

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет путей сообщения
Императора Николая II»
МГУПС (МИИТ)

На правах рукописи



МАЖИДОВ Фируз Абдувахобович

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО СРОКА СЛУЖБЫ ГРУЗОВОГО ВАГОНА С УЧЁТОМ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Специальность: 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Иванов Александр Анатольевич

Москва – 2016

Оглавление

Введение.....	4
1 Состояние вопроса. Цели и задачи исследования.....	13
1.1 Инфраструктура вагонного хозяйства.....	13
1.2 Анализ системы технического обслуживания и ремонта техники..	16
1.2.1 Анализ системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов в России.....	19
1.2.2 Системы технического обслуживания и ремонта подвижного состава на железных дорогах за рубежом.....	24
1.3 Информационные системы вагонного хозяйства.....	32
1.4 Анализ технического состояния основных элементов конструкции грузовых вагонов.....	42
1.5 Обзор исследований посвящённых оценке остаточного срока службы изделий в машиностроении и на железнодорожном транспорте.....	49
2 Методика прогнозирования остаточного срока службы детали на основе статистических данных об их отказах.....	58
2.1 Методологическая основа задачи оценки остаточного ресурса детали.....	58
2.2 Основные элементы конструкции грузового вагона, влияющие на безопасность движения поездов.....	62
3 Оценка остаточного ресурса деталей вагонов на основе статистических данных.....	67
3.1 Обоснование вида функции распределения наработки до появления опасного отказа.....	67
3.2 Методика получения точечных оценок параметров функции распределения наработки детали до опасного отказа.....	70

4	Методика формирования первичной статистической информации об опасных отказах деталей.....	73
4.1	Точечные оценки параметров закона распределения наработки до опасного отказа деталей вагонов.....	75
4.2	Оценка остаточного ресурса деталей.....	83
4.3	Технология принятия решения о возможности выпуска детали из ремонта в составе вагона.....	90
5	Методика оценки остаточного срока службы грузового вагона.....	91
5.1	Методы оценки остаточного срока службы вагонов.....	96
5.2	Объект оптимизации.....	103
5.3	Математическая формулировка задачи.....	107
5.4	Целевая функция.....	109
5.5	Технология поиска экстремума целевой функции.....	123
5.6	Методика оценки параметра безопасности грузового вагона.....	131
5.7	Методика расчёта потребности в плановых ремонтах.....	134
5.8	Структура базы исходных данных.....	137
5.9	Алгоритм решения задачи.....	139
6	Тестовый пример применения методики оценки остаточного срока службы вагона.....	141
	Заключение.....	149
	Список сокращений и условных обозначений.....	150
	Список литературы.....	151
	Приложение А.....	161

Введение

Актуальность темы исследования. В настоящее время железнодорожный транспорт России занимает ведущее место на рынке транспортных услуг, выполняя более 80 % грузооборота и 20 % пассажирооборота всей транспортной системы страны. Для поддержания исправности и работоспособности подвижного состава, обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте организована сеть специализированных предприятий, осуществляющих контроль его технического состояния, техническое обслуживание и ремонты различного объёма.

Функционирование системы технического обслуживания и ремонта влияет не только на показатели готовности подвижного состава к перевозкам, но и на стоимость жизненного цикла конструкций, что, в конечном итоге, определяет себестоимость перевозок и эффективность работы всего железнодорожного транспорта.

Существующая система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) грузовых вагонов представляет собой комплекс путей, оборудования, персонала, нормативно-технической документации и распределённых на сети линейных предприятий вагонного хозяйства. Стоимость основных фондов комплекса составляет порядка 15 % основных фондов всего железнодорожного транспорта. Предприятия несут ответственность за безотказную работу и безаварийное использование в перевозочном процессе грузовых вагонов в течение гарантийного периода, а также при следовании в поездах на гарантийных участках.

При реформировании железнодорожного транспорта серьёзные изменения произошли в вагонном хозяйстве: появление собственников подвижного состава, выделение вагонных эксплуатационных депо, перевод на коммерческие формы хозяйствования ремонтных вагонных депо и т.д. Кроме того в условиях необходимости повышения эффективности работы транспорта, провозной и пропускной способности железных дорог, увеличения скоростей движения,

уменьшения простоев вагона под технологическими операциями, снижения расходов на содержание подвижного состава и др. произошла разбалансировка условий эксплуатации и параметров действующей системы ТОиР.

Так, на сегодняшний день обострилось противоречие между требованиями правил технической эксплуатации (ПТЭ) железных дорог РФ и возможностями работников пунктов технического обслуживания грузовых вагонов на станциях (ПТО) обеспечить 100 % безаварийное проследование вагонов по гарантийному участку.

В основе этого противоречия лежат три причины:

- ограниченная или даже нулевая контролепригодность некоторых ответственных элементов конструкции вагона в условиях ПТО вагонов;

- специалисты на ПТО (осмотрщики вагонов) в своей работе при контроле технического состояния вынуждены полагаться в основном не на технические, а на органолептические методы обнаружения повреждений и отказов;

- дефицит времени на контроль технического состояния вагона, тяжёлые условия труда осмотрщиков вагонов (круглосуточная работа, в том числе в условиях плохой видимости, ночное время, ненастной погоды и др.).

Как показывает статистика, в последние годы увеличилось количество нарушений безопасности движения поездов из-за отказов вагонов. Так, например, по данным комитета некоммерческого партнёрства «Объединения производителей железнодорожной техники» (НП «ОПЖТ») в период 2001-2016 г. зафиксировано 170 изломов боковых рам тележек грузовых вагонов, из которых 20 привели к крушениям с серьёзными последствиями и 2 - к авариям.

Таким образом, ситуация с аварийностью на железных дорогах из-за изломов боковых рам тележек грузовых вагонов на сегодняшний день остаётся критической [39].

Выявить с большой вероятностью имеющиеся отказы и повреждения вагонов позволяет глубокая диагностика деталей с помощью технических средств, которая выполняется периодически на специализированных предприятиях (в вагонных ремонтных депо (ВЧД-Р)). Обоснование периодичности этих проверок,

величины гарантийных участков ПТО в системе ТОиР грузовых вагонов становятся актуальными задачами для железнодорожного транспорта.

Стоит отметить, что в вагонном хозяйстве при агрегатном способе ремонта вагонные детали не закреплены за конкретным вагоном, а постепенно меняются в его составе. Это приводит к тому, что в составе нового вагона могут оказаться старогодние детали, а у вагона, идущего под списание, – мало изношенные и относительно новые узлы. В сложившейся ситуации актуальным становится вопрос: – как определить тот самый остаточный срок службы для детали вагона, отработавшей некоторый период времени, для того чтобы обеспечить требуемый уровень риска их отказов в период между глубокими диагностиками. Работа направлена на разработку методики расчётного обоснования остаточного срока службы грузового вагона, параметров системы его технического обслуживания и ремонта с учётом фактического технического состояния деталей и узлов (остаточного ресурса основных ответственных деталей). Методику можно реализовать на основе действующей отраслевой информационной системы технического состояния подвижного состава. Её внедрение позволит перейти на новый уровень организации технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов.

Степень разработанности темы исследования. Исследования по данной тематике имеют широкий спектр. Основной вклад в решение проблемы прогнозирования остаточного ресурса в машиностроении внесли учёные и изобретатели: Болотин В.В., Островский В.А., Садыхов Г.С., Серенсен С.В., Когаев В.П. [5, 53, 66, 71, 72.] и др. Эти исследования в области машиностроения позволили решать задачи оценки остаточного ресурса элементов конструкций.

Применительно к железнодорожному транспорту по данному вопросу, большой вклад внесли Вологодина Л.Б., Вучечич И.И., Деркач Б.А., Кочнов А.Д., Иванов А.А., Ивашов В.А., Коссов В.С., Костенко Н.А., Лхамжавын Б., Митюхин В.Б., Оганьян Э.С., Орлов М. В., Устич П.А. [11, 14, 26, 29, 30, 35, 42, 83] и др. Применительно к тяговому подвижному составу эта проблема рассматривалась

Воробьевым А.А., Горским А.В., Григорьевым П.С., Савоськиным А.Н.[12,17, 18, 21, 62-65] и др.

В машиностроении базовые исследования проблемы разработки и обоснования системы ТОиР выполнил Колегаев Р.Н. [28] и его школа.

Кроме того, по исследования в этом направлении проводились в научно-исследовательских институтах, таких как ГОСНИИВ, ВНИИЖТ, ГП «УкрНИИВ», ВНИКТИ, ОАО НИИТКД и др. Известно что, во ВНИИЖТе исследования по оценке остаточного ресурса проводили Ю.М. Черкашин, Т.П. Северинова, С.Е. Петраков, В.Н. Меркурьев [94], в ГП УкрНИИВе А.В. Донченко, Л.С. Ольгард, С.В. Бондарев Л.Г. Волков [23] и др.

Также активно во ВНИКТИ исследованиями по проблеме оценки остаточного ресурса занимались Б.Б. Бунин, [8, 9] Э.С. Оганьян, Н.Ф. Красюков, Коссов В.С. [50]. В ОАО НИИТКДе вопросами оценки остаточного ресурса занимались В.А. Смирнов, В. Ф. Кузнецов [73].

Анализ приведённых выше работ показывает, что в настоящее время не достаточно подробно разработаны расчётные методы оценки остаточного ресурса основных элементов конструкции вагона, ориентированные на возможности существующей отраслевой информационной системы вагонного хозяйства, а также учитывающие обезличенную форму эксплуатации грузовых вагонов. Таким образом, идеи и подходы к решению проблемы в выполненных ранее исследованиях позволили сформулировать цели и задачи данной диссертационной работы.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является снижение стоимости жизненного цикла вагона и обоснование параметров его системы технического обслуживания и ремонта в условиях изменений параметров эксплуатационной среды путём разработки методики оценки остаточного срока службы конструкции вагона с учётом остаточного ресурса его деталей и узлов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- анализ действующей системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов на отечественных железных дорогах, а также определение мировых тенденций совершенствования стратегий ремонтов;
- анализ повреждаемости грузовых вагонов в современных условиях эксплуатации;
- анализ конструкции грузового вагона для определения элементов, отвечающих за безопасность движения и их опасных отказов;
- анализ исследований, посвящённых оценке остаточного срока службы деталей и систем;
- разработка методики оценки остаточного срока службы для деталей вагонов, имеющие внезапные отказы, ориентированной на использование существующих информационных технологий вагонного хозяйства на железнодорожном транспорте;
- вывод формулы для оценки остаточного срока службы детали с учётом требуемого риска её отказа, позволяющая использовать отраслевую информационную базу;
- обоснование вероятностной модели опасных отказов основных элементов конструкции грузового вагона;
- организация и проведение сетевого эксперимента для получения точечных оценок параметров закона распределения наработки ответственных деталей до опасного отказа;
- для ремонтных предприятий вагонного хозяйства предложена технология применения методики оценки остаточного срока службы детали при принятии решения о возможности её использования в составе отремонтированного вагона;
- определение объекта оптимизации при оценке назначенного остаточного срока службы вагона;
- формулировка оптимизационной задачи расчётного обоснования параметров системы технического обслуживания и ремонта грузового вагона,

отработавшего некоторый период времени, с учётом безусловного обеспечения безопасности движения и соответствия возможностям вагоноремонтной базы;

- разработка методики расчётного обоснования параметра безопасности грузового вагона, периодичности проведения глубоких диагностик для системы управления техническим состоянием грузовых вагонов;

- разработка методики прогнозирования параметра безопасности – максимальной периодичности проведения глубоких диагностик грузового вагона по мере его старения;

- разработан алгоритм оптимизации и приведён тестовый пример использования методики оценки остаточного назначенного срока службы грузового вагона, оценён ожидаемый экономический эффект от её использования на железнодорожном транспорте.

