

*На правах рукописи*

**Сидоров Борис Борисович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗРАСТНОЙ  
СТРУКТУРОЙ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО ПАРКА НА БАЗЕ  
КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ С УЧЕТОМ  
ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и  
оборудование для агропромышленного комплекса

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

**Научный руководитель:** **Карелина Мария Юрьевна,**  
доктор технических наук, профессор, проректор  
ФГБОУ ВО «Государственный университет  
управления»

**Официальные оппоненты:** **Пухов Евгений Васильевич,**  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Техническая эксплуатация  
транспорта» ФГБОУ ВО «Рязанский  
государственный агротехнологический  
университет имени П. А. Костычева»;

**Сибирёв Алексей Викторович,**  
доктор технических наук, заведующий отделом  
«Технологии и машины для овощеводства»  
ФГБНУ «Федеральный научный  
агроинженерный центр ВИМ».

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный аграрный университет»

Защита состоится 13 июня 2024 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел.:8 (499) 976-17-14.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета [www.timacad.ru](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 35.2.030.03,  
к.т.н., доцент

Н. Н. Пуляев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Выбор наиболее эффективного варианта использования машинно-тракторного парка (МТП) применительно к конкретным условиям эксплуатации с учетом потребительских свойств, реальных объемов и сложившейся возрастной структуры парка является сложной оптимизационной задачей. Состав и структура машинно-тракторного парка должны соответствовать и учитывать специфические условия эксплуатации, а именно: возможным объемам и срокам выполнения работ, оптимальному сочетанию агротехнических сроков выполнения технологических операций, учитывающих климатические и географические условия, влияющие на увеличение затрат на содержание парка. Обеспечивать научное обоснованные размеры текущего обновления парка сельскохозяйственной техники необходимо применяя методики управления возрастной структурой машинно-тракторного парка адаптированные к современным условиям его эксплуатации.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросы, связанные с управлением возрастной структуры парка подвижного состава, освещались и рассматривались в научных трудах Авдонькина Ф.Н., Аринина И.Н., Бондаренко В.А., Говорущенко Н.Я., Варнакова В.В., Гатаулина А.И., Гобермана В.А., Гостева В.А., Дидманидзе О.Н., Дзоценидзе, Т.Д., Кузнецова Е.С., Кормакова Л.Ф., Королькова Ю.А., Пехутова А.С., Прудовского Б.Д., Скороходова А.Н., Сорокина А.А., Улезко В.В., Хасанова Р.Х., и других авторов. Работы этих авторов явились основой для проведения данного исследования. В проанализированных научных работах динамика изменения показателей технического состояния машинно-тракторного парка в процессе технической эксплуатации (ТЭ), как правило, оценивается непрерывными формами математических зависимостей. Значимой ролью данного подхода является простота математического представления исследуемых процессов. Но реальная практика технического обслуживания и ремонта техники (ТО и Р) показывает, что данный подход может приводить к неточностям, связанным с оценкой деятельности машинно-тракторного парка отдельного предприятия, что негативно отражается на процедурах управления возрастной структурой. В исследовании предполагается использовать дискретные формы представления показателей ТЭ для уточнения зависимостей изменения реализуемых на практике значений технических показателей: коэффициента технического использования и срока службы в целях совершенствования методики управления возрастной структурой машинно-тракторного парка.

**Цель работы:** разработка методики управления возрастной структурой машинно-тракторного парка с учетом потребительских свойств транспортно-технологических машин, определяемой дискретной математической моделью изменения номенклатуры показателей ТО и ТР.

**Задачи исследования:**

1. Анализ современной возрастной структуры и обоснование необходимости регулирования процессов управления возрастной структурой машинно-тракторного парка предприятий АПК.

2. Определение соответствия методологической базы управления возрастной структурой машинно-тракторного парка предприятий АПК актуальным требованиям научно-технического прогресса и условиям функционирования.

3. Разработка научных подходов управления возрастной структурой на основе математической модели дискретных зависимостей изменения технического состояния машинно-тракторного парка предприятий АПК.

4. Разработка математической модели представления в дискретной форме показателей удельной трудоёмкости ТО и ТР и коэффициента технического использования транспортно-технологических машин предприятий АПК, позволяющей уточнить методику управления возрастной структуры парка с учетом потребительских свойств.

5. Разработка алгоритма, автоматизирующего процесс процедуры управления возрастной структурой машинно-тракторного парка на базе оперативного анализа показателей ТО и ТР, представленных в виде дискретных зависимостей изменения в процессе эксплуатации.

6. Технико-экономическая оценка применения разработанной методики управления возрастной структурой машинно-тракторного парка.

**Научная новизна заключается в разработке:**

1. математической модели управления возрастной структурой машинно-тракторного парка предприятий АПК, определяющую рациональный срок служб транспортно-технологических машин посредством дискретной формы анализа показателей ТО и ТР;

2. графоаналитических зависимостей, определяющих расхождение значений сроков службы транспортно-технологических машин, на основе сравнения значений показателей ТО и ТР, определяемых посредством непрерывных и дискретных математических форм представления;

3. алгоритма автоматизированной реализации метода управления возрастной структурой парка транспортно-технологических машин предприятий АПК на базе оперативного анализа комплексных показателей ТО и ТР.

**Теоретическая значимость** заключается в разработке научного метода, позволяющего вырабатывать эффективные решения по управлению возрастной структурой парка транспортно-технологических машин предприятий АПК посредством представления показателей ТО и ТР в виде дискретных математических зависимостей.

**Практическая ценность результатов работы** диссертационного исследования определяется возможностью внедрения в практику предприятий АПК следующих результатов:

- программного обеспечения, выполненного по алгоритму автоматизированной реализации метода управления возрастной структурой

парка транспортно-технологических машин предприятий АПК на базе оперативного анализа комплексных показателей ТО и ТР.

- общей методики управления возрастной структурой машинно-тракторного парка на базе модели дискретных форм зависимостей показателей, локализуемой для частных случаев предприятий АПК.

