

*На правах рукописи*



**Казбек Куцукович ТАЙСАЕВ**

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА  
СОХРАНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОБУСОВ**

Специальность **05.22.10**

**«Эксплуатация автомобильного транспорта»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Алексей Вячеславович Терентьев,**

Официальные оппоненты: **Олег Николаевич Ларин,**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта  
(МИИТ)», г. Москва, кафедра «Логистические  
транспортные системы и технологии», профессор;  
**Афанасьев Александр Сергеевич,**  
кандидат военных наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный уни-  
верситет», кафедра «Транспортно-технологические  
процессы и машины», заведующий;

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный универ-  
ситет».

Защита диссертации состоится «02» марта 2021 г. в 14:30 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) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте: <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/taysaev-kazbek-kucukovich>.

Автореферат разослан «25» января 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д212.223.02,  
кандидат технических наук,  
доцент



Елена Михайловна Олещенко

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В автотранспортных предприятиях (АТП) РФ срок эксплуатации автобусов традиционно определяется величиной затрат на их коммерческую эксплуатацию, содержание и техническое обслуживание (ТО) при условии обеспечения нормативных требований надежности, определяемых показателями работоспособности. При этом экономические показатели, такие как доходы от эксплуатации и рентабельность, являются определяющими при оценке срока эксплуатации автобусов. Применение данного подхода приводит к тому, что подавляющее количество автобусов в РФ не отвечают современным международным экологическим требованиям и требованиям обеспечения конструктивной безопасности, а также комфортабельности и удобства при перевозке пассажиров. Результатом этого является высокая вероятность тяжких последствий при совершении дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с участием автобусов, что приводит не только к значительному материальному, но и моральному вреду наносимого как отдельным гражданам, так и обществу в целом. Например, суммарный размер социально-экономического ущерба от ДТП с участием автобусов и их последствий в период с 2009 по 2019 год составил более 7 млрд рублей. То есть проблема соответствия автобусов современным техническим, экологическим и требованиям безопасности носит не только организационно-технический, но и социально-экономический характер. Важно отметить, что в настоящее время качественное обновление требований к системам технической оснащённости автобусов на основе достижений в области IT-технологий происходит не в течение десятилетий, а измеряется годами или месяцами. При этом около 78 % парка автобусов в РФ составляют автобусы, с момента выпуска которых прошло более 5–7 лет, из них около 40 % эксплуатируются более 15 лет, а 25 % – более 20 лет. Поэтому задача установления показателей, определяющих соответствие свойств автобусов динамически изменяющимся требованиям внешней социотехнической среды, является актуальной научно-технической проблемой, а ее решение востребовано практикой.

**Степень разработанности темы исследования.** Решению задач технической эксплуатации автобусов в нашей стране посвящено большое количество научных трудов ведущих ученых и специалистов. Теоретические основы управления техническим состоянием автомобилей и практические положения контроля за соблюдением безопасных правил их эксплуатации разработаны в трудах Авдолькина Ф. Н., Аринина И. Н., Болдина А. П., Говорущенко Н. Я., Евтюкова С. А., Карташова В. П., Кравченко П. А., Захарова Н. С., Крамаренко Г. В., Кузнецова Е. С., Кудряшова Ю. А., Максимова В. А., Напольского Г. М., Постолита А. В., Резника Л. Г., Соколова В. С. Вопросам эффективности и оптимизации процессов технической эксплуатации автомобилей посвящены работы Лукинского В. С., Котикова Ю. Г., Прудовского Б. Д.,

Репина С. В., Терентьева А. В., Трофименко Ю. В. и других авторов. Их труды составили базу для исследования.

Анализ научных работ по теме исследования показал, что при определении целесообразности эксплуатации автобусов применяются показатели технического состояния автобуса, а именно показатели работоспособности, то есть используется однокритериальная модель. Таким образом, производится замена достаточно большого количества актуальных критериев, в том числе экологической и конструктивной безопасности, единственным комплексным показателем эффективности. Поэтому необходима разработка более гибких многокритериальных математических моделей, позволяющих научно обоснованно управлять состоянием эффективности автобус, адаптируя тем самым существующую методологическую базу ТЭА к современным требованиям, предъявляемым внешней социотехнической средой.

**Цель исследования.** Разработка методики определения коэффициента сохранения эффективности автобусов, позволяющей оценивать динамические изменения в многокритериальной структуре факторов внешней среды.

**Задачи исследования:**

1. Разработать иерархическую структуру задач в системе ТЭА, определяемых динамически изменяющимися факторами внешней среды эксплуатации.

2. Сформировать математическую модель определения коэффициента сохранения эффективности автобусов (КСЭ), позволяющую объективно оценивать многокритериальную структуру требований к показателям эффективности.

3. Разработать аналитический аппарат, определяющий характер изменения КСЭ автобуса в зависимости от пробега с начала его эксплуатации.

4. Разработать методику определения КСЭ автобусов, позволяющую оценивать соответствие автобусов требованиям условий среды эксплуатации.

5. Выполнить апробацию и технико-экономическое обоснование эффективности разработанной методики определения коэффициента сохранения эффективности автобусов.

**Объект исследования** – математическая модель изменения коэффициента сохранения эффективности автобусов при воздействии внешних социотехнических факторов среды эксплуатации.

**Предмет исследования** – методы многокритериальной оценки эффективности управляемых объектов в сложных организационно технических системах технической эксплуатации автобусов.

**Рабочая гипотеза.** Система ТЭА находится в динамическом состоянии, то есть под воздействием переменных факторов внешней среды. В этом случае прогнозируемые сроки эксплуатации автобуса в реальных условиях должны корректироваться не только с учетом традиционных коэффициентов корректирования, но и учетом изменения информационной составляющей

внешней среды, определяемой вводимыми в действие новыми нормативными документами уже в процессе эксплуатации автобуса. Показателем, оценивающим степень влияния внешней среды на сроки службы автобусов, является КСЭ. Процесс изменения КСЭ представим в виде динамической системы с отдельными дискретными состояниями, на каждом уровне которой моделируются локальные задачи по формализованным критериям. Таким образом, формируется динамическая система определения КСЭ с дискретными состояниями, соответствующими определенным этапам (циклам) эксплуатации автомобиля.

**Методы исследования.** Для решения задач исследования применяются методы системного анализа, регрессионного анализа и корреляционного анализа, теория вероятностей и исследования операций, методы динамического и линейного программирования.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»:

- пункту 2 «Оптимизация планирования, организации и управления технического обслуживания, ремонта и сервиса автомобилей, использования программно-целевых и логистических принципов»;
- пункту 11 «Закономерности изменения технического состояния автомобилей и агрегатов, технологического оборудования с целью совершенствования систем технического обслуживания и ремонта, определения нормативов технической эксплуатации, рациональных сроков службы автомобилей».

