исходный парк машин (парк А)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Сумма	
24	Исходное количество машин	2	2	3	3	1	2	2	1	1	1	18
27	Т _а , маш-ч	4457.4	4319.1	6277.8	6083.1	1964.8	3807.8	3689.7	1787.7	1732.2	1678.5	35798
28	Наработка в год, час	0.108	0.104	0.152	0.147	0.047	0.092	0.089	0.043	0.042	0.041	0.865
29	Частный коэффициент готовности ВГ	2.30	2.38	3.68	3.80	1.31	2.70	2.78	1.44	1.48	1.53	23.39
30	Затраты на эксплуатацию, млн руб.	5.14	5.14	7.71	7.71	2.57	5.14	5.14	2.57	2.57	2.57	46.26
31	Условно-остаточные затраты, млн руб.	7.44	7.52	11.39	11.51	3.88	7.84	7.92	4.01	4.05	4.10	69.65
32	Суммарные затраты, млн руб.	13.37	12.96	18.83	18.25	5.89	11.42	11.07	5.36	5.20	5.04	107.39
33	Выручка, млн руб.	5.93	5.44	7.44	6.74	2.02	3.59	3.15	1.36	1.14	0.94	37.74
34	Прибыль, млн руб.	1669.32	1740.43	1814.30	1891.72	1972.87	2057.96	2147.21	2240.83	2339.06	2442.17	2031.64
36	Себестоимость машино-часа, руб.	0.80	0.72	0.65	0.59	0.52	0.46	0.40	0.34	0.28	0.23	0.50
37	Уровень рентабельности	0.97	0.88	0.80	0.71	0.63	0.56	0.48	0.41	0.34	0.28	0.61
38	Коэффициент сохранения эффективности											R _{ав} (при K _г -1) = 0.82

Рис. 8. Блок 2. Характеристики исходного парка машин

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
39																
40																
Блок 3. Результаты оптимизации парка машин																
41	Номер ВГ, i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
	Варианты корректировки структуры	"-" Хлпк	"-" Хлп3	"-" Хлп4	"-" Хлп5	"-" Хлп6	"-" Хлп7	"-" Хлп8	"-" Хлп9	"-" Хлп10						
42	Искомые значения	0,0	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					Условия оптимизации
43	Капитальные вложения, млн руб.	0,0	0,0	38,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					Сумма
44																38,5
45	Искомые значения					"-" Хлр										
46	Капитальные вложения, млн руб.					0,0										0,0
47	Капитальные вложения всего, млн руб.					0,0										38,5
48																→ min (ЦФ1) ←-100

Рис. 9. Блок 3. Результаты оптимизации парка машин

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
49																
50																
51																
Блок 4. Характеристики нового парка машин																
	Номер ВГ, i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
	Новые машины	2	2	3	10	1	2	2	1	1	1					Сумма
52	Наработка в год, час	4467,4	4519,1	6277,8	20284,9	1964,8	3897,8	3699,7	1787,7	1732,2	1678,5					50000
53	Частей коэффициент полезности БГ	0,078	0,075	0,109	0,353	0,304	0,066	0,064	0,031	0,030	0,029					0,089
54	Затраты на эксплуатацию, млн руб.	2,30	3,68	12,86	1,31	2,70	2,78	1,44	1,48	1,53	32,26					→ max (ЦФ9)
55	Успевание-постоянные затраты, млн руб.	5,14	5,14	7,71	25,71	2,57	5,14	2,57	2,57	2,57	64,26					→ max (ЦФ6)
56	Суммарные затраты, млн руб.	7,44	7,52	11,39	38,37	3,88	7,84	7,92	4,01	4,05	4,10					→ max (ЦФ7)
57	Выручка, млн руб.	13,37	12,96	18,83	60,85	6,89	11,42	11,07	5,36	5,20	5,04					150,00
58	Прибыль, млн руб.	5,93	5,44	7,44	22,48	2,02	3,59	3,15	1,36	1,14	0,94					→ max (ЦФ8)
59																Среднее
60	С/мч	1689,92	1740,43	1814,30	1891,72	1972,87	2057,96	2147,21	2240,83	2339,06	2442,17					1775,09
61	Уровень рентабельности	0,80	0,72	0,65	0,59	0,52	0,46	0,40	0,34	0,28	0,23					→ max (ЦФ10)
62	Коэффициент сохранения эффективности	0,97	0,88	0,80	0,71	0,63	0,56	0,48	0,41	0,34	0,28					0,72
63																→ max (ЦФ11)
64	Срок окупаемости капитальных вложений, год															2,45
																→ max (ЦФ12)

Рис. 10. Блок 4. Характеристики нового парка машин

На рис. 11 представлен фрагмент блока сравнения показателей исходного и нового парка машин, встроенного в Excel-программу.