Практические результаты исследования могут быть использованы предприятиями агропромышленного комплекса в целях эффективного управления возрастной структурой парка транспортно-технологических машин для обеспечения их эффективной эксплуатации.

**Объектом исследования** является технические средства производства сельскохозяйственных товаропроизводителей, включающие самоходные транспортно-технологические машины.

**Предмет исследования** методика, методы и математические модели управления возрастной структурой машинно-тракторных парков предприятий АПК, основанные на комплексных и удельных показателях технической эксплуатации.

**Методология и методы исследования.** При разработке методов и математических моделей управления возрастной структурой машинно-тракторных парков предприятий АПК применялась методология системного анализа, методы теории вероятностей, регрессионного анализа, математического, численного и прикладного моделирования процессов принятия управляющих решений.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель представления показателей удельной трудоёмкости ТО и ТР и коэффициента технического использования машинно-тракторного парка предприятий АПК в дискретной форме, позволяющая уточнить методику управления возрастной структурой парка с учетом его рационального срока службы.

2. Математическая модель управления возрастной структурой машинно-тракторного парка предприятий АПК, определяющая рациональный срок службы транспортно-технологических машин посредством дискретной формы анализа показателей ТО и ТР.

3. Графоаналитические зависимости, определяющие расхождение значений сроков службы транспортно-технологических машин на основе сравнения значений показателей ТО и ТР, определяемых посредством непрерывных и дискретных математических форм представления.

4. Алгоритм автоматизированной реализации метода управления возрастной структурой машинно-тракторного парка предприятий АПК на базе оперативного анализа комплексных показателей ТО и ТР.

5. Методики управления возрастной структурой машинно-тракторного парка на базе модели дискретных форм зависимостей показателей.

6. Технико-экономическое обоснование применения разработанной методики управления возрастной структурой машинно-тракторного парка.

**Достоверность результатов** исследования обеспечена системной проработкой проблемы управления возрастной структурой парка,

корректностью поставленных задач и их решением, результатами сравнения зависимостей, определяющих расхождение значений сроков службы транспортно-технологических машин на основе сравнения значений показателей ТО и ТР, определяемых посредством непрерывных и дискретных математических форм представления, а также основанием исследований на:

- использовании апробированных методов системного анализа и математического аппарата, программно-целевом методе, методах теории вероятностей, методах исследования операций и математической статистики;
- отсутствием противоречий с проведенными ранее исследованиями других авторов по управлению возрастной структурой парка транспортных и транспортно-технологических машин и их технической эксплуатации.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях:

1. Научный семинар «Чтения академика В.Н. Болтинского, Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 25-26 января 2023 года.
2. Международная научно-техническая конференция имени А.Ф. Ульянова «Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» 3-4 октября 2023 года.
3. Международная конференция «2022 Интеллектуальные технологии и электронные устройства в транспортных средствах и дорожно-транспортном комплексе» /International Scientific Conference «2022 Intelligent technologies and electronic devices in vehicle and road transport complex», Москва, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) 10-11 ноября 2022 года.
4. 26-я Московская международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы», Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 12-13 мая 2022 года.
5. Научный семинар «Чтения академика В.Н. Болтинского, Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 25-26 января 2022 года.

**Публикации.** По материалам исследований опубликовано 8 работ, в том числе 3 статьи в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов научных исследований.

**Структура и объем работы.** Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение, список литературы из 118 наименований и приложений с материалами, отражающими уровень практического использования результатов исследования. Работа изложена на 144 страницах основного текста.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** содержится общая характеристика работы, представлена актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи научного исследования, отражена научная новизна работы, а также достоверность результатов и их практическая значимость.

**В первой главе** проведен анализ известных исследований, в которых отмечается, что помимо потребительских свойств, расширяются требования к функциональным возможностям машинно-тракторного парка, которые определяются его составом и структурой. Состав и структура парка должна соответствовать специфическим условиям применения, а именно: возможным объемам и срокам выполнения работ, оптимальному сочетанию агротехнических сроков выполнения технологических операций, учитывающих климатические и географические факторы и, естественно, снижение затрат на содержание парка. Поэтому делается закономерный вывод о том, что для оптимизации структуры и состава машинно-тракторного парка сельскохозяйственной техники должны быть применены методы экономико-математического моделирования. По результатам анализа поставлены задачи исследований.

**Во второй главе** при исследовании динамики изменения технического состояния техники и её агрегатов в процессе технической эксплуатации (ТЭ), предлагается применение непрерывных форм функциональных зависимостей. Это позволяет при исследовании процессов ТЭ использовать классический аппарат математического моделирования и анализа, основанный на применении методов интегрирования и дифференцирования непрерывных функций.

Приведено изменение значения КТИ, в зависимости от пробега  $[L(t)]$ . Для единицы техники имеющей возраст  $[t]$  в период  $[t; t+1]$ , при этом будем считать, что:

$$L(t) = L_0 k^{tm}(t) = L_0 \exp(-\beta t); t = 1, 2, \dots, t^c - 1, \quad (1)$$

где  $L_0$  – значение наработки (пробега) единицы техники, имеющей возраст  $[t=0]$ , в период  $[t = 0 \dots 1]$ , или наработка (пробег) единицы техники в дискретную единицу времени;

$L(t)$  – значение наработки (пробега) возраста в  $[t]$  единиц времени;

$k^{tm}(t)$  – КТИ единицы техники с возрастом  $[t]$  времени за  $(t+1)$  интервал его эксплуатации. Следовательно:

$$L^c = \frac{L_0(1 - \exp(-\beta t^c))}{1 - \exp(-\beta)}. \quad (2)$$

Если единица техники имеет возраст  $[t_1]$  интервалов времени можно определить пробег за период времени  $[t_1; t_2]$ :

$$L(t_1, t_2) = L(t_1) + L(t_1 + 1) + \dots + L(t_2 - 1) = \frac{L(t_1)[1 - \exp(-\beta(t_2 - t_1))]}{1 - \exp(-\beta)}. \quad (3)$$

Формула (3) является общей формулой, которая связывает ожидаемый срок эксплуатации единицы техники с периодом эксплуатации, зависящим возраста единицы техники. Например, если  $[t_1 = 0]$  и  $[t_2 = t^c]$ , то результаты расчётов по формулам (2) и (3) тождественны.