**Научная новизна** исследования заключается в достижении следующих результатов:

1. Разработана концепция применения КСЭ автобусов для определения эффективного срока эксплуатации.
2. Разработана структура динамической системы определения КСЭ с дискретными состояниями, соответствующими определенным этапам (циклам) эксплуатации автомобиля.
3. Сформулированы аналитические модели определения КСЭ как функции динамически изменяющихся факторов экологической, конструктивной безопасности и обеспечения требований комфортабельности.
4. Разработана аналитическая модель определения мощности влияния внешней среды на показатели эффективности эксплуатации автобусов.
5. Разработана комплексная методика определения КСЭ автобусов, позволяющая определять сроки эффективной эксплуатации автобусов в динамически изменяющихся условиях среды эксплуатации.

**Теоретическая значимость** исследования заключается в том, что разработана новая аналитическая модель получения эффективных решений, позволяющая вырабатывать оптимальные значения коэффициента сохранения эффективности при ограничениях, определяемых динамическими изменениями социотехнической среды эксплуатации автобусов.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в следующем:

1) определены функциональные зависимости, отражающие изменения, вносимые КСЭ автобусов, в сравнении с планируемыми значениями срока эксплуатации автобусов, определяемыми в соответствии с действующими нормативными документами;

2) разработаны алгоритм и программное обеспечение автоматизированного получения значений КСЭ;

3) разработана методика определения КСЭ, позволяющая оценивать динамические изменения факторов внешней среды эксплуатации автобусов, применимая в локальных системах ТЭА автотранспортных предприятий.

Практические результаты исследования могут быть использованы как частными, так и муниципальными АТП в целях эффективного управления типажом и возрастной структурой парка автобусов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Иерархическая структура задач в системе ТЭА, определяемых динамически изменяющимися факторами внешней среды эксплуатации.

2. Математическая модель определения КСЭ автобусов, адекватно отражающая множественные требования к эффективности их эксплуатации.

3. Методика определения КСЭ автобусов, позволяющая оценивать динамические изменения факторов внешней среды эксплуатации автобусов.

4. Алгоритм автоматизированного получения значений КСЭ.

5. Технико-экономическое обоснование применения разработанной методики определения КСЭ.

**Личный вклад автора.** Все основные положения и разработки исследования, сформировавшие основу научно-методического подхода применения КСЭ в системах управления возрастной структурой парков автобусов и совершенствования существующих методик определения срока их эксплуатации, принадлежат автору.

**Степень достоверности** полученных результатов исследования подтверждается:

1) использованием методов системного анализа, системной инженерии, математической теорией вероятностей и теорией принятия решений: векторной оптимизации динамического и линейного программирования;

2) отсутствием противоречий с ранее проводимыми исследованиями других ученых по тематике технической эксплуатации автобусов и принятию решений в сложных организационно-технических системах;

3) публикациями в рецензируемых изданиях ВАК РФ и в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты исследования докладывались: на 77-й Научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (г. Москва, 2019); на конференциях «Организация

и безопасность движения дорожного движения в крупных городах» (СПбГАСУ, Санкт-Петербург, 2020) и «Информационные технологии и инновации на транспорте» (ОГУ им. И. С. Тургенева, г. Орел, 2020).

**Реализация результатов работы.** Значимость результатов диссертационного исследования подтверждается:

1) Актом о внедрении в учебные программы ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»;

2) Актом о внедрении в производство Ордена Трудового Красного Знамени акционерного общества «Первый автокомбинат» имени Г. Л. Краузе.

**Публикации и патенты.** Основные положения и результаты исследования опубликованы в шести научных статьях, в том числе в четырех журналах, рецензируемых ВАК РФ, и в двух изданиях, входящих в международные базы цитирования (Scopus и Web of Sciens); кроме того, получено одно свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация содержит: введение, четыре главы, заключение, список литературы из 110 наименований и приложений. Работа изложена на 151 странице основного текста.

**Во введении** раскрывается тема исследования, обосновывается ее выбор, актуальность и необходимость разработки методики определения коэффициента сохранения эффективности автобусов. Формируется цель и задачи исследования, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, изложены положения, выносимые автором на защиту.

**В первой главе** анализируются современные тенденции, анализ возрастной структуры парка автобусов в РФ и современной структуры показателей ТЭА, производится анализ теоретических исследований, отечественного и зарубежного опыта по вопросам организации ТО и ремонта автобусов. Определяются направления исследования, обеспечивающие техническое решение проблемы обеспечения надежности экологической и конструктивной безопасности автобусов.

**Во второй главе** разработана концепция модели определения КСЭ автобусов: определено, что КСЭ может служить критерием оптимизации при взаимодействии системы ТЭА с системами более высокого уровня, которые определяются совокупностью требований общества к обеспечению качества обслуживания транспортом общего пользования; получена формула для определения КСЭ; разработан алгоритм применения КСЭ в системе ТЭА; разработана структура критериев и формализованы параметры эффективности в модели определения КСЭ; определены методы решения многокритериальных задач, применимые к информационным состояниям модели определения КСЭ.

**В третьей главе** разработана методика определения КСЭ автобусов, основное назначение которой – обеспечение механизмов эффективного управления возрастной структурой парка автобусов пассажирского АТП

с учетом активного влияния внешней социотехнической среды эксплуатации. Основным инструментом разработанной методики является КСЭ автобусов, который должен отражать степень влияния внешней среды эксплуатации на изменение значений показателей ТЭА, в первую очередь на значение пробега, до списания.

**В четвертой главе.** В четвертой главе была апробирована методика определения КСЭ для условий работы АП № 2 в СПб ГУП «Пассажиравтотранс»: выполнен расчет ТЭП эффективности работы парка автобусов по трем критериям эффективности (надежность, эргономичность и затраты на перевозки) на последовательных интервалах ТО в процессе эксплуатации автобусов; получены математические зависимости и значения КСЭ, позволяющие оценить мощность влияния внешней среды эксплуатации автобусов на показатели его эффективности; определен возможный социально-экономический эффект; подтверждено, что применение разработанной методики имеет явно выраженную социально-экономическую значимость в масштабах РФ.

**В заключении** изложены основные итоги и результаты выполненного исследования.

## **II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

### **1. Иерархическая структура задач в системе технической эксплуатации автобусов, определяемых динамически изменяющимися факторами внешней среды эксплуатации**

Сложная система ТЭА требует научно-обоснованного определения уровня эффективности автобусов в конкретных условиях их эксплуатации. В настоящее время классификация данных условий определяется тремя основными группами факторов:

- 1-я группа – транспортные, дорожные, природно-климатические;
- 2-я группа – уровень механизации, квалификации персонала и т. д.;
- 3-я группа – неопределенные факторы внешней среды, возникающие в процессе эксплуатации автобуса во времени.

Активизация влияния внешней социотехнической среды в виде требований безопасности, экологичности, комфортабельности к конструкции автобуса существенно увеличивает значимость 3-й группы факторов, которые могут динамически изменяться течение одного срока службы автобуса. Влияние данной группы факторов может быть определено с помощью

КСЭ. Формально КСЭ представлен в нормативно-технической базе [ГОСТ 27.002 – 2015 «Надежность в технике. Термины и определения»], где КСЭ (en efficiency ratio) трактуется как отношение значения показателя эффективности использования изделия по назначению в течение определенного периода к номинальному значению этого показателя, который рассчитывается при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают. Данная трактовка КСЭ указывает на то, что вероятность **работоспособного состояния объекта является безусловно необходимым, но не достаточным условием обеспечения надежности исследуемого объекта**. Анализ научных исследований по данной теме показывает, что существует более широкое толкование КСЭ на предмет поиска атрибутов достаточности обеспечения надежности исследуемого объекта:

1. КСЭ является очень удобным комплексным показателем надежности для тех систем, у которых большее значение выбранной характеристики является наилучшим.