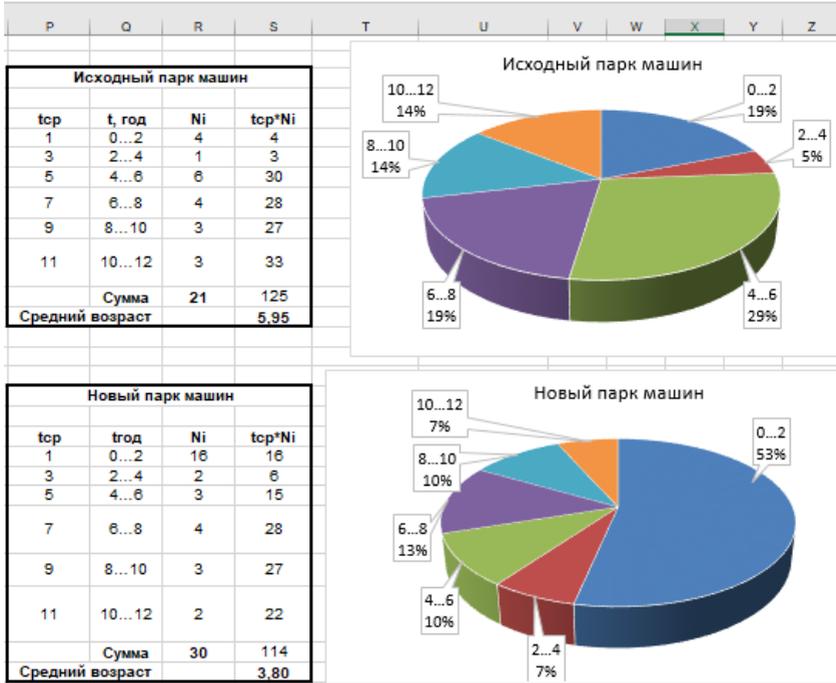


Рис. 11. Фрагмент листа Excel с анализом возрастной структуры исходного и нового парка машин: t_{cp} – средний возраст машин в возрастной группе (ВГ); t_i – временной интервал в ВГ; N_i – количество машин в возрастной группе

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Достигнута цель диссертационной работы – разработана методика многопараметрической оптимизации ПСМ в меняющихся условиях эксплуатации, учитывающей условия формирования главной характеристики парка машин – наработки и обеспечивающей сравнительную оценку вариантов оптимизации ПСМ.

2. Решены задачи диссертационной работы, представляющие ее научную новизну:

- выполнен анализ состояния ПСМ и основных тенденций в развитии рынка строительной техники в РФ, позволивший внести корректировки в частные математические модели процессов формирования ПСМ;

– выполнен анализ потребительских качеств СМ с точки зрения эксплуатирующих предприятий, в результате чего добавлены новые целевые функции в программу оптимизации ПСМ, в частности, коэффициент сохранения эффективности;

– разработана математическая модель многопараметрической оптимизации ПСМ, содержащая новые критерии оптимизации ПСМ;

– разработана математическая модель расчета коэффициента сохранения эффективности, базирующаяся на новых теоретических и экспериментальных данных;

– разработана математическая модель расчета операционного времени работы ПСМ, учитывающая специфику эксплуатации ПСМ;

– разработаны математические модели характеристик условий эксплуатации, влияющих на процессы формирования ПСМ, входящие в виде подпрограмм в программу оптимизации ПСМ;

Разработана методика многопараметрической оптимизации ПСМ, базирующаяся на новой Excel-программе оптимизации ПСМ, защищенной свидетельством авторского права на программу для ЭВМ.