Если прологарифмировать выражение (3) то, получим, что период времени  $[t_1; t_2]$ , за который единица техники реализует пробег  $[L(t_1; t_2)]$ , можно определить следующей по формуле:

$$t_1 - t_2 = \frac{-\ln\left[1 - \frac{L(t_1, t_2)}{L(t_1)}(-\exp(-\beta))\right]}{\beta}. \quad (4)$$

Из формулы (4) можно заключить, что общий срок службы единицы техники до достижения ей суммарного пробега эксплуатации  $[L^c]$  определяется по формуле:

$$t^c = \frac{-\ln\left[1 - \frac{L^c}{L_0}(-\exp(-\beta))\right]}{\beta}. \quad (5)$$

Результат (5) получается при если постановить в (2) значения  $[t_1 = 0]$  и  $[t_2 = t^c]$ . Тогда значение реализуемого КТИ единицы техники  $[\bar{k}^{\text{ТИ}}]$  за интервал эксплуатации  $[0, t^c]$  определяется по следующей формуле:

$$\bar{k}^{\text{ТИ}} = \frac{k_{\Sigma}^{\text{ТИ}}}{t^c}. \quad (6)$$

где  $k_{\Sigma}^{\text{ТИ}}$  - сумма КТИ единицы техники за интервал времени эксплуатации  $[0, t^c]$ , то есть фактически за время  $[t^c]$ .

Тогда можно определить:

$$k_{\Sigma}^{\text{ТИ}} = \sum_{t=0}^{t^c-1} k^{\text{ТИ}}(t) = \sum_{t=0}^{t^c-1} \exp(-\beta t) = \frac{1 - \exp(-\beta t^c)}{1 - \exp(-\beta)}. \quad (7)$$

Используя (6) и (7), получим:

$$\bar{k}^{\text{ТИ}} = \frac{1 - \exp(-\beta t^c)}{t^c [1 - \exp(-\beta)]}. \quad (8)$$

Тогда из (2) определяется: 
$$\frac{1 - \exp(-\beta t^c)}{1 - \exp(-\beta)} = \frac{L^c}{L_0}, \quad (9)$$

а, из (8) определяется: 
$$\frac{1 - \exp(-\beta t^c)}{1 - \exp(-\beta)} = t^c \bar{k}^{\text{ТИ}}. \quad (10)$$

Так как, в (9) и (10) левые части формул совпадают и равны сумме КТИ единицы техники  $[k_{\Sigma}^{\text{ТИ}}]$  за срок её эксплуатации, определяемый по формуле (7).

Тогда, получаем:

$$\frac{L^c}{L_0} = t^c \bar{k}^{\text{ТИ}}, \quad (11)$$

Следовательно, реализуемый КТИ единицы техники за весь срок её эксплуатации должен определяться по формуле:

$$\bar{k}^{\text{ТИ}} = \frac{L^c}{L_0 t^c}. \quad (12)$$

Так как:

$$\exp(-\beta t^c) = k_{\min}^{\text{ТИ}} \quad (13)$$

где  $k_{\min}^{\text{ТИ}}$  – КТИ единицы техники при её списании, то учитывая формулы (2), (7) и (8) можно получить следующие выражения:

$$L^c = \frac{L_0(1 - k_{\min}^{\text{ТИ}})}{1 - \exp(-\beta)}; \quad (14)$$

$$k_{\Sigma}^{\text{ТИ}} = \frac{1 - k_{\min}^{\text{ТИ}}}{1 - \exp(-\beta)}; \quad (15)$$

$$\bar{k}^{\text{ТИ}} = \frac{1 - k_{\min}^{\text{ТИ}}}{t^c [1 - \exp(-\beta)]}. \quad (16)$$

Приведенные выражения (14...16) являются формулами для определения, соответственно: наработки (пробега) единицы техники до списания, суммы КТИ и значения реализуемого КТИ за весь срок эксплуатации. Представим для сравнения формулы, которые были получены для определения аналогичных показателей с помощью методов классического математического аппарата:

$$1 - \exp(-\beta) = \beta. \quad (17)$$

Это объясняется тем, что показатели ТЭ были приведены в дискретной форме. Оценка погрешности, появившаяся в формулах, достаточно легко определяется. Представим формулу (17) следующим образом:

$$\exp(-\beta) = 1 - \beta. \quad (18)$$

Разложим в ряд функцию  $[\exp(-\beta)]$ , получим:

$$\exp(-\beta) = 1 - \frac{\beta}{1!} + \frac{\beta^2}{2!} - \frac{\beta^3}{3!} + \frac{\beta^4}{4!} - \dots. \quad (19)$$

Следовательно, в (18) приняты к расчётам только два первых члена формулы (19), то есть, произведена линеаризация экспоненциальной функции, то есть можно сделать выводы:

1) При значении параметра  $[\beta \leq 0,0141]$  любой произвольный член разложения (19), но не больше величины равной  $[10^{-4}]$ . То есть, если значение параметра равно  $[\beta \leq 0,014]$  выражение (17) справедливо с точностью до  $10^{-4}$ .

2) При значении параметра равным  $[\beta \leq 0,0447]$  достоверность представленных формул (гарантированная) составляет  $10^{-3}$ .

3) При значении параметра равным  $[\beta \leq 0,0774]$  гарантированная точность операций по этим формулам будет  $3 \cdot 10^{-3}$ .

4) При значении параметра  $[\beta \leq 0,1000]$  гарантированная точность операций по этим формулам будет находиться в пределе до  $5 \cdot 10^{-3}$ .