2. КСЭ характеризует степень влияния отказов элементов объекта на эффективность его применения по назначению. При этом под эффективностью применения объекта по назначению понимают его свойство создавать некоторый полезный результат (выходной эффект) в течение периода эксплуатации в определенных условиях.

3. КСЭ может служить интегральным критерием оптимизации показателей исследуемой системы, поскольку критерий оптимизации – это вектор направления желаемых изменений в поиске свойств системы.

Между тем в практике пассажирских АТП в лучшем случае определяются КТГ (коэффициент технической готовности) или КТИ (коэффициент технического использования) автобусов, которые служат только для одной цели: определить, исправен автобус или неисправен и способен он перевозить пассажиров или неспособен, но не дают ответа на вопрос обеспечиваются ли актуальные требования качества перевозки, что приводит к следующим негативным результатам (рис. 1).

Учесть необходимые требования к качеству автобусов можно, дополнив традиционный подход к определению показателей ТЭА определением КСЭ. КСЭ может служить критерием оптимизации при взаимодействии системы ТЭА с системами более высокого уровня, они определяются совокупностью требований общества к обеспечению качества обслуживания транспортом общего пользования. Декомпозиция иерархической структуры задач в системе ТЭА, определяемых факторами внешней среды эксплуатации с применением модели определения КСЭ, приведена на рис. 2. Важным отличием представленной системы является формирование одного иерархического уровня комплекса критериев – работоспособность автобуса, безопасность (экологическая и конструктивная) и затраты на эксплуатацию.

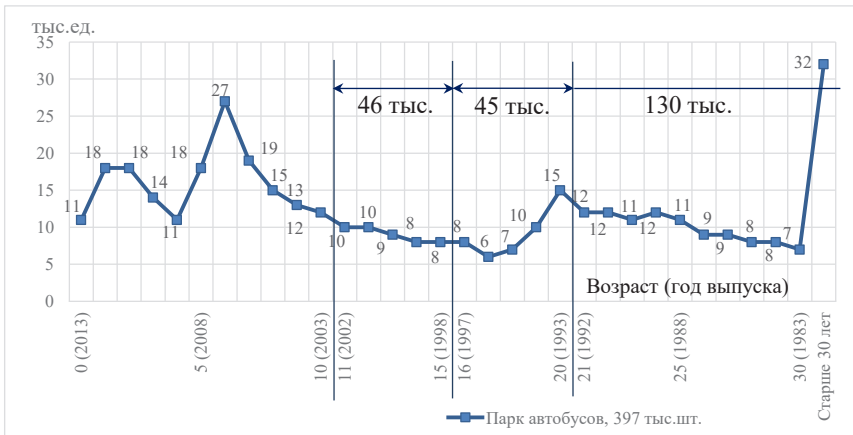


Рис. 1. Возрастная структура парка автобусов в РФ

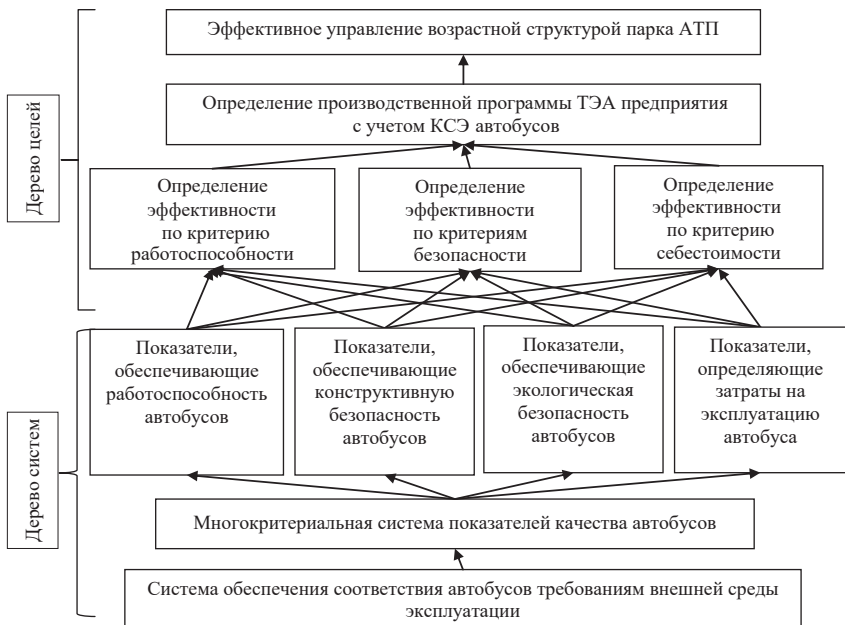


Рис. 2. Декомпозиция иерархии модели применения КСЭ автобусов

## 2. Математическая модель определения коэффициента сохранения эффективности автобусов, адекватно отражающая множественные требованиями к эффективности их эксплуатации

Формула для определения КСЭ следующая:

$$K_{\text{сэ}} = \frac{1}{\mathfrak{E}_n} \sum_{i=1}^n \mathfrak{E}_i P_i, \quad (1)$$

где  $\mathfrak{E}_i$  – эффективность системы в  $i$ -м работоспособном состоянии автобуса;  $P_i$  – вероятность пребывания автобуса в  $i$ -м работоспособном состоянии;  $\mathfrak{E}_n = \max (\mathfrak{E}_i)$  – номинальное значение показателя эффективности объекта, определенное при условии отсутствия отказов или при соответствии их количества требованиям нормативной документации;  $n$  – количество работоспособных состояний объекта.

Решение задачи (1) сводится:

1) к формированию матрицы эффективностей  $\mathfrak{E}_A$ , формализующей номинальное значение показателя эффективности автобуса  $\mathfrak{E}_i$  и определению методов решения поставленной задачи. Качественно и количественно данный параметр  $\mathfrak{E}_i$  определяется решением многокритериальной задачи, характеризующей следующими понятиями:  $m$  – количество рассматриваемых процессов (техническое обслуживание, технический ремонт, транспортная работа автобуса и т. д.);  $n$  – количество актуальных критериев среды эксплуатации;  $\mathfrak{e}_{ij}$  – эффективность  $i$ -го процесса по  $j$ -му критерию,  $i = 1, m$ ,  $j = 1, n$ :

$$\mathfrak{E}_A = \begin{pmatrix} \mathfrak{e}_{11} & \mathfrak{e}_{12} & \dots & \mathfrak{e}_{1n} \\ \mathfrak{e}_{21} & \mathfrak{e}_{22} & \dots & \mathfrak{e}_{2n} \\ \dots & & & \dots \\ \mathfrak{e}_{m1} & \mathfrak{e}_{m2} & \dots & \mathfrak{e}_{mn} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