3. Вариант оптимизации ПСМ по новой целевой функции – коэффициенту сохранения эффективности, обеспечивает сокращение срока окупаемости капитальных вложений в два раза, дает повышение показателей надежности на 15%, снижение среднего возраста ПМ и уменьшение количества машин в парке на 10% .

4. Новизна нового варианта методики подтверждена свидетельством на программу для ЭВМ № 2019619466.

5. Практическая значимость методики подтверждена актами внедрения в ООО «Севердорстрой» и использования в учебном процессе в СПбГАСУ.

6. Расчет экономической эффективности от внедрения методики показал, что срок ее окупаемости только в части сокращения трудозатрат по оптимизации парка машин составляет два года.

7. Комплекс научных положений, разработанный в диссертационной работе, содержит решение научной задачи, имеющей значение для развития строительной отрасли, а также для других отраслей знаний, рассматривающих вопросы оптимального формирования парков машин и оборудования.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Чечуев В. Е. Анализ рынка дорожно-строительных машин в России и эволюция потребительских качеств этих машин / Максимов С. Е., Репин С. В., Зазыкин А. В., Чечуев В. Е. // Строительные и дорожные машины. – 2019. – № 7. С. 3–12 (0,6 п. л.).

2. Чечуев В. Е. Методика расчета коэффициента сохранения эффективности строительных машин по данным эксплуатации / Чечуев В. Е. // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 5. С. 15–20 (0,4 п.л.).
3. Чечуев В. Е. Анализ состояния рынка строительных машин в России / Репин С.В., Чечуев В.Е., Грушецкий С.М., Евтюков С.А. // Строительные и дорожные машины, 2021, № 9, С. 11–13. (0,2 п.л.)
4. Чечуев В. Е. Состояние и тенденции развития рынка дорожно-строительной техники в России / Репин С.В., Чечуев В.Е., Евтюков С.А., Максимов С.Е., Зазыкин А.В. // Путь навигатор, 2021, № 5, С. 4–9 (0,4 п.л.).

Патенты, свидетельства на программу для ЭВМ

5. Чечуев В.Е. Свидетельство на программу для ЭВМ № 2019619466, 09.07.2019. Оптимизация состава парка строительных машин / Репин С.В., Зазыкин А.В., Чечуев В.Е.

Издания, индексируемые в Скопус

6. Chechuev V.E. Planning methods for machinery restoration repairs for trunk pipelines construction in North S.V. Repin, S.E. Maximov, A.V. Zazykin & V.E. Chechuev // Contemporary Problems of Architecture and Construction. Proceedings of the 12th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction (ICCPAC-2020), November 25-26, 2020, Saint Petersburg, Russia. P. 393–400. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003176428-76/planning-methods-machinery-restoration-repairs-trunk-pipelines-construction-north-repin-maximov-zazykin-chechuev?context=ubx&refId=0bc2f223-fb62-4c66-90da-50b62c075107>. DOI <https://doi.org/10.1201/9781003176428> (0,6 п.л.).

Прочие издания

7. Чечуев В.Е. Современное состояние парка машин в строительных организациях России / Чечуев В.Е., Репин С.В. // в кн. «Актуальные проблемы современного строительства. Материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб: СПбГА-СУ – 2018. – С. 111–116 (0,5 п.л.).
8. Чечуев В.Е. Technique of optimization of life cycle of construction machines on the basis of data of operation / Репин С.В., Зазыкин А.В., Евтюков С.С., Чечуев В.Е. Sciences of Europe T.1, № 33, 2018. Электронная версия с. 61–66. <http://european-science.org/wp-content/uploads/2018/12/VOL-1-No-33-2018.pdf> (0,5 п.л.).
9. Чечуев В.Е. Метод определения периодичности замен элементов транспортно-технологических машин по условию обеспечения заданного уровня безопасности дорожного движения. Авторы (сотрудники СПбГАСУ): Репин С.В., д.т.н, профессор, Зазыкин А.В., к.т.н, доцент, Чечуев В.Е., аспирант / межвузовская научно-практическая конференция «Национальная безопасность: проблемы, достижения и перспективы развития транспортного комплекса страны» 25 апреля 2019 года. Военный институт (железнодорожных войск и сообщений) – Петергоф, 2019. – С. 161–170 (0,6 п.л.).

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 13.07.2022. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 81.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.