Анализ данного обстоятельства позволяет сделать вывод о том, что применять приведённый в данном пункте математический аппарат для оценки динамики изменения показателей ТЭ сельскохозяйственной техники можно лишь при специально определённом шаге дискретности, а не произвольно:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i; i = 0, 1, 2, \dots, t^c - 1. \quad (20)$$

На основании статистических исследований в применении практических расчётов, связанных с планированием и управлением показателями ТЭ машинно-тракторного парка (с учётом оценки эффективности и контроля), вполне может быть применима дискретная форма представления функциональных показателей.

Анализ моделей управления возрастной структуры машинно-тракторного парка показал, что модель дискретного списания в большей степени соответствует условиям работы сельскохозяйственной техники. Важным элементом является определение формы представления показателей технической эксплуатации единицы техники, отражаемых в показателе реализуемого качества.



Рисунок 1 – Схема адаптации модели управления возрастной структурой машинно-тракторного парка к современным условиям функционирования машинно-тракторного парка

Установлено, что применять дискретный математический аппарат для оценки динамики изменения показателей ТЭ сельскохозяйственной техники можно лишь при специально определённом шаге дискретности, а не произвольно. То есть комплексные показатели надёжности сельскохозяйственной техники – показатель качества, базирующиеся на определении КТИ или КТГ вполне представимы в дискретной форме, но при этом нужно учитывать важное обстоятельство – показатели надёжности базируются на расчёте показателей ТО и ТР рассматриваемой техники.

**В третьей главе** представлена методика, позволяющая реализовывать управление возрастной структурой машинно-тракторного парка с учетом потребительских свойств, определяемой дискретной математической моделью изменения номенклатуры показателей ТО и ТР учётом дополнения: три последние группы формализуются с возможностью учётом потребительских свойств единиц МТП, в которых происходит смена информационного состояния исследуемой системы.

На основе оптимизации стратегии списания и поступления новой техники в МТП разработана математическая модель выравнивания возрастной структуры. Введены следующие допущения и обозначения:

1. Рассматриваемая совокупность МТП однородная (парк состоит из однотипной техники или одного тягового класса приведения показателей ТО и ТР);
2. Все единицы МТП классифицированы по возрастному признаку на  $(N+1)$ -ю возрастную группу;

3. Транспортно-технологическая машина может быть списана после эксплуатации в рамках  $(N-1)$ -й и  $N$ -й возрастной группы и подлежит безусловному списанию после эксплуатации в  $(N+1)$ -й группе;

4. Замена списываемых транспортно-технологических машин осуществляется только новыми;

5. Списание старых и поступление новых транспортно-технологических машин осуществляется только в дискретные моменты времени  $j = 1, 2, \dots, N$ .

6. Шаг дискретной шкалы времени постоянный.

Каждая транспортно-технологическая машина переходит из любой возрастной группы в следующую в соответствии со стохастическими законами распределения случайных величин, то есть с вероятностями близкими к единице. Исключение составляют три последние возрастные группы.

Именно три последние группы формализуются с возможностью учёта потребительских свойств транспортно-технологических машин, то есть здесь происходит смена информационного состояния исследуемой системы.

Обозначим условия перехода в трёх последних возрастных группах  $p$ .

1) Из  $(N-1)$ -й возрастной группы транспортно-технологическая машина либо переходит в  $N$ -ю группу, либо списывается.

2) Из  $N$ -й группы транспортно-технологическая машина или переходит в  $(N+1)$ -ю группу, или списывается.

3) Из  $(N+1)$ -й возрастной группы транспортно-технологическая машина подлежит списанию в обязательном порядке;

Символом  $x_{ij}$  будем обозначать количество транспортно-технологических машин  $i$ -й возрастной группы, имеющееся в машинно-тракторном парке в  $j$ -й период планирования;

$$i = \overline{1, N+1}; j = \overline{1, N}; \quad (21)$$

Интенсивность «старения» транспортно-технологических машин за время  $\Delta t$  обозначим символом  $\beta$ ;

Коэффициент технического использования транспортно-технологической машины  $i$ -й возрастной группы будем определять выражением:

$$\text{КТГ} = \exp(-\beta(i-1)), i = \overline{1, N+1} \quad (22)$$

Возраст транспортно-технологических машин  $i$ -й возрастной группы принимаем равным:

$$t_i = (i-1)\Delta t; i = \overline{1, N+1}. \quad (23)$$

Сформулируем математически ограничительные условия этой задачи:

$$\left. \begin{aligned} x_{i1} &= a_i; i = \overline{1, N} \\ x_{ij} &= x_{i-1, j-1}; i = \overline{2, N-1}; j = \overline{2, N} \\ x_{ij} &\leq x_{i-1, j-1}; i = \overline{N, N+1}; j = \overline{2, N} \\ \sum_{i=1}^{N+1} x_{ij} &= A; j = \overline{1, N} \\ x_{ij} &\geq 0; i = \overline{1, N+1}; j = \overline{1, N} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

В качестве целевой функции примем математическое выражение с многокритериальной структурой КТГ:

$$\min_{1 \leq j \leq N} \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{N+1} x_{ij} \text{КТГ} \rightarrow \max_{\{x_{ij}\}} \quad (25)$$

$$\min_{1 \leq j \leq N} \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{N+1} x_{ij} \exp(-\beta(i-1)) \rightarrow \max_{\{x_{ij}\}} \quad (26)$$

где

$$\begin{cases} \text{КТГ}^{(1)} = \text{КТГ}_0^{(1)} e^{-\beta_1 t} \\ \text{КТГ}^{(2)} = \text{КТГ}_0^{(2)} e^{-\beta_2 t} \\ \text{КТГ}^{(3)} = \text{КТГ}_0^{(3)} e^{-\beta_3 t} \end{cases} \quad (27)$$

В рассматриваемой модели (24), (25), (26), (27) при условии, что исходная возрастная структура считается известной:

- 1) введена дополнительная  $(N+1)$ -я возрастная группа;
- 2) разрешено единиц МТП не из одной, а из трех возрастных групп – из  $(N-1)$ -й,  $N$ -й и  $(N+1)$ -й;
- 3) списание из трех последних возрастных групп производится при условии решения многокритериальной задачи определения КТГ с учетом потребительских свойств, определяемых, как отдельные критерии.