Научная новизна. Научная новизна заключается в:

- разработке методики оценки остаточного срока службы элементов конструкции грузового вагона, отвечающих за безопасность движения, ориентированной на использование отраслевой информационной базы;

- разработке методики оценки параметра безопасности грузового вагона в зависимости от возраста составных частей конструкции;

- оценке с помощью разработанной методики остаточного ресурса основных узлов и деталей в первую очередь влияющих на безопасность движения поездов на основе проведённого сетевого эксперимента;

- разработке методики расчётного обоснования назначенного остаточного срока службы грузового вагона и параметров его системы технического обслуживания и ремонта.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в:

- анализе действующих систем технического обслуживания и ремонта на железнодорожном транспорте и установлении тенденций и перспектив их совершенствования;

- разработке методики оценки остаточного срока службы вагона, проработавшего некоторый период времени и параметров его системы технического обслуживания и ремонта для обеспечения минимума себестоимости единицы работы с учётом возможных изменений параметров эксплуатационной среды (например, запланированных расходов на техническое содержание) при безусловном обеспечении безопасности движения и соответствии возможностям ремонтной базы.

- разработке методики оценки параметра безопасности вагона, которая позволяет учитывать остаточный ресурс и возраст основных элементов вагонных конструкции и прогнозировать его изменение по мере старения конструкции.

Практическая значимость работы. Практическая значимость состоит в:

- оценке остаточного ресурса основных ответственных элементов конструкции вагона;

- определении периодичности проведения глубоких диагностик вагона с учётом фактического состояния его элементов;

- разработке технологии принятия решения о возможности использования деталей в составе отремонтированного вагона для предприятий вагонного хозяйства, которая ориентирована на возможности существующей отраслевой информационной системы;

- обеспечении снижения расходов жизненного цикла конструкции вагона за счёт обоснования остаточного срока службы вагона и параметров его системы технического обслуживания и ремонта в условиях изменения параметров эксплуатационной среды на железнодорожном транспорте.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач применялись следующие методы:

- методика оценки остаточного срока службы деталей разработана на основе классических методов теории надёжности с учётом вероятностных моделей опасных отказов;

- при определении ответственных за безопасность деталей и узлов использовано древовидная модель схода вагона с рельсов за время t ;

- при определении остаточного срока службы детали вагона использована теоретически обоснованная модель опасного отказа, а параметры модели определены по статистической информации, полученной экспериментально на основе отраслевой информационной системы централизованного пономерного учёта грузовых вагонов. При этом использован метод максимального правдоподобия для неполных выборок, гипотеза о достоверности модели проверена с помощью критерия Колмогорова;

- проведение эксперимента, получение точечных оценок параметров законов распределения наработки до отказа и получены оценки остаточного ресурса детали получены на основе классических методов теории вероятностей, теории надёжности и математической статистики;

- методов математического анализа при решении оптимизационной задачи при обосновании параметров системы технического обслуживания и ремонта вагона в остаточный срок службы;

- для оценки остаточного срока службы грузового вагона сформулирована оптимизационная задача с двумя ограничениями на аргументы целевой функции, приведено обоснование существования её экстремума, выведены рекуррентные формулы поиска оптимальных решений.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

- методика оценки остаточного ресурса основных элементов конструкции грузового вагона, влияющих на безопасность движения, ориентированная на использование существующей информационной базы отрасли;

- технология принятия решения о возможности использования ответственных деталей в составе отремонтированного вагона с учётом требуемого (управляемого) риска их отказа;

- методика определения периодичности проведения глубоких диагностик грузовых вагонов с учётом фактического технического состояния их деталей и узлов;

- методика расчётного обоснования параметров системы технического обслуживания и ремонта грузового вагона и его остаточного назначенного срока

службы в условиях изменений параметров эксплуатационной среды с учётом фактического технического состояния деталей и узлов конструкции.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов оценки остаточных сроков службы деталей обеспечивается за счёт обоснования вероятностной модели опасного отказа и получения точечных оценок её параметров путём проведения сетевого эксперимента на базе системы централизованного пономерного учёта грузовых вагонов ГВЦ ОАО «РЖД» в соответствии с планом испытаний на надёжность, а также корректного использования теории надёжности при обработке результатов. Достоверность разработанной методик оценки остаточного срока службы определяется корректностью применения методов математического анализа.

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах, имеющих теоретическую и практическую значимость, из них 2 работы – в рецензируемых научных периодических изданиях, включённых в перечень ВАК при Минобрнауки России для публикации результатов диссертационных работ.

Основные положения диссертационной работы докладывались на Международной конференции «NEWS OF SCIENCE-2015», Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Trans-Mech-Art-Chem-2014», на пятнадцатой и шестнадцатой научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов», межвузовском сборнике научных работ аспирантов и молодых учёных «Наука, Техника, Человек-2014».

Результаты исследований докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» МГУПС (МИИТ).

1 Состояние вопроса. Цели и задачи исследования

1.1 Инфраструктура вагонного хозяйства

Ресурс изделия – это заложенная при его изготовлении способность сопротивляться неизбежным процессам деградации. Процесс старения изделий зависит не только от интенсивности использования, его свойств, но поддается ещё и управлению в виде профилактических ремонтов и обслуживании различного уровня и объёма. Набор распределённых во времени управлений такого рода, чередующихся с периодами использования изделия по назначению, называют стратегией системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

На железнодорожном транспорте для эксплуатации грузовых вагонов и обеспечения безопасности движения существует специальная структура – вагонное хозяйство (ВХ). Это территориально рассредоточенная на сети железных дорог России совокупность линейных производственных предприятий (вагонных депо эксплуатационных (ВЧД-Э), вагонных депо ремонтных (ВЧД-Р), вагоноремонтных заводов (ВРЗ), вагоно-колёсных мастерских (ВКМ), механизированных пунктов ремонта вагонов (МПРВ), пунктов подготовки вагонов к перевозкам (ППВ), промывочно-пропарочных станций по подготовке цистерн под налив (ППС) на которых, основываясь на единой отраслевой нормативно-технической документации (НТД) с учётом местных условий осуществляется контроль технического состояния, техническое обслуживание и ремонт грузовых вагонов. Основные фонды ВХ составляют пятую часть основных фондов всего железнодорожного транспорта [22].

Основное назначение ВХ заключается в обеспечение перевозочного процесса достаточным количеством исправных и работоспособных вагонов [86].

На работников вагоноремонтных компаний и работников вагоноремонтных предприятий возложено пять следующих функций [83].

1) своевременное обнаружение повреждений и отказов вагонов при непосредственном использовании по назначению (функция ВЧД-Э);

2) техническое обслуживание и текущий ремонт вагонов в пути следования (функция ВЧД-Э);

3) ремонт вагонов крупного объёма и техническая ревизия важнейших их агрегатов (функция ВЧД-Р);

4) подготовка вагонов к перевозкам (функция ППВ ВЧД-Э);

5) разработка технических требований, заказ и приобретение новых конструкций вагонов, модернизация и исключение устаревших из инвентарного парка (функция собственников вагонов).

Каждая из них характеризуется:

- технологией исполнения;
- технологией обеспечения различными ресурсами (кадры, финансы, материалы, производственное оборудование, площади и т.п.);
- показателями качества исполнения функций и способами его оценивания;
- нормативно-технической документацией, регламентирующей исполнение функции.

В последние годы в результате проведённых реформ, которые направлены на демонополизацию железнодорожного транспорта, произошли серьёзные фундаментальные изменения в ВХ. Например, взамен одного собственника подвижного состава образовалось более тысячи. Изменены связи в системе предприятий, выполняющих техническое обслуживание и ремонт вагонов в части разделения их ответственности за производство ремонта крупного объёма (деповского или капитального) и текущее техническое содержание. В результате, сформировано три независимых субъекта – это предприятия ВХ по техническому обслуживанию и текущему ремонту, вагоноремонтные компании (ВРК) и собственники вагонов. Каждый из них, выполняет лишь часть из совокупности соответствующих функций.

Под системой ТОиР изделия в широком смысле понимают комплекс технической документации, работников и технологического оборудования [19]

Однако такая трактовка данного понятия нетехнологична с точки зрения разработки моделей для оптимизации структуры и параметров системы ТОиР

вагона. Поэтому под системой ТОиР изделия в узком смысле будем понимать типы и порядок чередования предусмотренных нормативно-технической документацией (НТД) ремонтов, технических обслуживаний и контролей технического состояния, которые взаимоувязаны стратегиями и объёмами работ по их осуществлению. Таким образом, система ТОиР изделия характеризуется, как и любая другая система, элементным составом (типами ремонтов и технического обслуживания) и структурой, т.е. правилом взаимосвязи двух типов: между элементами системами; между элементом и системой. Указанные связи задаются с помощью стратегий каждой компоненты и их упорядочивания во времени, пространстве и по затраченным ресурсам. Относительно любой компоненты системы ТОиР изделия существуют три проблемы – сроков, организации и поиска эффективных технологических процессов её реализации.

С помощью подбора соответствующих стратегий представляется возможным осуществлять управление процессом старения конструкций и машин.

Функционирование системы ТОиР непосредственно влияет на стоимость жизненного цикла конструкций, что, в конечном итоге, определяет себестоимость перевозок и эффективность работы всего железнодорожного транспорта.