2) адаптации алгоритма расчета показателей ТО и ТР автобусов к измерителям разработанной методики, когда в качестве расчетного цикла принимается цикл, состоящий из интервалов ТО на момент времени определения КСЭ. Что, в свою очередь, позволяет формировать вектор-строку  $[\mathfrak{E}_n = m (\mathfrak{E}_i)]$  – номинальных значений показателя эффективности автобуса, определяемых в соответствии с плановыми показателями.

$$K_{\text{сэ}} = \frac{1}{\mathfrak{E}_n = [\bar{I}_{\text{то,тр}ij}, \bar{K}_{ij}, \bar{\mathfrak{e}}_{ij}, \bar{S}_{ij}]} \sum_{i=1}^n \mathfrak{E}_i P_i, \quad (3)$$

где  $\Xi_i$  – эффективность системы в  $i$ -м работоспособном состоянии автобуса;  $P_i$  – вероятность пребывания автобуса в  $i$ -м работоспособном состоянии;  $n$  – количество работоспособных состояний объекта (интервалов ТО);  $\bar{t}_{\text{то, тр}ij}$  – удельная трудоемкость ТО и ТР на момент  $i$ -го интервала ТО для  $j$ -го автобуса;  $\bar{k}_{ij}$  – показатель эффективности по критерию конструктивной безопасности на момент  $i$ -го интервала ТО для  $j$ -го автобуса;  $\bar{\Xi}_{ij}$  – показатель эффективности по критерию экологической безопасности на момент  $i$ -го интервала ТО для  $j$ -го автобуса;  $\bar{s}_{ij}$  – показатель эффективности по критерию затрат на эксплуатацию на момент  $i$ -го интервала ТО для  $j$ -го автобуса.

Полученные значения КСЭ позволяют оценить мощность влияния внешней среды эксплуатации автобусов на показатели его эффективности.

$$P_{\text{в.с.}} = \frac{\int_0^{l_i} \text{КТИ} dl}{\int_0^{l_i} \text{КСЭ} dl}, \quad (4)$$

где  $l_i$  – значение пробега автобуса, соответствующее  $i$ -му интервалу ТО.

### **3. Методика определения коэффициента сохранения эффективности автобусов, позволяющая оценивать динамические изменения факторов внешней среды эксплуатации автобусов**

Основное назначение методики определения КСЭ автобусов – обеспечение управления возрастной структурой парка автобусов пассажирского АТП с учетом активного влияния факторов внешней социотехнической среды эксплуатации. Основное назначение КСЭ автобусов – отражать степень влияния внешней среды эксплуатации на изменение значений показателя ТЭА, в первую очередь на значение пробега до его списания. Поэтому аналитический расчет КСЭ должен производиться в два основных этапа:

1. Определение показателей ТЭА в соответствии с планируемым на АТП или заложенными предприятиями-производителями автобусов сроком эксплуатации автобусов.

2. Определение отклонений значений показателей ТЭА последовательно на отдельных интервалах ТО в процессе эксплуатации автобусов и выявление закономерностей, определяющих данные отклонения.

**1-й этап.** Для определения КСЭ формируется возрастная расчетная группа одной модели автобусов. Расчет КСЭ производится для каждого интервала ТО автобусов, поэтому необходимо адаптировать существующую методику определения показателей ТЭА (ТО и ТР) к условию, когда в качестве расчетного цикла принимается полный цикл интервалов ТО в пределах планируемого пробега до списания автобусов. Это необходимо, так

как продолжительность расчетных циклов ТО и ТР может быть различна в зависимости от климатических условий, условий организации труда на АТП и т. д. При цикловом методе расчета, когда в качестве величины цикла принимается пробег до КР, мы получаем формулу для определения значения удельной нормативной трудоемкости ТР:

$$T_{\text{ТР}}^{\text{н}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{L_{\text{КР}}} \cdot 1000, \text{ чел.} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ км}, \quad (5)$$

где  $L_{\text{КР}}$  – пробег автобуса до КР, км.

Если же выразить значение пробега до КР, как сумму последовательных интервалов ТО, то:

$$T_{\text{ТР}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i} \sum_{j=1}^m t_{\text{ТР}ji} \cdot 1000, \text{ чел.} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ км}, \quad (6)$$

где  $t_{\text{ТР}ji}$  – трудоемкость устранения  $j$ -го отказа в пределах  $i$ -го интервала ТО, чел. ч;  $L_i$  – пробег автобуса с начала эксплуатации до  $j$ -го интервала ТО, км;  $n$  – количество интервалов ТО;  $m$  – количество технических воздействий в пределах одного интервала ТО, ед./ТО.

Степень отклонения показателей ТО и ТР автобусов от нормативных и / или регламентируемых производителем автобусной техники определяется из свойств непрерывной неубывающей функции, определяющей зависимость значений трудоемкости ТР от пробега с начала эксплуатации  $f_{\text{ТР}}(l)$ :

$$\frac{\int_0^{l_i} f_{\text{ТР}}(l) dl}{l_i} < \frac{\int_{l_{(i-1)}}^{l_i} f_{\text{ТР}}(l) dl}{[l_i - l_{(i-1)}]}, \quad (7)$$

где  $l_i$  – пробег автомобиля в момент проведения планового ТО, км;  $[l_i - l_{(i-1)}]$  – интервал между плановыми ТО.

Тогда формула для определения фактического показателя удельной трудоемкости ТР примет следующий вид:

$$T_{\text{ТР}i} = \frac{1}{\Delta l_i} \sum_{j=1}^m t_{\text{ТР}ji} \cdot 1000, \text{ чел.} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ км}, \quad (8)$$

где  $T_{\text{ТР}i}$  – трудоемкость ТР на  $j$ -м интервале пробега автобуса;  $\Delta l_i$  – пробег, соответствующий регламенту ТО, км;  $m$  – количество воздействий.

Нередко, значения величины интервалов ТО могут быть сгруппированы в отдельные циклы с различными величинами пробега в одном интервале ТО. Тогда в пределах одного цикла (цикловая удельная трудоемкость ТР) может быть определена по формуле (чел.ч/1000)

$$T_{\text{тпу}} = \frac{\sum_{k=1}^{P_u} t_{\text{тпкu}}}{\Delta I_u} \cdot 1000, \text{ чел.} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ км}, \quad (9)$$

$$T_{\text{тпу}} = \frac{10^3}{L_{\text{цu}}^{\text{то}}} \cdot \sum_{k=1}^{n_u} t_{\text{тпкu}}, \text{ чел.} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ км}, \quad (10)$$

где  $p$  – количество необходимых воздействий ТР в пределах цикла ТО;  $u$  – порядковый номер цикла ТО;  $L_{\text{цu}}^{\text{то}}$  – цикл ТО;  $t_{\text{тпкu}}$  – трудоемкость, необходимая для устранения отказа, чел.ч или нормо-час.