Сформулированная задача (24...27) относится к классу комбинаторных задач математического программирования. Таким образом, оптимальное решение этой задачи достигается при использовании следующих рекуррентных соотношений:

$$x_{i1} = a_i; \quad i = \overline{1, N}; \quad (28)$$

$$x_{1j} = \frac{A}{N}; \quad j = \overline{2, N}; \quad (29)$$

$$x_{ij} = x_{i-1, j-1}; \quad i = \overline{2, N-1}; \quad j = \overline{2, N}; \quad (30)$$

$$x_{N, j} = \begin{cases} x_{N-1, j-1}; x_{N, j-1} \geq \frac{A}{N}; & j = \overline{2, N} \\ x_{N-1, j-1} - \frac{A}{N} + x_{N, j-1}; & x_{N, j-1} < \frac{A}{N}; & j = \overline{2, N} \end{cases}; \quad (31)$$

$$x_{N+1, j} = \begin{cases} 0; & x_{N, j-1} \leq \frac{A}{N}; & j = \overline{2, N} \\ x_{N, j-1} - \frac{A}{N}; & x_{N, j-1} > \frac{A}{N}; & j = \overline{2, N} \end{cases}. \quad (32)$$

Проанализируем сформулированную задачу:

Соотношение (27) позволяет оценить многокритериальную структуру потребительских свойств МТП в системе управления возрастной структурой парка следующим образом:

$$\begin{cases} \Pi^{(1)} = \Pi_0^{(1)} e^{-\beta_1 t} \\ \Pi^{(2)} = \Pi_0^{(2)} e^{-\beta_2 t} \\ \Pi^{(3)} = \Pi_0^{(3)} e^{-\beta_3 t} \end{cases} \quad (33)$$

Характер изменения отдельных показателей качества техники во времени представлен на рисунке 2.

Соотношения (28) показывают, что в первый период планирования ( $j=1$ ) в качестве возрастной структуры служит вектор  $\{a_i\}$ ;  $i = \overline{1, N}$ , соответствующий сложившейся в сельскохозяйственном предприятии возрастной структуры МТП.

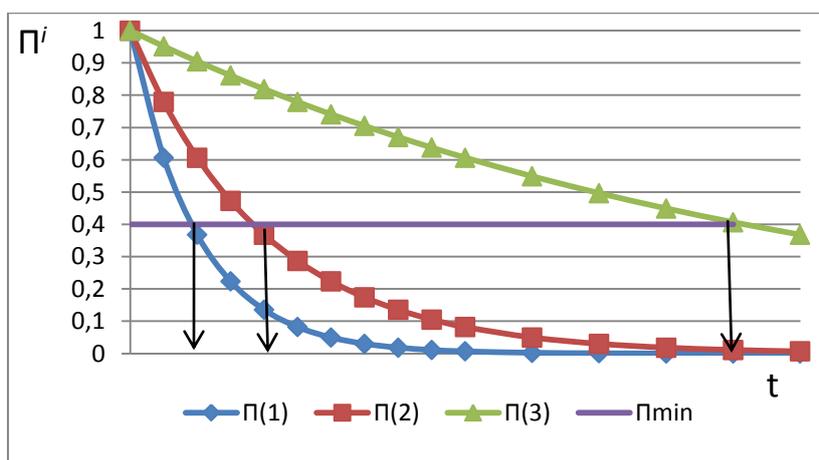


Рисунок 2 – Изменение отдельных показателей качества транспортно-технологических машин развернутых во времени

Соотношения (29) определяют стратегию приобретения новых транспортно-технологических машин и диктуют в каждый фиксированный момент времени ( $j$ ) приобретать одно и то же количество транспортно-технологических машин.

Соотношения (30) описывают динамику перехода транспортно-технологических машин из предыдущих возрастных групп в последующие в процессе эксплуатации машинно-тракторного парка хозяйства. Область действия этих соотношений распространяется на первые ( $N-1$ ) возрастные группы.

Соотношения (31) определяют стратегию списания транспортно-технологических машин из ( $N-1$ )-й группы и описывают процесс комплектования  $N$ -й возрастной группы.

Наконец, соотношения (32) определяют необходимость сохранения в парке транспортно-технологических машин в рамках дополнительной ( $N+1$ )-й возрастной группы.

Решение задачи повышение эффективности парка МТП представлены в виде определения параметров оптимизации и критериев оптимизации (таблица 1).

Таблица 1 – Определение параметров оптимизации, оптимизируемых параметров и критериев оптимизации

Дискретные состояния	Критерии оптимизации				Эффективность	
	КП		ТЭ	ЭП		
	Интервал ТО*	Удельная трудоёмкость ТР			Л	О
1	$s_{11} \cdot x_{11}$	$s_{12} \cdot x_{12}$	$s_{13} \cdot x_{13}$	$s_{14} \cdot x_{14}$	$d_1$	$D_s$
2	$s_{21} \cdot x_{21}$	$s_{22} \cdot x_{22}$	$s_{23} \cdot x_{23}$	$s_{24} \cdot x_{24}$	$d_2$	
...	...	...	...	...		
n	$s_{81} \cdot x_{81}$	$s_{82} \cdot x_{22}$	$s_{83} \cdot x_{83}$	$s_{84} \cdot x_{84}$	$d_8$	
N	$s_{i1} \cdot x_{21}$	$s_{i2} \cdot x_{22}$	$s_{i3} \cdot x_{i3}$	$s_{i4} \cdot x_{i4}$	$d_n$	

\* оптимизируемый параметр

Оптимизированные параметры:

1) Локальная эффективность МТП в количественных показателях для отдельных дискретных составов, определяемая по нескольким критериям эффективности.

2) Общая (глобальная) эффективность МТП во всех интервалах обратимых дорожных состояний.

Для определения текущей (фактической) эффективности МТП в отдельных дискретных состояниях создается исходная матрица эффективности, содержащая значения локальных показателей критериев оптимизации в отдельных дискретных состояниях исследуемого процесса.