1.2 Анализ системы технического обслуживания и ремонта техники

Процесс старения изделий зависит от свойств, заложенных при их проектировании и изготовлении, но этим процессом можно управлять, осуществляя профилактические ремонты и обслуживание. Набор распределённых во времени управлений такого рода, чередующихся с периодами использования изделия по назначению, называют стратегией. Под стратегией ремонта будем понимать правило, согласно которому изделие ставится в ремонт. Возможны три правила постановки в ремонт:

- после отказа изделия, после чего восстанавливают работоспособность. Данный ремонт применим в основном при эксплуатации вспомогательного оборудования, когда замена оборудования дешевле, чем затраты на его ремонт и обслуживание;

- после заранее установленной наработки изделия. Ремонт осуществляют на основе норм установленных в регламенте или в соответствии с рекомендациями завода изготовителя через определённые промежутки времени, например, еженедельно или раз в месяц, независимо от технического состояния;

- по достижению предельно допустимого состояния.

При организации технической эксплуатации сколько-нибудь сложных машин и конструкций прибегают к комбинации указанных трёх стратегий. Достигается это благодаря использованию нескольких типов ремонта и технического обслуживания. Правила взаимодействия стратегий соответствующих ремонтов во времени, по месту проведения ремонтных работ, по коммерческому состоянию вагона и т.п. составляют стратегию системы ТОиР.

Основной задачей системы ТОиР является поддержание заложенных показателей надёжности конструкции при использовании её назначению. В таблице 1.1. приведена классификация видов ремонта в технике.

Таблица 1.1 – Классификация видов ремонта

№	Признак классификации	Виды ремонтов
1	Степень восстановления ресурса	Капитальный Средний Текущий
2	Планирование	Плановый Неплановый
3	Регламентация выполнения	Регламентированный По техническому состоянию
4	Сохранение принадлежности ремонтируемых частей	Обезличенный Необезличенный
5	Организация выполнения	Агрегатный Поточный Стационарный Ремонт эксплуатирующей организацией Ремонт специализированной организацией Ремонт предприятием-изготовителем

Возможны две принципиальные стратегии ремонта (Рисунок 1.1):

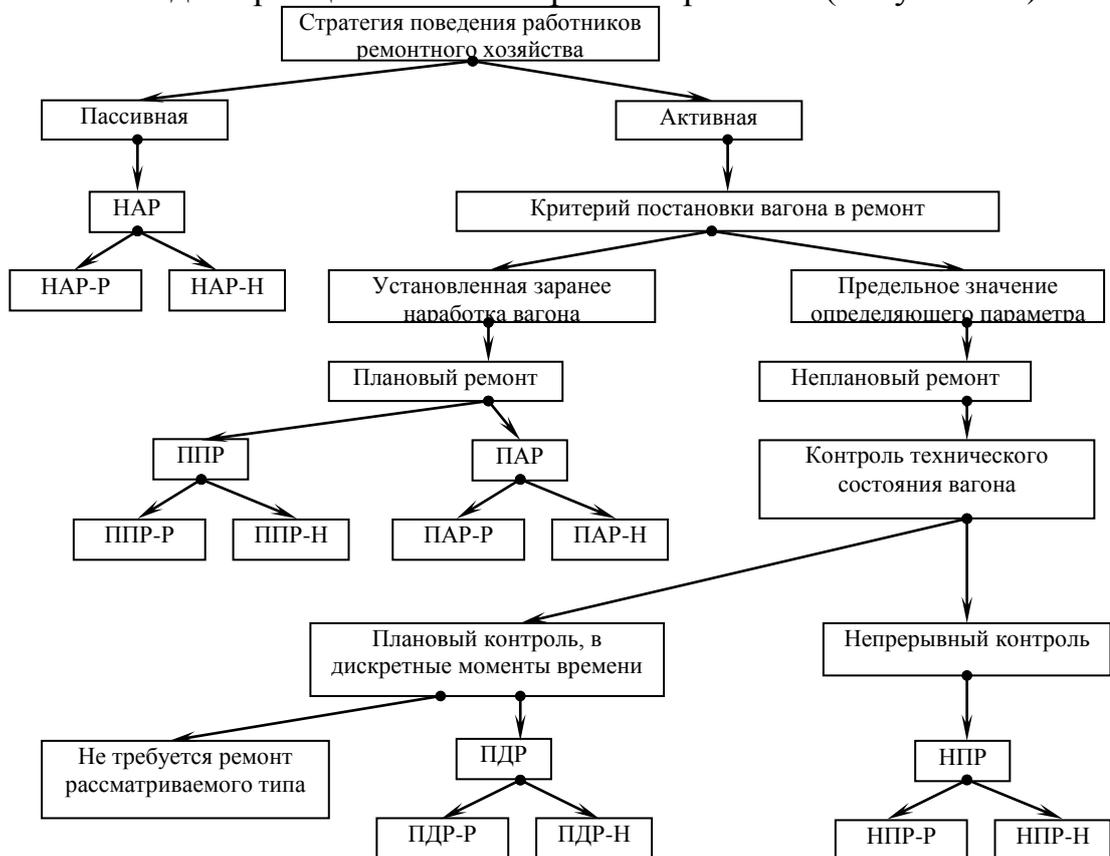


Рисунок 1.1 – Стратегии проведения ремонтов в системе ТОиР

- пассивная – ждать появления отказа, а затем восстанавливать работоспособность. В этом случае проводимый ремонт называют непланово-аварийным (НАР), который может, в свою очередь, быть регламентированным (НАР-Р) или нерегламентированным (НАР-Н);

- активная – не дожидаясь выхода из строя вагона, прекращать на время использование его по назначению и проводить частичный или полный ремонт.

Если момент времени постановки в ремонт заранее запланирован, то последующий ремонт называют плановым (например, по времени или пробегу), который может быть либо планово-предупредительным ремонтом (ППР), либо планово-аварийным ремонтом (ПАР). Возможны случаи, когда моменты постановки в ремонт определяются по каким-либо косвенным признакам приближения вагона к неработоспособному состоянию. Упомянутое приближение можно уловить по значению определяющего параметра – температуры, зазора, звука, цвета, химического состава выхлопных газов и т.п.

При этом следует иметь в виду два случая. Если оценка технического состояния конструкции происходит в заранее запланированные моменты времени, то последующий ремонт называют планово-диагностическим (ПДР). Если идентификация технического состояния конструкции происходит по показаниям встроенной диагностической аппаратуры, то последующий ремонт называют непланово-профилактическим (НПР). Непланово-аварийный ремонт противопоказан для изделий, отказ которых может привести к серьёзным невосполнимым последствиям для человека, природной среды или экономики. Такая стратегия ремонта характерна для бытовой техники (стиральных машин, электробытовых приборов, часов и т.п.).

Для вагонов же с 1881 г. документально установлен ремонт по установленной заранее наработке, который, собственно, используется и в настоящее время применительно к капитальному и деповскому ремонтам. По мере совершенствования конструкций, технологий изготовления в этой системе увеличиваются только межремонтные периоды (для которых отсутствует утверждённая методика расчётного обоснования).

1.2.1 Анализ системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов в России

Обеспечение надёжности вагонов является одной из основных задач ВХ. Надёжность вагона поддерживается принятой системой его ремонта и технического обслуживания [38].

По мере совершенствования конструкции вагона система ТОиР неоднократно изменялась, изменялись компоненты, сроки проведения и др. Этот процесс продолжается до сих пор. Это обусловлено, тем что, произошли существенные изменения конструкций вагонов, создаются новые средства технической диагностики и т.п. [83].

По мере развития отечественных железных дорог и увеличения вагонного парка ужесточались требования к их содержанию. В различные периоды существовали различные стратегии и методы ремонта. Эти периоды можно разделить на несколько этапов.

Первый этап продолжался до 1933 г., когда по приказу МПС № 340 Ц произошло выделение вагонного хозяйства в самостоятельную подотрасль. Этот период характеризовался возрождением ВХ и ремонтной базы до уровня 1914 г. Наблюдался небольшой грузооборот, ощущалась острая нехватка квалифицированных инженерно-технических кадров и почти полностью отсутствовали научно-технические разработки, касающиеся организации ремонта подвижного состава.

Второй этап продолжался с 1933 до 1955 г. в этот период были заложены материальные и организационные основы работы хозяйства, позволяющие значительно повысить грузооборот. С ростом грузооборота проблема поддержания технического состояния вагонного парка усугублялось.

Создание ВХ послужило толчком не только к развитию вагоноремонтной базы, но и разработке правил ремонта вагонов.

В 1934 г. была введена новая система ТОиР (Приказ №4 от 04.01.1934 г.), в которой реализован дифференцированный подход к межремонтным срокам в

зависимости от конструкции вагона. Были введены средние ремонты; для двухосных вагонов капитальный ремонт (КР) – с периодичностью 6 лет; средний ремонт – с периодичностью 3 года после КР; для четырёхосных КР через 8 лет, СР через 4 года. Сформировавшаяся на этом этапе система ТОиР сохранилась до сих пор.

Третий этап развития системы ремонта берёт начало с 1955 г. и продолжается по настоящее время. В этот период начались внедрение букс на подшипниках качения, специализация подвижного состава, насыщение парка большегрузными вагонами, переход на автосцепные устройства и т.п. В этот период через каждые 10 лет разрабатывалась и обновлялась система ремонта, межремонтные периоды назначались в зависимости от предшествующего ремонта, типа и модернизации вагона. Приказом №4ЦЗ от 06.01.1955 г. впервые регламентировалась периодичность капитального ремонта, среднего и годового ремонтов, оговаривался механизм постановки вагонов в плановые ремонты.

В приказе №40Ц от 29.07.1961 были введены новые названия ремонтов: капитальные ремонты стали называться заводскими, а годовые – деповскими.

В приказе № 36Ц от 13.08.1971 г. были названы другие компоненты системы ТОиР – текущий безотцепочный, текущий отцепочный ремонты, технический осмотр, техническая ревизия.

Приказ МПС № 32Ц от 22.09.1980 г. является в определённом смысле этапным для ВХ. Впервые была введена периодичность плановых ремонтов грузовых вагонов. Эта система ремонта не претерпела существенных изменений до настоящего времени.

Приказом МПС № 4Ц от 19 января 1990 г. введена система ТОиР, согласно которой ДР грузовых вагонов разрешалось производить по техническому состоянию. Руководителям депо разрешалось производить отсрочку плановых видов ремонта не более чем на 6 месяцев вагонам, обеспечивающим по своему техническому состоянию безопасность движения. Однако нововведение просуществовало недолго. В 1995 г. согласно приказу МПС № 7ЦЗ от 18 декабря 1995 г. была снова установлена стратегия ДР по календарной наработке.

В 1997 г. МПС сформулировало задачу разработки такой системы ремонта, при которой вывод вагонов в ДР происходил бы с учётом фактического выполненного пробега, выраженного в километрах. В результате, согласно Указаниям МПС № К-2746у 06.12.1999 г., предложена стратегия ДР по двойному критерию (называемая двухпараметрическая стратегия ДР).