Если необходимо получить среднее значение удельной трудоемкости ТР, приходящейся на 1000 км на более значительном интервале пробега автобусов, можно применить следующую формулу:

$$\bar{T}_{\text{тп}} = \frac{\sum_{u=1}^v T_{\text{тпу}}}{m}, \text{ чел.} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ км}, \quad (11)$$

$$\bar{T}_{\text{тп}} = \frac{1}{v} \cdot \sum_{u=1}^v T_{\text{тпу}}, \text{ чел.} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ км}, \quad (12)$$

где  $v$  – количество циклов ТО в пределах исследуемого пробега автомобиля, ед.  
После постановки формулы (11) в (12) получим:

$$\bar{T}_{\text{тп}} = \frac{10^3}{v}, \text{ чел.} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ км}. \quad (13)$$

Можно рассмотреть частный случай применения формулы (13) для однотипного подвижного состава, когда  $L_{\text{ц}}^{\text{то}} = \text{const}$ :

$$\bar{T}_{\text{тп}} = \frac{10^3}{v L_{\text{ц}}^{\text{то}}} \cdot \sum_{u=1}^v \sum_{k=1}^p t_{\text{тпкu}}, \text{ чел.} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ км}. \quad (14)$$

Исходя из сказанного, можно определить, что в формуле (1):

1.  $\mathcal{E}_i$  – эффективность системы в  $i$ -м работоспособном состоянии автобуса должна определяться в соответствии с подходом, реализуемым в формулах 13, 14.

2.  $\mathcal{E}_n = \max(\mathcal{E}_i)$  – номинальное значение показателя эффективности объекта, определенное при условии отсутствия отказов или при соответствии их количества требованиям нормативной документации в соответствии с подходом, реализуемым в соответствии с традиционной моделью расчета показателей ТО и ТР.

Приведенный алгоритм расчета показателей ТО и ТР автобусов позволяет адаптировать существующую методику определения производственной программы по ТО и ТР условию, когда в качестве расчетного цикла принимается цикл, состоящий из интервалов ТО на момент времени определения КСЭ. Что, в свою очередь, позволяет формировать вектор-строку  $[\mathcal{E}_n = m(\mathcal{E}_i)]$  – номинальных значений показателя эффективности автобуса, определяемых в соответствии с плановыми показателями (формула 3).

**2-й этап.** Для определения отклонений значений показателей ТЭА, а также показателей по другим критериям эффективности на отдельных последовательных интервалах ТО в процессе эксплуатации автобусов и выявления закономерностей, определяющих данные отклонения, необходимо сформировать матрицу эффективностей текущего состояния автобусов. Для нашего случая, то есть для четырех критериев эффективности, матрица текущего состояния автобуса примет следующий вид:

$$\sum_{k=1}^4 \mathcal{E}_k P_i = \begin{pmatrix} t_{\text{то,тр}11} & K_{12} & \mathcal{E}_{13} & S_{14} \\ t_{\text{то,тр}11} & K_{22} & \mathcal{E}_{23} & S_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{\text{то,тр}m1} & K_{m2} & \mathcal{E}_{m3} & S_{m4} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где  $k$  – индекс критериев эффективности;  $t_{\text{то, тр}m1}$  – удельная трудоемкость ТО и ТР для  $i$ -го интервала ТО  $j$ -го автобуса;  $K_{mk}$  – показатель эффективности по критерию конструктивной безопасности для  $i$ -го интервала ТО  $j$ -го автобуса;  $\mathcal{E}_{mk}$  – показатель эффективности по критерию экологической безопасности для  $i$ -го интервала ТО  $j$ -го автобуса;  $S_{mk}$  – показатель эффективности по критерию затрат на эксплуатацию для  $i$ -го интервала ТО  $j$ -го автобуса.

Тогда формула для определения КСЭ примет вид:

$$K_{\text{сэ}} = \frac{\begin{pmatrix} t_{\text{то,тр}11} & K_{12} & \mathcal{E}_{13} & S_{14} \\ t_{\text{то,тр}11} & K_{22} & \mathcal{E}_{23} & S_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{\text{то,тр}m1} & K_{m2} & \mathcal{E}_{m3} & S_{m4} \end{pmatrix}}{[\bar{t}_{\text{то,тр}j1}, \bar{K}_{j2}, \bar{\mathcal{E}}_{j3}, \bar{S}_{j4}]} = \frac{D_{\text{т}}}{\bar{D}_{\text{н}}}, \quad (16)$$

где  $K_1 = t_{\text{то, тр}}(l) \rightarrow \min$ ;  $K_2 = K_{\text{с}}(l) \rightarrow \max$ ;  $K_3 = \mathcal{E}_{\text{с}}(l) \rightarrow \max$ ;  $K_4 = S_{\text{с}}(l) \rightarrow \min$ .

Решение данной задачи сводится к решению задачи линейного программирования для получения значений эффективности ( $D_{ij}$ ) для каждого автобуса на каждом интервале ТО и сравнения его с нормативным значением

$(\bar{D}_n)$ . Причем  $(D_{vj})$  определяется из условия максимально возможной эффективности функционирования всех автобусов  $D_{vj}$  в пределах одной группы. Далее определяются коэффициенты относительной важности (КОВ) по каждому критерию для каждого варианта решения: эффективность автобуса в рассматриваемой группе и эффективность каждого автобуса в пределах одной возрастной группы по формуле

$$D_{vj} = \sum_{k=1}^4 b_{jk} c_k, \quad (17)$$

тогда КСЭ для отдельных автобусов

$$K_{cэj} = \frac{D_{vj}}{\bar{D}_n}. \quad (18)$$

#### **4. Алгоритм автоматизированного получения значений коэффициента сохранения эффективности**

Выполнение расчетов по разработанной методике определения КСЭ является многоступенчатой и трудоемкой задачей, связанной с большими объемами вычислительных процедур. Наиболее перспективным направлением реализации методов численного моделирования по разработанной методике определения КСЭ является компьютерное моделирование. Помимо основных расчетов компьютерное моделирование позволяет производить ряд численных экспериментов с целью аналитической интерпретации управления качеством эксплуатации автобусов с последующим уточнением наиболее эффективной модели. Блок-схема алгоритма оптимизации при решении многокритериальной задачи в виде численного (компьютерного) моделирования приведена на рис. 3, 4.

На основании алгоритма оптимизации при решении многокритериальной задачи в виде численного (компьютерного) моделирования и методики определения показателей для отдельных критериев качества автобусов разработано специализированное ПО «Система многокритериальной оценки коэффициента сохранения эффективности автобусов».