Пример общего вида матрицы эффективности для восьми локальных дискретных состояний представлен в виде таблицы 2.

Методом «Следящий этап» формируются элементы матрицы эффективностей ( $\delta_{ij}$ ) численных значений показателей (таблица 2), представленные в относительных единицах, вычисленных по следующей формуле:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ij}}{\max_{1 \ll i \ll m} a_{ij}}, & \text{если } a_{ij} \rightarrow \max, \\ \frac{\min_{1 \ll i \ll m} a_{ij}}{a_{ij}}, & \text{если } a_{ij} \rightarrow \min, \end{cases} \quad (34)$$

Таблица 2 – Общий вид матрицы эффективностей

Дискретные состояния	КП*	ТП	ЭП	$D_s$
1	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$d_1$
2	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{24}$	$d_2$
...	...	....	...	...
8	$a_{81}$	$a_{82}$	$a_{83}$	$d_8$

\* оптимизируемый параметр

Далее для каждого дискретного состояния ( $n = \overline{1, l}$ ) решается задача линейного программирования:

$$\begin{cases} D_i = \sum_{j=1}^n \delta_{ij} s_j \rightarrow \max, \\ \sum_{j=1}^m s_j = 1, 0 \leq s_j \leq 1, c_j \geq s_{j+1}, j = \overline{1, m-1} \end{cases} \quad (35)$$

Результаты расчёта текущей эффективности системы представляются в виде графика (рисунок 3).

Результатом оценки эффективности по нескольким критериям оптимизации будет определение величины расхождения между проектными значениями (по одному критерию -  $d_{ij}^T$ ) и фактическому значению ( $d_{ij}^a$ ) с учетом актуальных требований среды эксплуатации (эксплуатационные, технико-экономические, безопасности и др.) в (N-1) возрастной группе.

$$\Delta d_{ij} = d_{ij}^T - d_{ij}^a, \quad (36)$$

при соблюдении условий:

$$d_i = \sum_{j=1}^m \delta_{ij} s_j \rightarrow \max, \quad (37)$$

$$\sum_{j=1}^m c_j = 1, 0 \leq c_j \leq 1, \quad (38)$$

где

$$s_j^{max} = \begin{cases} \frac{1}{k}, & \text{если } j \leq k, \\ 0, & \text{если } j > k, \end{cases} \quad (39)$$

где индекс  $k$  определяется из условия  $\delta_{kj} = \max_j \delta_{ij}$ .

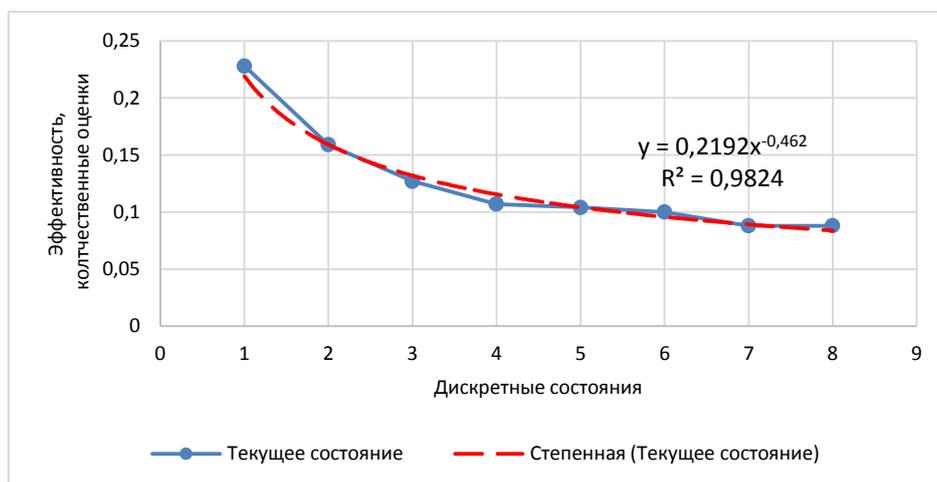


Рисунок 3 – Пример графика зависимости текущей эффективности системы для отдельных дискретных состояний

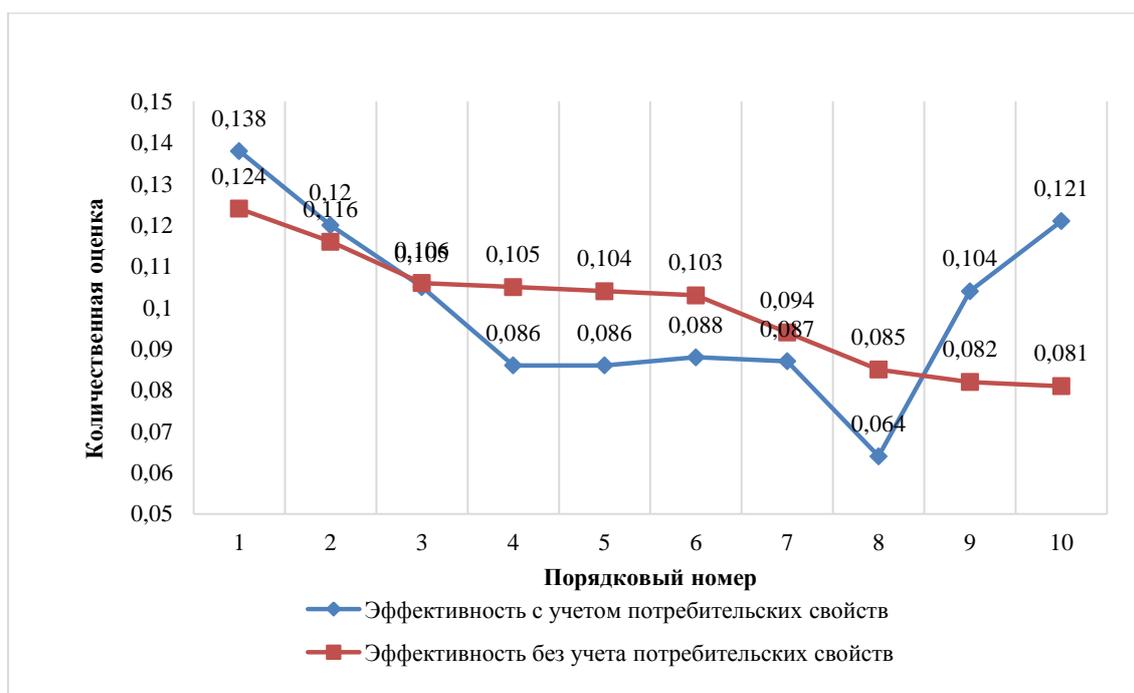
Решение задачи оптимизации сводится к нахождению  $s_{i1}$  определяющее максимальную эффективность  $d_n$  и  $D_s$