Для вагонов, выпускаемых из планового ремонта, с января 2008 г. согласно телеграммы ОАО «РЖД» №ЦДРВ-3429Т от 25.12.2007 г. было введено в действие «Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении», в котором заложены одновременно две системы ремонта. Первая система (по комбинированному критерию) определяет периодичность ДР в зависимости фактического выполненного объёма работ (пробегу), но не позднее установленного периода, вторая – «по критерию календарной продолжительности эксплуатации». Впервые уточнены нормативный срок службы (НСС) грузовых вагонов и предусмотрена разная периодичность ДР на первом и последующих ремонтных циклах для некоторых типов вагонов.

В настоящее время документ, регламентирующий работу ВХ – это [59]. В нем регламентированы следующие виды ремонтов грузовых вагонов (Таблица 1.2):

Таблица 1.2 – Виды работ по техническому обслуживанию и ремонту грузовых вагонов

№	Вид ремонта	Стратегия	Периодичность проведения
1	Техническое обслуживание – ТО	Плановая	На каждом ПТО в пути следования (600 км)
2	Техническое обслуживание с диагностированием – ТОД	Неплановая	Периодичность не установлена
3	Текущий отцепочный ремонт, подразделяющийся на: ТР-1 при подготовке к перевозкам ТР-2 в пути следования	Неплановый аварийный ремонт	Периодичность не устанавливается
4	Деповской ремонт – ДР	Плановый ремонт	Установлена периодичность по календарю или пробегу
5	Капитальный ремонт – КР		Установлена периодичность по календарю
6	Капитальный ремонт с продлением срока службы – КРП		

Относительно действующей системы ТОиР можно выделить несколько проблем.

Основная проблема состоит в том, что вагоны ставятся в ремонт вне зависимости от того, требуется ли ремонт или не требуется, т.е. действующая система ТОиР является низкоэффективной. Кроме того межремонтные пробеги не согласованы с нормативным сроком службы вагона. Отсутствует расчётное обоснование межремонтных периодов и назначенного нормативного срока службы вагона. Кроме того, нормативный срок службы вагона не соответствует его НСС ответственных деталей. Например, срок службы полувагона составляет 22 года, при этом срок службы боковой рамы тележки составляет 32 года. Следовательно, после списание вагона у боковой рамы остаётся не выработанный ресурс 10 лет. Аналогичные несоответствия существуют и для других составных частей вагона (поглощающий аппарат - 10 лет, ось колёсной пары - 15 лет и т.д.).

Существующая система ТОиР вагонов регламентируется несколькими документами. Некоторая часть в Распоряжении №2759 от 29.12.2012 г. ОАО «РЖД», а другая часть в руководствах ремонта, инструкциях эксплуатации и т.п., которые выпускались, не одновременно и независимо друг от друга, не согласованно готовились различными коллективами учёных и специалистов. В таблице 1.3 представлено, какими документами регламентирована система ТОиР вагонов.

Таблица 1.3 – Регламентирующие документы системы ТОиР грузовых вагонов

№ п/п.	Ремонты	Документ	
		Стратегия	Объем работ
1	Контроль за техническим состоянием	Правила технической эксплуатации (ПТЭ)	Инструкция осмотрщика вагонов
2	ТО	Распоряжением ОАО "РЖД" № 2623р от 18.12.2009 г. утверждены и введены в действие с 20.12.2009 г. Комментарии к Инструкции по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрщику вагонов) Инструкция приведена в ред. Протокола 52-го Заседания Совета по ж.д. транспорту	Объем работ не регламентирован
3	ТР	Распоряжением ОАО "РЖД" № 2623р от 18.12.2009 г. утверждены и введены в действие с 20.12.2009 г. Комментарии к Инструкции по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрщику вагонов) Инструкция приведена в ред. Протокола 52-го Заседания Совета по ж.д. транспорту	Объем работ не регламентирован
4	ТОД	Положение о техническом обслуживании грузовых вагонов с диагностированием. Протокол от 6-7.05.2014 г. № 60 (Приложение №19)	Регламентирован в документе (Положение о техническом обслуживании грузовых вагонов с диагностированием)
5	ДР	Распоряжение №2759 от 29.12.2012 г. ОАО «РЖД», положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении (Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол № 57 от 16-17 октября 2012 г.).	Регламентирован (Руководящий документ «Руководство по деповскому ремонту грузовых вагонов»)
6	КР	Распоряжение №2759 от 29.12.2012 г. ОАО «РЖД», положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении (Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол № 57 от 16-17 октября 2012 г.).	Руководящий документ «Руководство по капитальному ремонту грузовых вагонов»
7	КРП	Приказ ОАО «РЖД»	Нет документа

1.2.2 Системы технического обслуживания и ремонта подвижного состава на железных дорогах за рубежом

На зарубежных железных дорогах можно выделить несколько подходов к организации системы ТОиР вагонов [90].

Так, например, на железных дорогах Германии основным документом, регламентирующим систему ремонта вагонов, является промышленный стандарт DIN 31051 «Техническое обслуживание. Наименование операции и технология выполнения». В соответствии с этим документом техническое содержание включает в себя комплекс операций по поддержанию и восстановлению технического состояния, а также оценке фактического технического состояния вагона. В документе регламентированы: техническое обслуживание, технические осмотры, ремонт и модернизация. Сроки между ремонтами устанавливаются в зависимости от запаса «износа» основных узлов и деталей [45]. Наличие установленных сроков между ремонтами свидетельствует о плановой стратегии проведения ремонтов, аналогичной, используемой на отечественных железных дорогах.

На железных дорогах Великобритании применяется система ремонта грузовых вагонов, которая предусматривает выполнение периодического генерального, промежуточного и текущего ремонтов. Выполнение ремонтов вагонов осуществлялось частной фирмой по договорам, которая на своих предприятиях проводила технические осмотры и ремонты вагонов в интервалах между рейсами. Цель такого осмотра – предотвратить создание аварийных ситуаций, которые могут возникнуть в пути следования из-за технических неисправностей вагонов. Кроме того, вагоны один раз в два месяца подаются в мастерские для производства, в ранее оговорённом объёме, технического обслуживания, что также свидетельствует о плановой стратегии при выполнении ремонтов крупного объёма.

Более того, высокоскоростные поезда оснащаются датчиками, выдающими информацию о работе оборудования, для планирования и проведения

технического обслуживания. В компании Bombardier разработана система Orbita, базирующаяся на информационно-поисковых компьютерных технологиях. Она позволяет в автоматическом режиме анализировать и формировать отчётность. Отчётность классифицирует отказы по трём категориям, каждой из которых соответствует свой цвет – зелёный, жёлтый или красный. Цвет указывает, насколько срочно необходимо обратить внимание на ту или иную единицу подвижного состава. Аналогичное устройство поиска неисправностей Traintracer разработано в компании Alstom. Traintracer использует данные GPS для определения точного расположения места возникновения неисправности [45, 54].

Во Франции техническое обслуживание железнодорожного подвижного состава выполняют в основном подразделения Национальной компании французских железных дорог (SNCF - Société Nationale des Chemins de fer Français). Различают пять уровней технического обслуживания и ремонта:

- 1 ежедневный технический осмотр и экипировка;
- 2 межрейсовое техническое обслуживание с устранением небольших дефектов;
- 3 ремонт малого объёма с плановой заменой некоторых узлов и деталей;
- 4 ремонт среднего объёма (восстановительный);
- 5 ремонт большого объёма (капитальный) с улучшением технических и эксплуатационных параметров или модернизацией.

Для каждого уровня установлена периодичность в единицах календарной продолжительности и/или наработки (Таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Периодичность проведения ремонтов на французских железных дорогах

Вид	Техническое обслуживание	Периодичность
ES	технический осмотр без отвлечения от эксплуатации	5000 км
ECC	технический осмотр оборудования, без отвлечения от эксплуатации	8 дней
ATS	периодическое техническое обслуживание;	22 дня
ECF/ EMN	плановый осмотр оборудования/ плановый осмотр механической части	37 дней
ATS1	периодическое техническое обслуживание 1	52 дня
ATS2	периодическое техническое обслуживание 2	168 дней
VL	ремонт малого объёма	450 000 км или 10 мес.
VG	общий ремонт	900 000 км или 19 мес.
GVG	общий ремонт увеличенного объёма	1800 000 км или 37 мес.

При ремонте среднего объёма, ремонтируют или заменяют отдельные элементы, каждый из которых имеет свой жизненный цикл, и основные усилия сосредоточены на ремонте кузова с восстановлением требуемого состояния его несущей конструкции и ряда компонентов (например, полов и дверей), а также внутреннего оборудования. Периодичность этих работ составляет 15–20 лет. При капитальном ремонте, входящем в уровень 5, осуществляется полная замена технически устаревших элементов и/или переделка кузова с учётом изменившихся требований клиентов и появления новых нормативов. Тогда же, если это целесообразно, производится модернизация с перекомпоновкой единиц подвижного состава. Сроки этих работ определяются в индивидуальном порядке для каждой серии подвижного состава [79]. В системе ТОиР железных дорог Франции при планировании ремонтов используется комбинированный критерий (километровой и календарной наработки).

Система ТОиР играет важную роль при эксплуатации высокоскоростных поездов. Так, например, для высокоскоростного поезда «Сапсан» (поезда немецкой платформы «Velaro») стратегия ремонта ориентирована на оценку фактического технического состояния оборудования и предполагает несколько

подходов к выполнению различных видов работ. При разработке конструкции предусмотрена проверка элементов оборудования с целью установления срока их службы в зависимости от условий эксплуатации с учётом воздействий, вызывающих износ, а также выполняется оптимизация расходов на обслуживание и ремонт. Кроме того, предусмотрен периодический (регулярный) контроль состояния отдельных компонентов и групп оборудования, что позволяет использовать полученные данные для прогнозирования показателей надёжности. Планирование и проведение технического обслуживания осуществляется в автоматизированном режиме с помощью компьютеризированной системы управления техническим обслуживанием (CMMS - Computerized Maintenance Management System) [95].

Установленные виды ремонтов и обслуживаний и их периодичность приведены в таблице 1.5. Работоспособность поезда и его узлов, восстанавливается агрегатным методом, в условиях депо, т.е. блочно-модульной заменой неисправного узла (блока) узлом (блоком) из состава оборотных комплектов.

Таблица 1.5 – Элементы системы ТОиР высокоскоростного поезда «Сапсан»

Вид	Межремонтный пробег	Минимальное время простоя	Примечание
L	4000 км ± 10 %	1 ч	Выполняется в условиях депо
N	20000 км ± 20 %	4 ч	
IS 510	120000 км ± 10 %	11 ч	
IS 520	240000 км ± 20 %	23 ч	
IS 530	480000 км ± 20 %	35 ч	
R1	1250000 км ± 20 %	10 рабочих дней	Выполняется в условиях завода
R2	2500000 км ± 20 %	14 рабочих дней	
R3	3750000 км ± 20 %	26 рабочих дней	
R4	5000000 км ± 20 %	28 рабочих дней	
R5	7500000 км ± 20 %	48 рабочих дней	

Несмотря на предусмотренную оптимизацию межремонтных периодов на базе оценки показателей надёжности в конкретных эксплуатационных условиях,

система ремонта имеет плановый характер, и планирование осуществляется в единицах километровой наработки.