Рис. 3. Алгоритм применения КСЭ в системе ТЭА

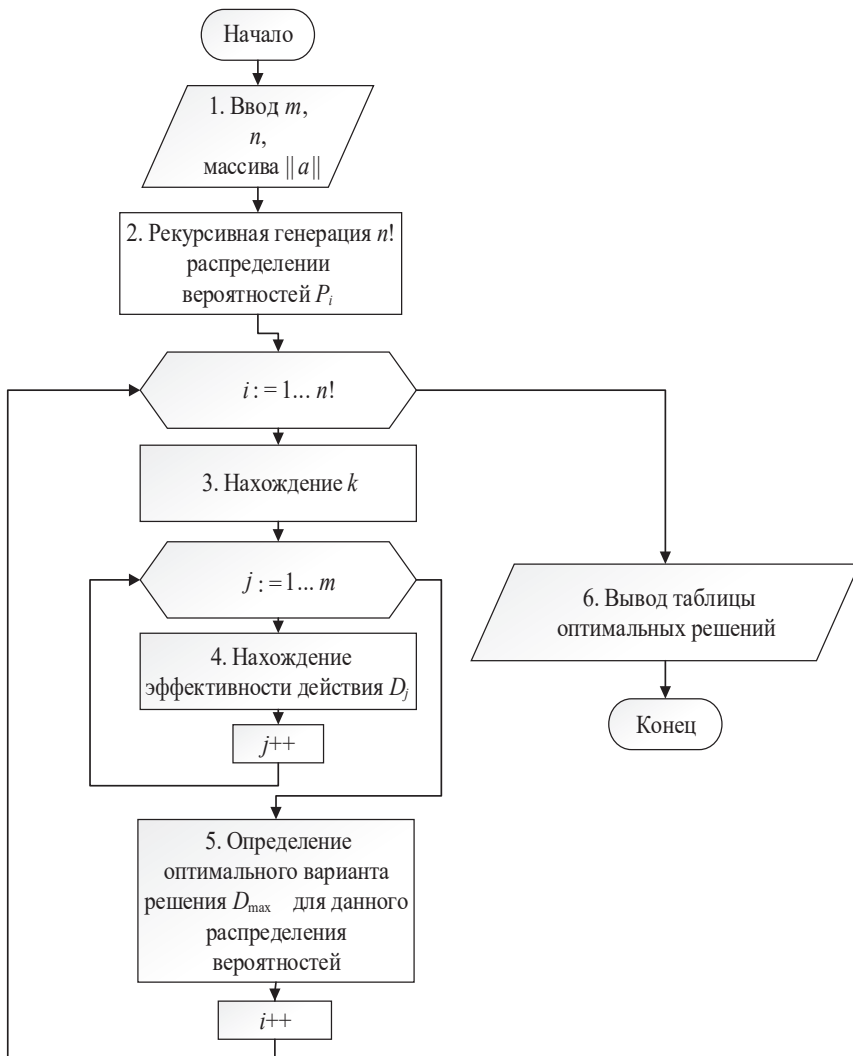


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оптимизации при решении многокритериальной задачи в виде численного (компьютерного) моделирования

## 5. Техничко-экономическое обоснование применения методики определения коэффициента сохранения эффективности автобусов

Для проведения объективной апробации методики был собран и обработан необходимый объем статистического материала, включающий информацию об изменении технического состояния автобусов по отдельным моделям в течение трех лет. На рис. 5 приведена информация по возрастной структуре парка распределению среднегодовых пробегов автобусов (по маркам) в АП № 2 СПб ГУП «Пассажиравтотранс».

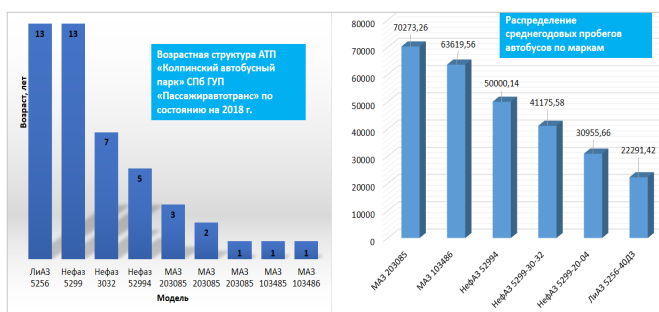


Рис. 5. Возрастная структура парка автобусов и распределение среднегодовых пробегов автобусов по маркам

На рис. 6 представлены результаты расчета оценки влияния срока эксплуатации на эффективность автобусов.

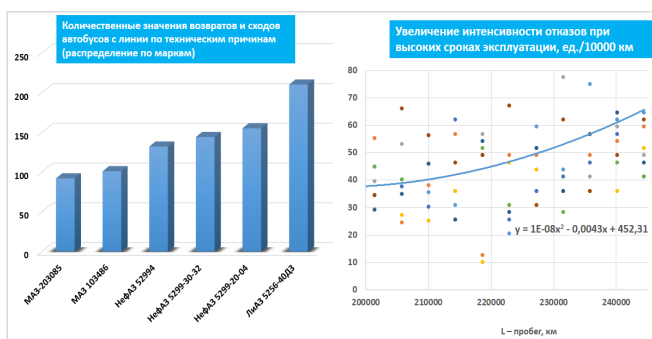


Рис. 6. Количественные значения возвратов и сходов автобусов с линии по техническим причинам (распределение по маркам)

На следующем этапе обработки экспериментальных данных использовались методы корреляционного и регрессионного анализа, что позволило получить функциональные зависимости изменения показателя непланового ТР (чел. ч) в зависимости от пробега с начала эксплуатации (0–250 тыс. км). На рис. 7, 8 приведены функциональные зависимости изменения показателя непланового ТР (чел. ч) в зависимости от пробега с начала эксплуатации (0–250 тыс. км) для автобуса ЛиАЗ-5256.

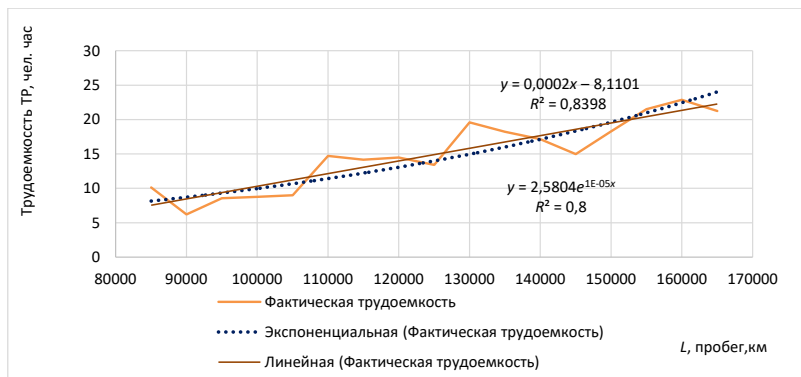


Рис. 7. Зависимость изменения показателя непланового ТР (чел. ч) для пробега с начала эксплуатации (0–170 тыс. км)

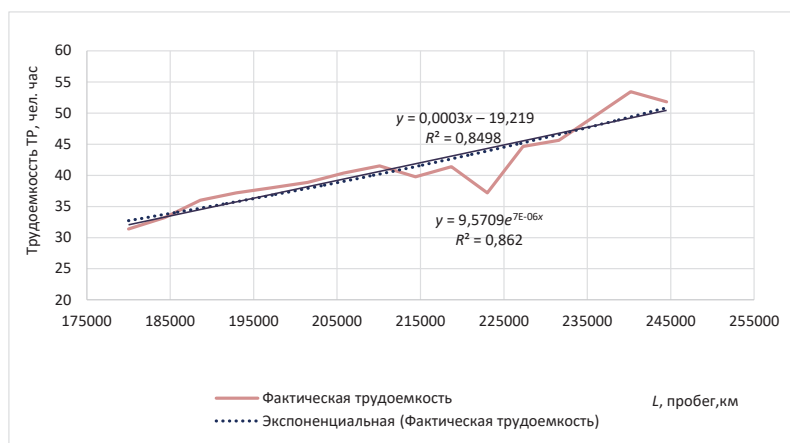


Рис. 8. Зависимость изменения показателя непланового ТР (чел. ч) для пробега с начала эксплуатации 175–250 тыс. км

Общая методика интеграции экспериментальных наблюдений в разработанную методику определения КСЭ приведена на рис. 9.