**В четвертой главе** произведены расчёты по математической модели (ММ) оценки сельскохозяйственной техники по нескольким критериям эффективности, необходимые для формирования оптимальной структуры управления возрастной структурой МТП, реализуемые в разработанном программном обеспечении.

На рисунке 4 представлена сравнительная диаграмма оптимального и текущего состояния эффективности транспортно-технологических машин в количественных оценках.

В результате расчёта для приведения возрастной структуры к оптимальному виду МТП сельскохозяйственного предприятия потребуется 72 мес. (6 лет). Ежегодно предприятие должно приобретать 50 новых тракторов (по 25 каждые полгода). Списание старых машин должно осуществляться из четырех последних возрастных групп: 14 из 11-й возрастной группы, 119 – из 12-й, 97 – из 13-й и 70 – из 14-й группы. Эксплуатация в дополнительных 13-й и 14-й группах потребуется на протяжении соответственно 3,5 и 2,5 года. Списание из 11-й возрастной группы будет осуществляться на протяжении 1,5 года.

Ожидаемое значение коэффициента технического использования парка МТП на протяжении всего планируемого периода будет постоянно возрастать (от 0,772 до 0,800).



Рисунке 4 – Сравнительная диаграмма оптимального и текущего состояния эффективности транспортно-технологических машин в количественных оценках

К концу планируемого периода этот коэффициент достигнет значения, равного нормативному  $\overline{k}_{\text{ти}} = 0,800$ .

К этому моменту возрастная структура парка будет соответствовать оптимальной, а для ее поддержания в дальнейшем потребуется каждые полгода списывать 25 и приобретать такое же количество транспортно-технологических машин.

Результаты апробации методики управления возрастной структурой машинно-тракторного парка модельного предприятия (холдинга) представлены на рисунке 5.

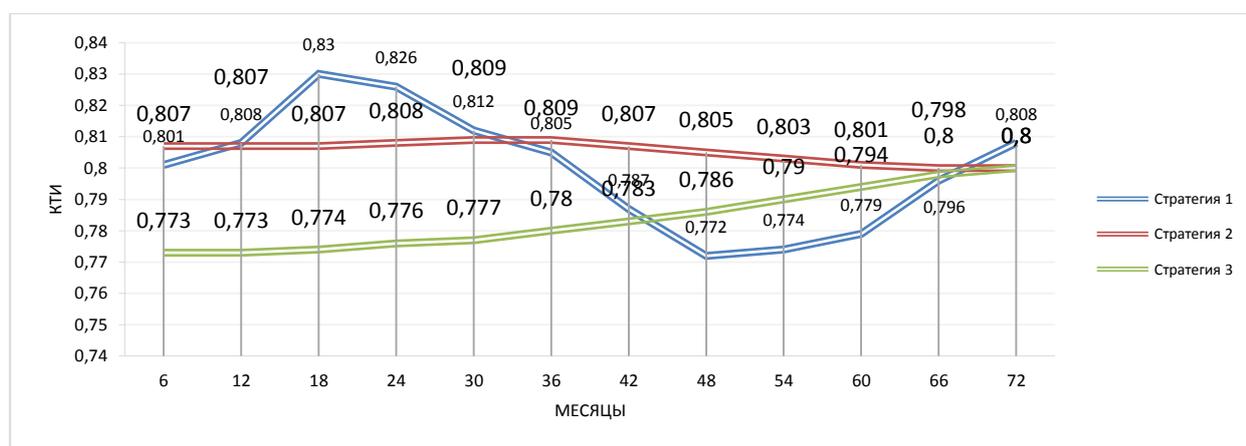


Рисунок 5 – Изменение значений КТИ в случае применения разработанной методики управления возрастной структурой МТП

**Пятая глава** посвящена перспективам использования исследованного метода управления возрастной структурой парка МТП по нескольким

критериям эффективности, необходимые для формирования оптимальной структуры управления возрастной структурой в виде специализированного программного обеспечения способствующая получить объективные оценки эксплуатационных качеств сельскохозяйственной техники для оптимального и фактического текущего состава реализованной в разработанном программном обеспечении для агрохолдингов или других сельскохозяйственных предприятий.

Из расчета экономической эффективности видно, что целесообразно внедрить программное обеспечение по управлению возрастной структурой машинно-тракторного парка. Экономия затрат на техническое обслуживание и ремонт МТП составляет 31 152 455 руб. Годовая экономия на среднестатистический парк тракторов модельного парка агрохолдинга составит 132 506 280 руб., а срок окупаемости единовременных затрат составит около 1,0 года.

### **Заключение**

1. Возрастная структура машинно-тракторного парка в Российской Федерации характерна преобладанием транспортно-технологических машин со сроками службы, превышающими 10 лет, который для тракторов составляет более 19 лет, для зерноуборочных комбайнов – свыше 15 лет, кормоуборочных комбайнов – свыше 16 лет, грузовых автомобилей – более 21 года.

2. Преобладание транспортно-технологических машин, имеющих значительный возраст и наработку приводит к тому, что имеет место низкая надежность, характеризующая низкой наработкой на отказы, в среднем составляющей 75...80 % от нормативной, а ежегодные потери урожая из-за низкой надежности транспортно-технологических машин составляют от 10 до 15 %.