В Северной Америке (США) отсутствует единая система ТОиР, а ремонт проводятся лишь по необходимости [56]. Государственные организации Ассоциация Американских железных дорог (ААЖД) и Федеральная железнодорожная администрация (ФЖА), устанавливает лишь технические нормативы на эксплуатацию и обслуживание, которым должны отвечать вагоны по условиям безопасности движения. Тормозная система вагона является единственным компонентом в конструкции грузового вагона, осмотр и техническое обслуживание которой в США проводится строго по установленному графику, а нормативный стандарт по безопасности тормозной системы железнодорожного подвижного состава устанавливается государственными органами надзора. В настоящее время проверка пневматической тормозной системы проводятся:

- Через 8 лет после постройки или ремонта/модернизации вагона;
- Через каждые 5 лет после события, описанного выше;
- Дополнительно: существует ещё 12 иных причин/поводов для проведения ремонта.

Все остальные процедуры по осмотру и минимальному техническому обслуживанию вагонов и тележек регулируются стандартами ААЖД, которые публикуются как систематизированные серии руководящих документов. Стандарты ААЖД являются обязательными для всех участников рынка железнодорожной отрасли. В США крупные собственники грузовых вагонов или лизинговые компании самостоятельно формируют собственную систему ТОиР вагонов.

На железных дорогах Кармье (Канада) применяют циклический ремонт вагонов, при котором вагоны через каждые 45 дней (19 тыс. км пробега) поступают в депо для периодического ремонта.

На железных дорогах Японии ремонт высокоскоростных поездов осуществляется по планово-аварийной системе [45]. Отличительной

особенностью данной системы является то, что межремонтные периоды в Японии меньше, чем на железных дорогах других стран. Общий осмотр, выполняемый на вагоноремонтных заводах, производится через 1–4 года с простоем в ремонте 2,2 дня. Частный ремонт производится в условиях депо через 8 месяцев, периодический осмотр – через 35–55 дней, а осмотр поезда – через каждые 16 часов.

Особое внимание заслуживает система ТОиР итальянских железных дорог, основанная на плановом принципе. Каждая единица подвижного состава рассматривается как комплекс отдельных узлов и деталей, занесённых в базу данных и контролируемых по установленным параметрам. В первую очередь внимание уделяется ремонту узлов и деталей, непосредственно влияющих на безопасность движения поездов. Таким образом, необходимость контроля технического состояния всего вагона отпадает. Требуется только своевременно осуществлять ремонт ответственных элементов по специально разработанному графику, исходя из среднего срока службы каждого узла. В информационной базе указывается срок службы узлов и деталей, по окончании которого их использование прекращается, элемент заменяют и отправляют либо в ремонт, либо на утилизацию [82].

Несмотря на плановую стратегию ремонтов крупного объёма, периодичность их проведения оценивается по показателям долговечности наиболее ответственных узлов вагонов.

В Австралии функционирует автоматизированная система контроля, осуществляющая слежение за узлами и деталями подвижного состава, оценивающая техническое состояние вагонов по десяти параметрам. Система ведёт историю каждого ответственного элемента вагона с указанием обнаруженных повреждений, сроков и объёмов проведённых ремонтов, номеров вагонов, на которые элемент устанавливался. Это позволяет прогнозировать поведение того или иного элемента конструкции в эксплуатации, а на основе этих прогнозов планируются загрузка производственных ремонтных мощностей, материально-технического обеспечения, закупка новых узлов и деталей [Там же].

Такой подход к организации системы технического обслуживания и ремонта уже не является плановым в отличие от систем, рассмотренных выше. Однако он ориентирован на прогнозирование индивидуальных показателей повреждаемости элементов конструкции. Его можно реализовать лишь только для узлов и деталей, которые имеют внешние признаки приближения к неработоспособному состоянию, т.е. с помощью контрольных измерений можно оценить темп деградации конструкции и прогнозировать ремонтные работы.

Однако при проведении ремонтов крупного объёма необходимо, прежде всего, выявить внезапные отказы, которые в процессе эксплуатации вагона могут привести к крушениям и авариям, например, усталостные трещины основных несущих элементов вагонных конструкций [85]. Такие отказы, в отличие от постепенных, не имеют внешних признаков приближения к неработоспособному состоянию. Поэтому упомянутая выше автоматизированная система не позволит оценить темп деградации конструкции, у которой возможны внезапные отказы.

Как видно, на отечественных железных дорогах, а также за рубежом в системах ТОиР много общего. В большинстве стран используют плановую стратегию проведения ремонтов, в том числе при обслуживании высокоскоростных поездов. Для определения периодичности проведения ремонтов используют различные автоматизированные системы, имеющие информацию о техническом состоянии отдельных, наиболее ответственных деталей и узлов. Такой подход становится возможным с внедрением современных информационных технологий.

При этом стоит отметить, что в системах ТОиР вагонов недостаточно развиты бортовые системы диагностики, следящие за техническим состоянием ответственных элементов. Примером таких систем является система контроля нагрева букс (СКНБ) пассажирских вагонов или аналогичная система и датчики ускорений высокоскоростных поездов «Сапсан».

В настоящее время на железных дорогах России на базе ГВЦ ОАО «РЖД» действует отраслевая информационная сеть, внедрена система сбора, передачи (подъёма с линейного уровня), централизованного хранения и обработки

первичной информации о техническом состоянии каждого вагона.

В силу объективных причин возможности информационных систем применяемых в вагонном хозяйстве используются не полностью. Эти системы, могут стать составной частью автоматизированной системы управления фактическим техническим состоянием вагонов в эксплуатации.

1.3 Информационные системы вагонного хозяйства

В развитии на отечественных железных дорогах информационной базы отрасли можно выделить четыре следующих этапа.

1) Установление чёткой системы протоколирования узловых событий относительно технического состояния вагонов;

2) Создание групп надёжности вагонного хозяйства;

3) Создание отраслевой информационной системы централизованного пономерного учёта грузовых вагонов (ЦПУВ).

4) Разработка технологии получения эксплуатационных данных о наработках вагонов до появления опасных повреждений по данным системы ЦПУВ о наработках их до обнаружения упомянутых повреждений.

Остановимся более подробно на первых трёх этапах.

Изначально управление в отрасли основывалось на информации, которая накапливалась и обрабатывалась ручным способом. Для этого на железнодорожном транспорте в 30-х г. прошлого века была создана чёткая система протоколирования изменений в техническом состоянии вагонов. Обнаруженные изменения технического состояния подвижного состава и другие события фиксировались с помощью вагонных учётных форм (Приложение А).

Тем самым, было налажено производство первичной информации об изменениях технического состояния каждого вагона. В то время, на железнодорожном транспорте не существовало технических средств для постоянной и своевременной передачи огромных массивов эксплуатационной информации её потребителям. Собранные данные о техническом состоянии подвижного состава в лучшем случае использовались для работы по конструктивному улучшению вагонов или для собственных нужд вагонных депо. При этом работа по совершенствованию конструкции вагонов, модернизация основных узлов шла на основе глубокого анализа их отказов в процессе эксплуатации.

Кроме того, она имела важное значение, когда в случае аварии или крушения следственные органы без особого труда могли по данным учётных форм типа ВУ найти конкретного виновника.

Проанализируем упомянутую чёткую систему протоколирование первичной информации. Получению эксплуатационной информации по данным учётных форм типа ВУ (Приложение А) соответствует шифр 1–3–6–10 (Рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Схема получения первичной информации

Этот вариант не мог обеспечить требуемую эффективность управления ВХ. Для этого в начале 70-х годов было создано специальная служба надёжности, которая обеспечивала систему ручного сбора первичной информации о техническом состоянии вагона [92]. В её состав входило более 40 групп, работавших на различных вагоноремонтных предприятиях крупных узловых станций. В основном они подчинялись начальнику отдела надёжности проектно-

конструкторского бюро главного управления вагонного хозяйства МПС (ПКБ ЦВ).

Цель созданной централизованной ручной системы сбора данных была оценка надёжности вагонных конструкций. Для этого группы надёжности собирали данные о техническом состоянии соответствующих типов вагонов. Собранные данные обрабатывали и анализировали, а по результатам готовили рекомендации заказчику – Главному управлению вагонного хозяйства МПС и рассылали их соответствующим вагоностроительным заводам и другим заинтересованным сторонам. Получали эту первичную информации согласно рисунку 1.2 по схеме 1-2-5-9. Однако такая технология сбора информации не соответствовала планам испытаний на надёжность, т.е. на основе полученной информации невозможно было оценить количественные показатели надёжности вагона [85].

Для устранения указанного недостатка предлагалось сбор данных осуществлять не на так называемых решающих станциях, а сосредоточить работу относительно вагонов, которые эксплуатируются в замкнутых маршрутах (имеющих среднесуточные пробеги в 2 раза выше среднесетевых). Этой схеме получения первичной информации соответствует согласно рисунку 1.2 вариант 1–2–5–7–10. При этом представлялось возможным наладить сбор данных согласно тому или иному плану испытаний на надёжность.

Однако с появлением системы централизованного пономерного учёта вагонов (ЦПУВ) варианты получения эксплуатационной информации 1–2–5–9 и 1–2–5–7–10 морально устарели.

Первичную информацию о прочностных характеристиках конструкций получают с помощью: стендовых испытаний согласно вариантам 1–3–6–7–11 и 1–3–6–8–11; ударных испытаний на продольные маневровые соударения согласно вариантам 1–3–6–7 и 1–3–6–8. Первичную информацию о нагруженности несущих элементов конструкции в условиях эксплуатационных динамических нагрузок получают с помощью проведения поездных ходовых испытаний согласно вариантам 1–3–5–7–10; 1–3–6–8–10; 1–3–6–7–10.

Однако для получения первичной информации согласно шифрам вариантов, на второй позиции которых стоит тройка, требуются большие затраты средств и времени. К тому же не все интересующие данные можно получить в результате натуральных испытаний.

В этом случае в транспортной науке первичную информацию принято получать с помощью моделирования (как правило, электронного – на ЭВМ) процессов эксплуатации вагонных конструкций согласно варианту 1–4 (Рисунок 1.2). Так, в МИИТе группой сотрудников под руководством В.Н. Котуранова и В.Д. Хусидова разработано множество программных комплексов, моделирующих поведение отдельных узлов, вагона и даже поезда. Их использование позволяет расчётным образом обосновывать признаки перехода элементов конструкции вагонов в предпредельные состояния, по которым принимают решение о необходимости ТР. В результате, используя упомянутые расчётно-обоснованные признаки опасных повреждений и возможности системы ЦУПВ, станет возможным с большей вероятностью прогнозировать аварийные ситуации при эксплуатации вагонов.