В случае применения разработанной методики, когда расчет показателей производится для каждого интервала ТО, выявлена экспоненциальная зависимость изменения показателя удельная трудоемкость ТР ( $y = 9,5709e^{7E-06x}$ ), уточняющая характер исследуемой функции. Графоаналитические зависимости изменения значений удельной трудоемкости ТР для автобуса ЛиАЗ-5256 представлены на рис. 10.

Изменение КСЭ автобуса ЛиАЗ – 5256 в процессе его эксплуатации. представлено на рис. 11.

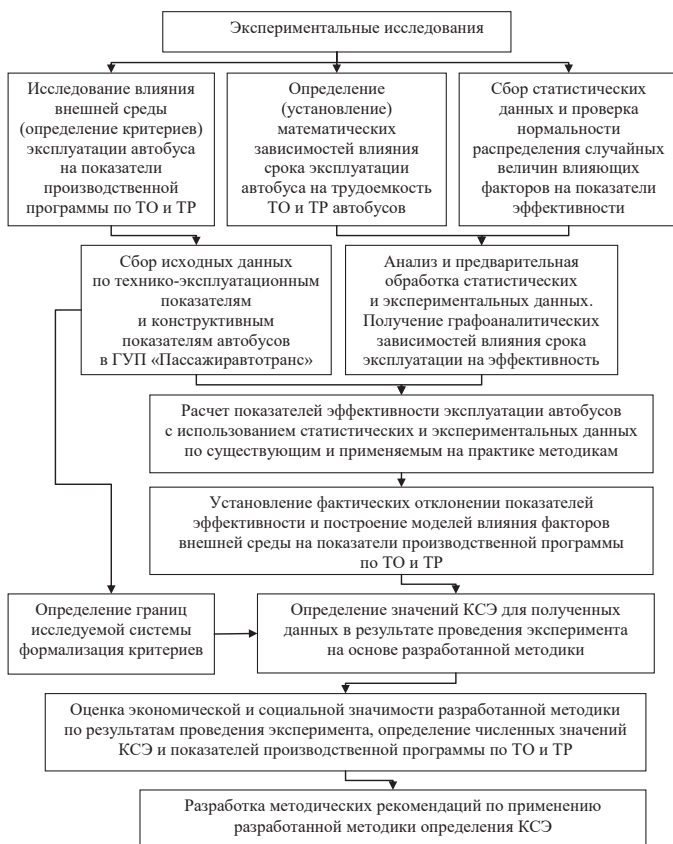


Рис. 9. Общая методика интеграции экспериментальных наблюдений в разработанную методику определения КСЭ

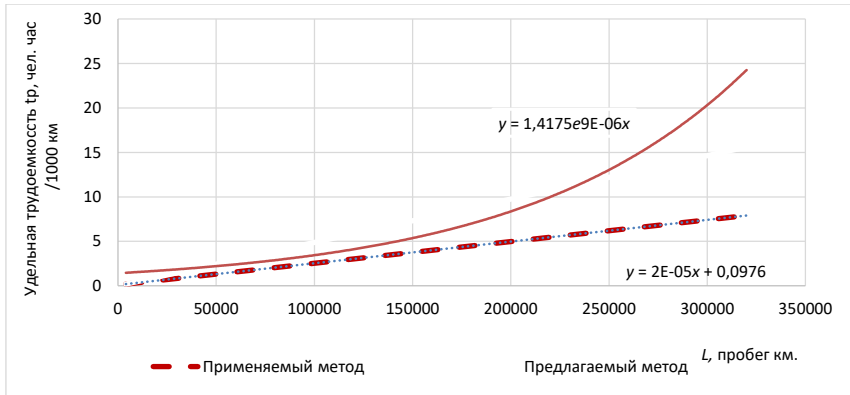


Рис. 10. Графоаналитические зависимости изменения удельной трудоемкости ТР для автобуса ЛиАЗ-5256

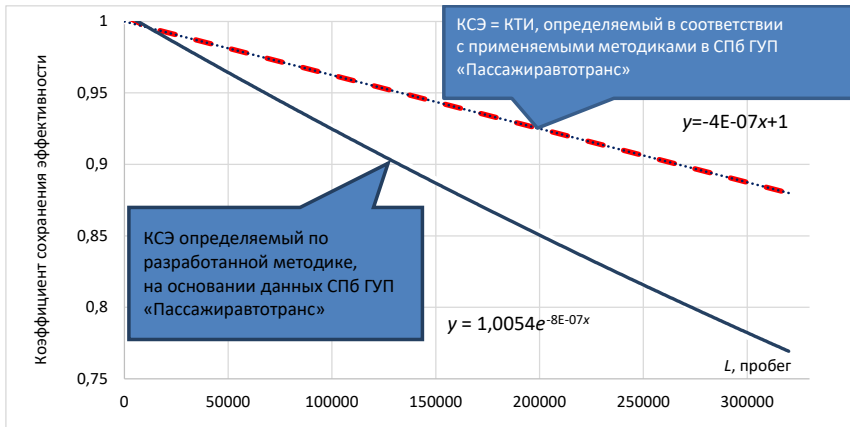


Рис. 11. Изменение КСЭ в зависимости от пробега для автобуса ЛиАЗ-5256 с начала эксплуатации

Полученные значения КСЭ позволяют оценить мощность влияния внешней среды эксплуатации автобусов на показатели его эффективности. Данная оценка для автобуса ЛиАЗ-5256 в условиях СПб ГУП «Пассажиравтотранс» определяется по формуле

$$P_{\text{в.с.}} = \frac{\int_0^{l_i} \text{КТИ} dl}{\int_0^{l_i} \text{КСЭ} dl} = \frac{\int_0^{l_i} (-4e0,7l+1) dl}{\int_0^{l_i} (1,0054e^{-8E-0,7l}) dl}, \quad (19)$$

где  $l_i$  – значение пробега автобуса соответствующее  $i$ -му интервалу ТО.

Результаты расчета эффективности разработанной методики представлены приведены на рис. 12.

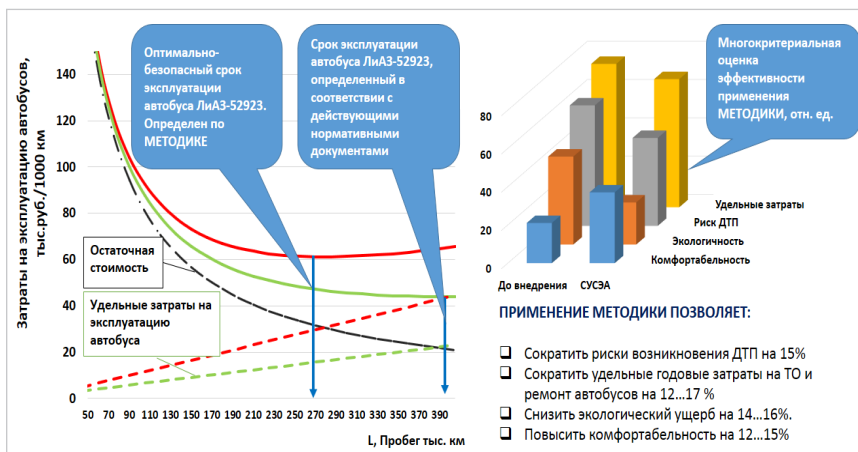


Рис. 12. Результаты расчета эффективности разработанной методики

Анализ полученных данных и результаты расчетов экономической эффективности эксплуатации автобусов показывают:

1) если автобусы эксплуатируются в соответствии с применяемыми практиками и традиционными моделями определения сроков эксплуатации, то пробег автобусов превышает 400 тыс. км;

2) если применять для расчета разработанную методику, то при пробеге 256 тыс. км для модели ЛиАЗ-525 минимум затрат на эксплуатацию автобусов ЛиАЗ-5256 приходится на 270 тыс. км.