3. Выбор наиболее эффективного варианта состава машинно-тракторного парка применительно к конкретным условиям эксплуатации с учетом реальных объемов производства новых машин и сложившейся возрастной структурой парка является сложной оптимизационной задачей, в которой важное значение имеет величина рационального срока службы транспортно-технологических машин.

4. Анализ моделей управления возрастной структурой машинно-тракторного парка показал, что модель дискретного списания в большей степени соответствует условиям работы сельскохозяйственной техники в силу интенсивной эксплуатации техники в условиях, которые превышают установленные требования к надежности для заданных условий эксплуатации.

5. Дифференцированная оценка потребительских свойств транспортно-технологических машин при определении возрастной структуры машинно-тракторного парка должна выполняться по трём основным группам: способность сельскохозяйственной техники к соблюдению технологических требований, определяемых условиями работы (технологические или агротехнические); производительность и экономичность техники (технико-экономические); свойства, обеспечивающие безопасность и комфорт водителя (общетехнические).

6. Разработана математическая модель оценки эффективности машинно-тракторного парка по нескольким критериям оптимизации, определяющая величину расхождения между проектными значениями (по одному критерию -  $d_{ij}^T$ ) и фактическому значению ( $d_{ij}^a$ ) с учетом актуальных эксплуатационных, технико-экономических требований, а также требований безопасности в каждой возрастной группе.

7. Разработано программное обеспечение, реализующее математическую модель оценки эффективности машинно-тракторного парка, позволяющее находить оптимальное решение по управлению возрастной структурой для любых вариантов состава.

8. Приведение сложившейся возрастной структуры машинно-тракторного парка модельного холдинга из 300 машин к оптимальной требует не менее 5,5 года и достигается путем ежегодного приобретения 50 новых единиц техники (по 25 каждые полгода).

9. Значение коэффициента технического использования при реализации метода управления возрастной структурой на примере модельного машинно-тракторного парка холдинга не снижается ниже нормативного КТИ = 0,8, а ожидаемое максимальное значение этого коэффициента для модельного парка будет достигнуто в 2026 году и составит КТИ = 0,809 (или 101,13 % от нормативного), таким образом, перепад в уровне работоспособности модельного парка за прогнозируемый период не превысит 1,13 %, что свидетельствует о высокой прогнозируемой эффективности работы модельного холдинга, эксплуатирующего транспортно-технологические машины.

10. Разработанная методика управления возрастной структурой машинно-тракторного парка позволяет не только выравнять возрастную структуру, но и решать данную задачу с учетом установленного целеполагания – равномерного повышения показателей использования транспортно-технологических машин, если они находятся на низком уровне, применение методов численного моделирования подтвердило, что оптимизационная модель может позволить сформировать МТП модельного холдинга (группы предприятий) с ожидаемым увеличением коэффициента технического использования от 0,772 до 0,800.

11. Применение разработанной методики управления возрастной структурой машинно-тракторного парка и реализующего ее программного обеспечения позволяет сократить затраты на техническое обслуживание и ремонт МТП на 31 152 455 рублей в ценах 2024 года для условий модельного парка агрохолдинга.

**Основные положения диссертации опубликованы  
в следующих работах:**

*Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Сидоров, Б. Б. Структура иерархической многокритериальной системы оценки качества транспортных машин, эксплуатируемых в

агропромышленном комплексе / Б. Б. Сидоров, Р. Р. Мирзаев, М. Ю. Карелина, А. В. Терентьев // Международный технико-экономический журнал. – 2022. – № 2. – С. 45-53 (ВАК по состоянию на 23.09.2022 № 1482).

2. Сидоров, Б. Б. Методика управления возрастной структурой МТП на базе дискретных форм представления показателей ТО и ТР / Б. Б. Сидоров, О. Н. Дидманидзе, М. Ю. Карелина // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. – 2024. – Том 16, № 1. – С. 95-100 (ВАК по состоянию на 20.02.2024 № 694).

3. Сидоров, Б. Б. Математическая модель управления возрастной структурой парка машинотракторного парка на базе дискретных форм представления показателей ТО и ТР/ Б. Б. Сидоров, М. Ю. Карелина // Техника и оборудование для села. – 2024. - № 3 (321). – С. 20-23 (ВАК по состоянию на 20.02.2024 № 2613).

*Публикации в других рецензируемых научных изданиях:*

4 Sidorov, B. B. Road infrastructure optimization to improve the energy efficiency of vehicles / B. B. Sidorov, P. I. Smirnov, A. A. Akulov, B. S. Subbotin, I. Y. Kashtanov // 2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2023 - Conference Proceedings, 2023. – P. 1-5 (МБД – Scopus).

5 Sidorov, B. B. Calculation of the Design of the Airfield of Aerodrome Equipment Using its Modeling in the Software Package / B. B. Sidorov, A. A. Akulov, V. S. Ershov, R. R. Mirzaev, D. S. Taldykin // 2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2023 - Conference Proceedings, 2023/ - P. 1-6 (МБД – Scopus).

6 Сидоров, Б. Б. Модель управления возрастной структурой парка сельскохозяйственной техники / Б. Б. Сидоров, Р. Р. Мирзаев, А. В. Терентьев, Д. А. Птицын // Мир транспорта и технологических машин. – 2020. – № 4 (71). – С. 92-99.

7 Сидоров, Б. Б. Тяговая рама автогрейдера / А. Махматкулов, Е. А. Бовкун, Б. Б. Сидоров // Магистратура – автотранспортной отрасли : Материалы IV Всероссийской межвузовской конференции, Санкт-Петербург, 24–25 октября 2019 года. Том Часть I. – СПб: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – С. 180-183.

8 Сидоров, Б. Б. Анализ математических моделей представления показателей, определяющих возрастную структуру машинотракторного парка / М. Ю. Карелина, Б. Б. Сидоров // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 25-26 января 2022 года. Часть 1. – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2022. – С. 26-33.