Используя рисунок 1.2, в таблице 1.6 сгруппированы возможные варианты получения эксплуатационной информации.

Наиболее перспективны схемы получения эксплуатационной информации двух разновидностей, которые основаны на симбиозе:

- вариантов №1 и №7;
- вариантов №1 и №8.

Вариант №10 может быть использован, с одной стороны, для получения данных о наработках вагонов до появления опасных повреждений. С другой стороны, эта информация незаменима для разработки отраслевой системы мониторинга качества работы осмотрщиков вагонов, а, стало быть, и процесса своевременного обнаружения опасных повреждений вагонов в эксплуатации.

Таблица 1.6 – Варианты сбора первичной информации

№	Шифр варианта	Пояснения	Замечания
1	1–3–5–9	Информация по данным учётных форм типа ВУ	С появлением системы ЦПУВ является перспективным вариантом
2	1–2–5–9	Информация до данным групп надёжности	Варианты морально устарели после появления системы ЦПУВ
3	1–2–5–7–10	Информация по данным групп надёжности относительно вагонов, которые эксплуатируются в замкнутых маршрутах	
4	1–3–6–7–11 1–3–6–8–11	Стендовые испытания несущих элементов конструкции вагонов	-
5	1–3–6–7 1–3–6–8	Ударные испытания вагонов на продольные маневровые соударения	-
6	1–3–5–7–10 1–3–6–8–10 1–3–6–7–10	Ходовые динамические испытания вагонов	Трудно и небезопасно реализовать предельные режимы испытаний
7	1–4	Получение информации на основе моделирования процесса эксплуатации подвижного состава	Имеется возможность моделирования предельных режимов процесса эксплуатации подвижного состава
8	1–3–5–9–12	Получение информации по данным системы ЦПУВ и навигационной космической системы «ГЛОНАСС»	Позволяет получать данные о наработках вагонов до появления опасных повреждений по данным системы ЦПУВ о наработках до их обнаружения.
9	С–1	Симбиоз вариантов: 1 и 7	-
10	С–2	Симбиоз вариантов: 1 и 8	-

С появлением ЭВМ начались работы по внедрению новых информационных технологий в ВХ и выполнялось это с помощью внедрения автоматизированных систем управления (АСУ). Основными задачами АСУ были управление перевозками, экономикой и финансами железных дорог.

Несколько десятилетий разрабатывались и внедрялись элементы и подсистемы АСУ железнодорожного транспорта (АСУЖТ), которая так и не стала действующей системой управления сетевого уровня, т.е. системой управления железнодорожным транспортом в целом [44].

Цель управления отраслью с помощью АСУЖД состояла не просто в том, чтобы автоматизировать операции, минимизировав издержки и влияние человеческого фактора. Главное назначение АСУЖД в том, чтобы вывести процесс функционирования железнодорожного транспорта на некий оптимальный режим, определяемый заранее найденными значениями параметров состояния отрасли, и удерживать его.

К концу прошлого века пришёл новый этап информатизации. Он заключается в том, что начата разработка управляющих автоматизированных систем [33].

Информатизация технологических процессов и структур управления отраслью осуществляется до настоящего времени через информационные системы, который объединены в четыре комплекса.

1) Управление перевозочным процессом - включает задачи информационного сопровождения перемещения грузов, выполнения технологических операций, учёта, отчётности и архивации перевозочных документов. Особая роль этому комплексу отводится при информационно справочном обслуживании компаний-операторов.

2) Управление маркетингом, экономикой и финансами - включает задачи развития отрасли, обеспечивающие стратегическое планирование, техническое перевооружение, реформирование систему управления;

3) Управление инфраструктурой железнодорожного транспорта - включает задачи автоматизации управления эксплуатационной работой и ремонта технических средств, в том числе и объектов вагонного хозяйства;

4) Управление персоналом, социальной сферой и наукой - включает задачи повышения эффективности кадровой и социальной политики, отраслевых научных исследований и разработок.

Большое влияние на развитие информационных систем в ВХ оказала автоматизированная система пономерного учёта, контроля дислокации, регулирования вагонного парка (ДИСПАРК).

Благодаря этой системе:

- имеется возможность получения эксплуатационной информации согласно вариантам 1, 8, С-1, С-2 (Таблица 1.6);

- разработана принципиально новая технология управления парком вагонов.

Все изменения технического состояния вагона (погрузка, выгрузка, сдача в ремонт или в запас и т.п.) фиксируются в памяти ЭВМ.

В настоящее время основу информационной системы для вагонного комплекса, выполняющего техническое обслуживание и ремонт грузовых вагонов, составляет, так называемая, картотека вагонов. Это автоматизированная база данных парка вагонов (АБДПВ), в которой хранится информация о технических характеристиках и особенностях каждого вагона. АБДПВ формируется за счёт учётных форм типа ВУ (Приложение А) и отражает изменение технического состояния вагона.

Кроме того, АБДПВ даёт возможность не допускать в эксплуатацию вагоны с превышенным межремонтным пробегом. АБДПВ позволяет отслеживать исполнение межремонтного норматива по пробегу в километрах. При достижении нормативного пробега в информационной базе выдают признак предупреждения (жёлтый порог), а при истечении пробега запрещения эксплуатации вагона (красный порог). При достижении вагоном жёлтого порога информационная база информирует о необходимости перенаправить его в плановый ремонт. Операция погрузки вагона, достигшего жёлтого и красного порога, запрещается.

Ещё одна информационная система, функционирующая на железнодорожном транспорте, это журнал технического состояния вагонов (ЖТСВ). Он представляет собой централизованную информационную базу данных о случаях перевода вагонов в нерабочий парк, с указанием их причин по каждому вагону. В её основе положен сбор, обработка и хранение информации в объёме вагонной учётной формы ВУ-23 (электронная версия ВУ-23М). К таким

причинам относятся обнаруженные неисправности, требующие ремонта на специализированных ремонтных путях, либо необходимость проведения планового ремонта.

Ещё одним важным элементом сетевой информационной системы является система автоматической идентификации подвижного состава (САИПС), которая совместно с системой (ДИСПАРК) определяет положение вагона на сети железных дорог в реальном времени. Система САИПС представляет собой бортовые идентификационные датчики и стационарные напольные устройства, считывающие информацию о номере проходящего мимо них вагона. Информация о вагоне заносится в компьютеры через автоматизированные рабочие места операторов, диспетчеров и т.д. на уровне линейных предприятий железных дорог (Рисунок 1.3). Затем по каналам связи в режиме реального времени информация передаётся на более высокий уровень – в информационно-вычислительные центры (ИВЦ) соответствующих дорог. Из ИВЦ каждой дороги информация поступает в режиме реального времени в главный вычислительный центр (ГВЦ), который поступившую информацию представляет в качестве услуг клиентуре.

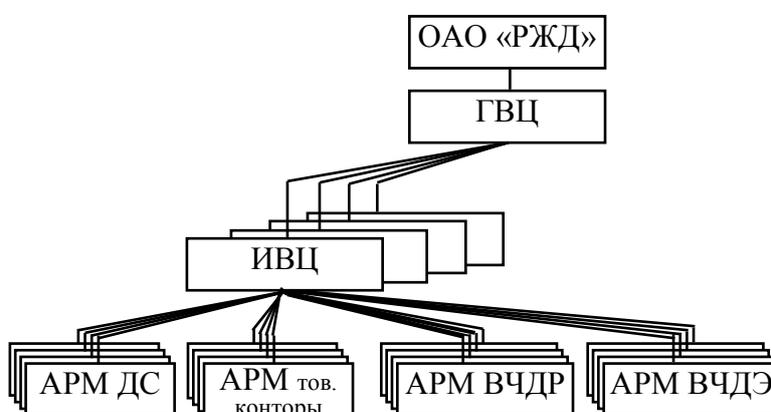


Рисунок 1.3 – Структура системы централизованного учёта грузовых вагонов

На линейном предприятии необходимая информация о вагоне вводится в базу через автоматизированное рабочее место (АРМ) либо вручную, либо автоматически. АРМ упрощает ведение стандартных форм отчётности, автоматически согласует информацию в этих формах. Для предприятий, не имеющих АРМов, предусмотрен ручной ввод информации с персонального

компьютера по выписанным формам (заполненным учётным формам). АРМы линейных предприятий связаны с ИВЦ соответствующей дороги, а также между собой в пределах станции.

После получения информации в ИВЦ дороги производится проверка и предварительная обработка информации. Затем полученная информация передаётся в ГВЦ, где она тщательно анализируется, предварительно контролируется и заносится в соответствующую автоматизированную базу данных учёта вагонов.

Информация о техническом состоянии грузового вагона накапливается, группируется по специальным программам и подаётся в требуемом виде для администрации ОАО «РЖД» согласно разработанным правилам.

Для функционирования системы централизованного учёта грузовых вагонов разработан и утверждён порядок документального оформления операций с вагонами:

- поступление новых вагонов;
- исключение вагонов из инвентаря;
- передача (продажа), приём (покупка) грузовых вагонов;
- ремонт и модернизация вагонов.

Для каждой операции разработаны правила передачи, обработки, хранения информации, автоматизированы формы передачи данных о вагоне.

Для совершенствования системы интеллектуального управления ВХ необходимы как минимум следующие мероприятия:

1) Организация централизованного пономерного учёта составных частей вагонов, имеющих клеймо или номер, а также сбор информации о фактических затратах на ТР, ДР и КР каждого вагона в отдельности (согласно формам ВУ-22 и ВУ-36).

2) Создание централизованной базы данных об отбракованных по результатам дефектоскопии составных частей вагонов в рамках ДР и КР.

3) Расчётное обоснование признаков предпредельного состояния ответственных составных частей вагонов, по которым их отцепляют в ТР и отбраковывают по результатам дефектоскопии в рамках плановых ремонтов.

4) Разработка технологии производства эксплуатационных данных своевременного выявления опасных повреждений вагонов в эксплуатации.

5) Создание в рамках ОАО «РЖД» независимой структуры, единственной функцией которой являлось бы своевременное обеспечение потребителей первичной эксплуатационной информации требуемого уровня качества и подачи последней в компьютерную сеть отрасли.

1.4 Анализ технического состояния основных элементов конструкции грузовых вагонов

Обеспечение безопасности движения поездов является одной из главных задач вагонного хозяйства, которое во многом зависит от системы ТОиР вагонов. Функционирование системы ТОиР влияет не только на уровень безопасности движения, но и определяет остаточный ресурс узлов и деталей конструкции.