Разработанная в исследовании методика определения коэффициента КСЭ позволяет:

1) исключить риски возникновения ДТП, связанные с несоответствием систем, агрегатов и узлов автобусов действующим техническим регламентам (их доля составляет до 15 % в общей статистике ДТП), и тем самым снизить общие показатели травматизма и гибели людей в ДТП с участием автобусов;

2) сократить удельные годовые затраты на ТО и ремонт автобусов на 17 %, на содержание производственно-технической базы – на 7–8 %;

3) снизить экологический ущерб, наносимый внешней среде от эксплуатации автобусов, не соответствующих экологическим нормам и требованиям, в условиях мегаполиса на 14–16 %.

В табл. 1 приведены данные о возможном социально-экономическом эффекте применения разработок исследования в соответствии с «Методикой оценки и расчета нормативов социально-экономического ущерба вследствие дорожно-транспортного происшествия» Р-03112199-0502-00.

Таблица 1

**Социально-экономический эффект применения методики определения КСЭ**

Разработанные технологии	Эффект от оказанных услуг с использованием разработанных технологий
Экономический эффект	
Программное обеспечение, предназначенное для количественной оценки эффективности автобусов, позволяющее определить оптимально безопасный срок эксплуатации автобусов	При ежедневной эксплуатации до 1500 автобусов годовая экономия затрат предприятия составит 258 400 тыс. руб./год
	При ежедневной эксплуатации более 2000 автобусов годовая экономия затрат предприятия составит 321 300 тыс. руб./год
Социально-экономический эффект	
Система управления сроком безопасной эксплуатации автобусов на базе разработанной методики	Сокращение количества ДТП на 5–7 % для Москва и Санкт-Петербург, при этом величина ежегодного социально-экономического ущерба снизится на 450 000 тыс. руб.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных научно-методических исследований, реализованных в новых математических моделях, разработана методика определения КСЭ автобусов, обеспечивающая повышение эффективности и безопасности в системе технической эксплуатации автобусного парка РФ. Для достижения поставленной цели в диссертации были решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ соответствия состояния системы ТЭ автобусов социотехническим условиям их эксплуатации и установлено, что применяемые сегодня методики управления сроками эксплуатации автобусов базируются на устаревших нормативно-технических документах, поэтому они не могут в полной мере соответствовать как существующему разнообразию возможных

форм организации процессов ТО и ТР автобусов, так и увеличению интенсивности влияния социотехнических факторов внешней среды к требуемому качеству эксплуатации автобусов.

2. Разработана модель прогнозирования технического состояния автобусов с учетом динамически изменяющихся социотехнических факторов внешней среды эксплуатации и концепция методики определения КСЭ. Определено, что КСЭ может служить критерием оптимизации при взаимодействии системы ТЭА с системами более высокого уровня, которые определяются совокупностью требований общества к обеспечению качества обслуживания транспортом общего пользования, получена формула для определения КСЭ и разработан алгоритм применения КСЭ в системе ТЭА.

3. Разработана структура критериев и формализованы параметры эффективности модели определения КСЭ автобусов, определены методы решения многокритериальных задач, применимые к информационным состояниям модели определения КСЭ и удовлетворяющие следующему требованию: отсутствию формализованной связи между весами или коэффициентами относительной важности отдельных критериев качества исследуемого процесса.

4. Для реализации большого количества вычислительных процедур по сформированной методике разработано специализированное ПО «Система многокритериальной оценки коэффициента сохранения эффективности автобусов». В программе используется аналитические методы получения Парето-оптимальных решений в многокритериальных задачах, исключаящие возможность субъективной оценки. ПО позволяет получать значение КСЭ, максимально соответствующее условиям функционирования АТП по формализованным значениям установленных критериев эффективности.

5. Выполнена апробация и технико-экономическое обоснование эффективности разработанной методики определения КСЭ автобусов. Полученные значения КСЭ позволяют оценить мощность влияния внешней среды эксплуатации автобусов на показатели его эффективности.

6. Определен возможный социально-экономический эффект от применения разработок исследования для крупных мегаполисов, а именно сокращение количества ДТП на 5–7 % для Москва и Санкт-Петербург и, как следствие, снижение величины ежегодного социально-экономического ущерба на 450 000 тыс. руб.

Таким образом, разработанная методика является инструментом, учитывающим внешние возмущения, действующие на АТП, к которым можно отнести и возмущения, вызываемые изменением социотехнических требований к качеству автобусов, а внедрение результатов исследования обеспечит значительный вклад в повышение качества эксплуатации автомобильного транспорта за счет системной оптимизации процессов ТО и ТР автобусов, что подтверждает народно-хозяйственную значимость полученных результатов.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ И ПОЛУЧЕННЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

## Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ

1. *Тайсаев К. К.* Определение коэффициента сохранности эффективности автомобиля / К. К. Тайсаев // Грузовик. 2019. № 12. С. 33–35.
2. *Тайсаев К. К.* Актуальность определения коэффициента сохранности эффективности автомобиля в современных условиях эксплуатации / К. К. Тайсаев // Грузовик. 2020. № 1. С. 33–35.
3. *Тайсаев К. К.* Алгоритм и программное обеспечение определения коэффициента сохранения эффективности автобусов / К. К. Тайсаев, А. В. Терентьев // Мир транспорта и технологических машин. 2020. № 3(70). С. 3–8.
4. *Тайсаев К. К.* Аналитическая модель определения коэффициента сохранения эффективности автобусов / К. К. Тайсаев, А. В. Терентьев // Вестник гражданских инженеров. СПб.: СПбГАСУ, 2020. № 4 (81). С. 197–202.

## Публикации в изданиях, индексируемых международной системой цитирования Scopus и Web of Sciens

1. *Taysaev K. K., Petrova L. G.* Mathematical models analysis of combined processing methods of parts/ Materials Science Forum. 2020. Т. 992 MSF. P. 901–906.
2. *Taysayev K. et al.* Efficiency ratio assessment model for buses/ XIV International Conference 2020 SPbGASU “Organization and safety of traffic in large cities” / Transportation Research Procedia 50 (2020). P. 674–680.

## Программы для ЭВМ, имеющие государственную регистрацию

1. *Тайсаев К. К. и др.* Система многокритериальной оценки коэффициента сохранения эффективности автобусов / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Номер свидетельства: № 2020611000. Страна: Россия, 2019. Дата публикации: 23.01.2020.

---

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 25.12.2020. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 129.

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.