Анализ неисправностей основных узлов и деталей, из-за которых вагоны поступают в ТОР, позволяет точнее наметить пути сокращения числа случаев отказов вагонов по вине ВХ в период гарантийного срока после ДР и КР, определить необходимые меры по улучшению системы ТОиР вагона, повышению безопасности движения поездов.

Так, например, по данным [74] за три месяца 2014 г. в текущий отцепочный ремонт поступило 305440 вагонов приписки России, что на 15026 вагонов или на 5,17 % больше, чем за тот же период 2013 г. Из них на дорогах России отцеплено 290887 вагонов, что больше, чем в 2013 г. на 12981 вагон или на 4,67 % (в 2013 г. – 277906 вагонов). На дорогах стран СНГ, Литвы, Латвии, Эстонии и Грузии отцеплено 14553 вагона приписки России, что на 2045 вагонов или 16,35 % больше, чем за такой же период 2013 г.

К основным причинам отцепок в ТР грузовых вагонов можно отнести:

- выполнение маневровых работ с повышенными скоростями и нарушение режимов движения;
- повышение интенсивности использования вагонов;
- интенсивное введение погрузочно-разгрузочных работ и нарушение правил погрузки и выгрузки грузов;
- применение конструкционных материалов с недостаточной коррозионной устойчивостью;
- действие влаги в сочетании с химически активными компонентами грузов;
- естественная деградация технического состояния при действии статических и динамических нагрузок;

- нарушение технологического процесса ремонта;
- низкое качество литых деталей;
- нарушение технологии изготовления некоторых ответственных деталей.

Конструкция грузового вагона представляет с собой систему, состоящую из множества узлов и деталей, которые подвергаются нагрузкам различного уровня и характера. При этом в процессе эксплуатации в материале детали постепенно накапливаются усталостные повреждения, которые могут привести к внезапным отказам с причинением ущерба людям, окружающей среде и самим вагонам.

Так, например, в за первый квартал 2014 г. по опасным трещинам основных элементов конструкции вагонов было отцеплено в ТР 6657 вагонов (Рисунок 1.4) [74]. Среди основных причин, из-за которых оцеплялись вагоны – трещины колёсной пары и отколы колеса, трещины или изломы боковины (рамы) тележки, трещины или изломы надрессорной балки, трещины в корпусе автосцепки, трещины и изломы поддерживающей планки тягового хомута, неисправности поглощающего аппарата, трещины пятника.

При этом в настоящее время на вагоноремонтных предприятиях постоянно внедряются различные технические комплексы для выявления опасных дефектов, однако количество отцепок вагонов в период срока гарантии ДР по различным отказам не снижается, а даже растёт.

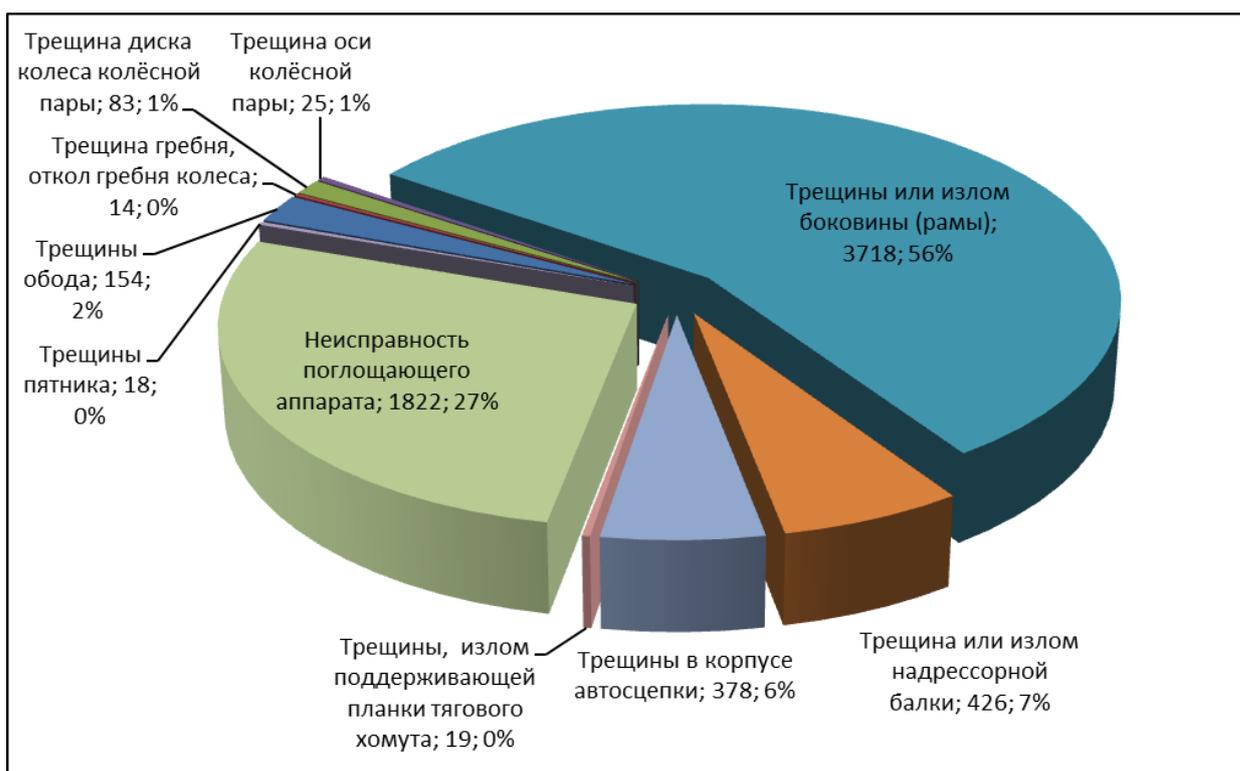


Рисунок 1.4 – Отцепки в ТОП грузовых вагонов за первый квартал 2014 г. приписки России

Кроме того, из-за неисправностей основных элементов вагонов в вагоноремонтных предприятиях наблюдается дефицит запасных частей при проведении ремонта, в первую очередь это связано с нехваткой крупного вагонного литья. Это оказывает большое влияние на длительность простоя вагона в неисправном состоянии. Поэтому в условиях дефицита основных элементов вагонов, значительного роста цен на новые узлы и детали, операторы и собственники подвижного состава не готовы приобретать новые запасные части и стремятся использовать при ремонте собственные.

По итогам работы в 2014 г. работниками ПТО было выявлено 16550 дефектных боковых рам, 1987 надрессорных балок, 1444 колёсные пары с трещинами в ободке и диске колеса и 39 колёсных пар с трещинами в средней части оси [68].

В 2014 г. отцепки по неисправностям боковых рам увеличились на 4,3 % по сравнению с предшествующим годом. Необходимо отметить, что боковая рама относится к основным элементам конструкции грузового вагона, любой

возникший дефект потенциально опасен и может привести к аварии или крушению. Все дефекты боковых рам можно разбить на две группы: дефекты усталостного происхождения и износы трущихся поверхностей.

Характерное расположение этих дефектов представлено на рисунке 1.5.

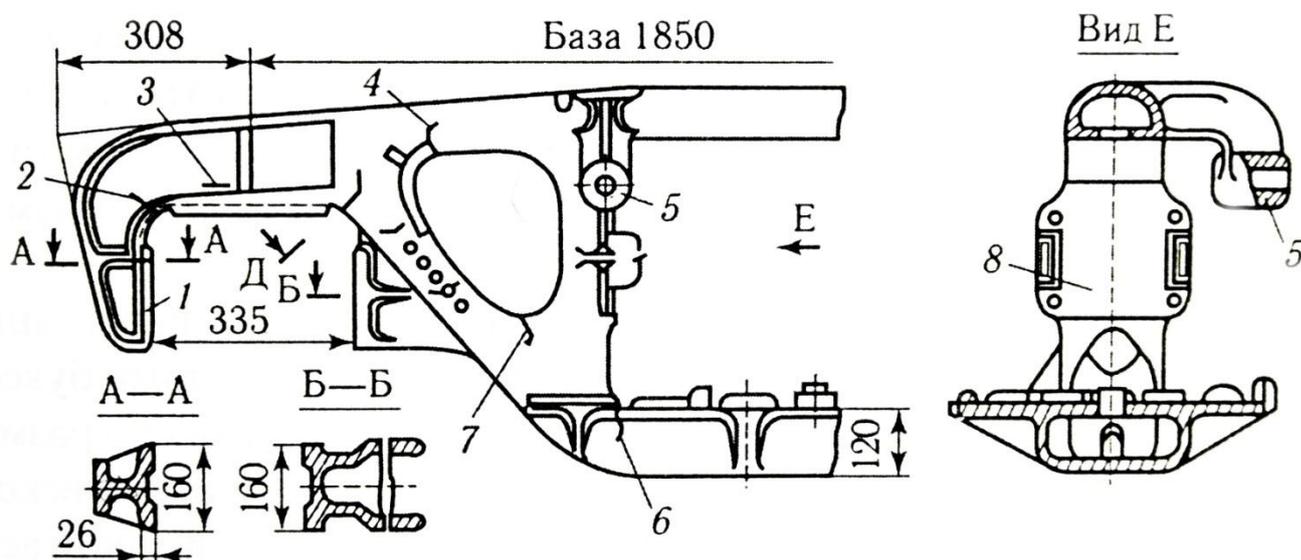


Рисунок 1.5 – Дефекты боковых рам

Продольные трещины 3 в зонах сопряжения надбуксовой полки с вертикальной стенкой двутавра образуются в основном из-за наличия скрытых дефектов литейного происхождения – рыхлостей, усадочных раковин.

Трещины 2, 4, 7 носят усталостный характер. Трещины 2 зарождаются в углах буксового проёма. Причём, если на внешний угол приходится 46 % всех усталостных разрушений, то на внутренний угол буксового проёма приходится уже 34 % всех трещин по раме [46]. Любой угол является зоной концентрации напряжений, они трудны для качественной формовки и заливки при изготовлении боковых рам и с учётом того, что зона буксового проёма неподдрессоренной боковой рамы является наиболее нагруженной зоной рамы, поэтому здесь и возникают наиболее часто усталостные разрушения. Кроме того, причиной образования трещин в зоне наружного угла буксового проёма могут быть продольные силы, возникающие при торможении вагона горочными замедлителями и при соударении вагонов с повышенными скоростями. Трещины 2, 4, 7 являются поперечными трещинами, которые угрожают безопасности

движения поездов и поэтому боковые рамы с такими дефектами не восстанавливаются, а подлежат браковке.

В соответствии со статистическими данными с 2006 г. число изломов боковых рам резко увеличилось, что приводило к росту количества нарушений безопасности движения поездов (Рисунок 1.6 и 1.7). Большая часть изломов приходилась на боковины нового изготовления с опорной частью коробчатого сечения [15]. В 2013 г. количество изломов достигло 38 случаев (пиковое количество за всю историю), что приводило к сходам, крушениям и повлекли за собой человеческие жертвы. Качество литых деталей с каждым годом ухудшается, что подтверждается приведённой статистикой Организации производителей железнодорожной техники (Рисунок 1.7) [13] по изломам боковин тележек грузовых вагонов (Рисунок 1.6 и 1.7).

Согласно приведённой статистике, на отечественных железных дорогах зафиксировано 170 случаев изломов боковин. Причины изломов известны в совокупности всем сторонам, причастным к созданию, эксплуатации и ремонту тележек. Наибольшее количество изломов происходит в зимнее время – при отрицательных температурах, причём эта тенденция сохраняется и в последние годы. Происходящие изломы боковых рам тележек грузовых вагонов происходят в период гарантийной ответственности предприятий, выполнявших ДР или КР.

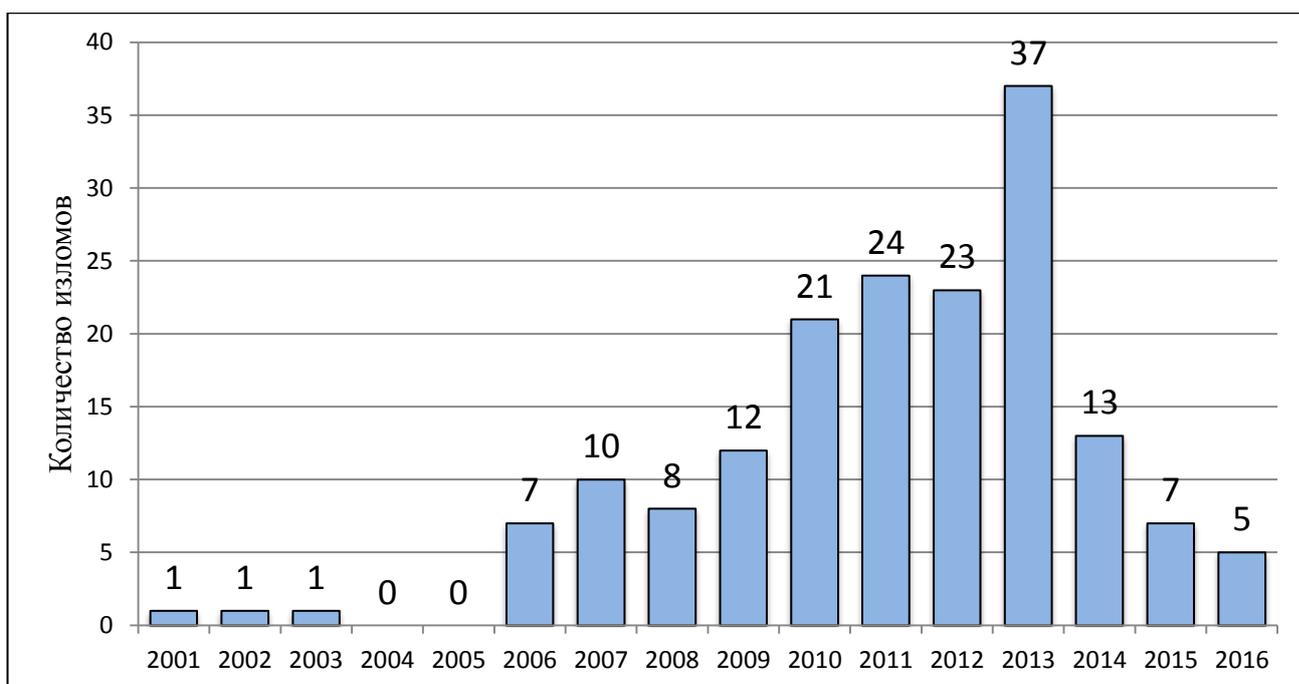


Рисунок 1.6 – Количество изломов литых деталей тележки грузовых вагонов за период 2001 - 2016 г.

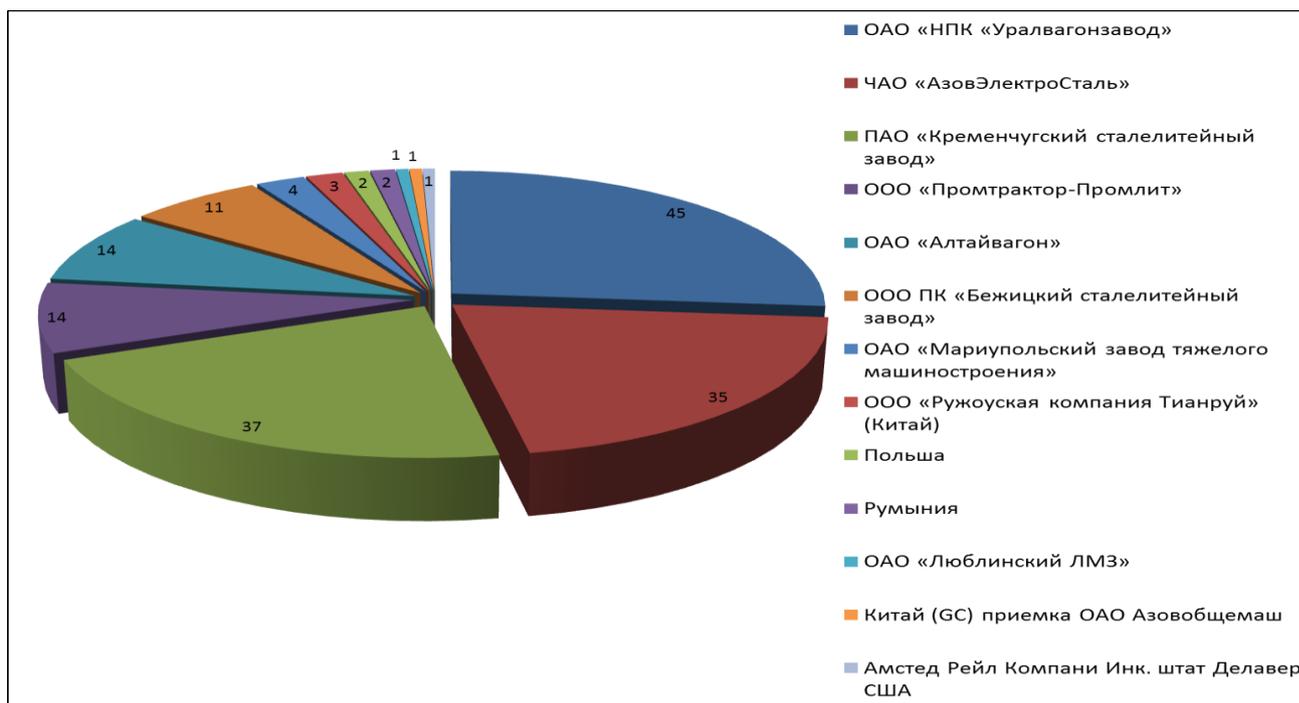


Рисунок 1.7 – Статистика разрушений по заводам изготовителям в период 2001-2016 г.

Важную роль для выявления неисправностей боковых рам играет неразрушающий контроль при плановых видах ремонта. Дефектоскопирование

является единственной технологической операцией, позволяющей выявить опасные повреждения и дефекты с большой вероятностью.

Из 19295 боковых рам проверенных в 2014 г. в результате неразрушающего контроля забраковано 17343 (Рисунок 1.8) [68].

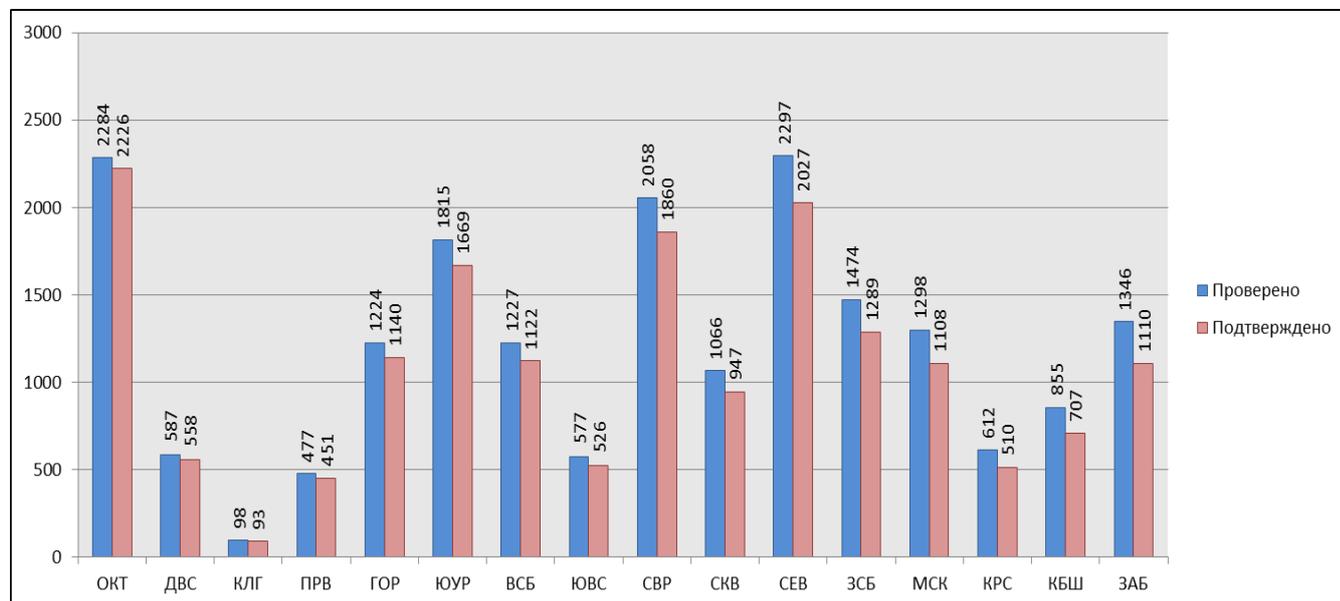


Рисунок 1.8 – Количество проверенных и подтверждённых неисправных боковых рам тележки грузового вагона

Необходимо отметить, что в существующей нормативной технической документации не регламентированы предельные значения трещин боковых рам, по которым следует отцеплять вагоны в ремонт. Аналогичная ситуация существует и по предельным износам некоторых ответственных деталей вагона.

Таким образом, можно отметить, что сроки гарантийной ответственности предприятий, выполняющих ДР и КР, и периодичности проведения ремонтов крупного объёма не согласованы и не имеют расчётного обоснования. Поэтому в настоящее время требуется разработка методики расчётного обоснования периодичности контроля технического состояния грузового вагона с учётом фактического состояния его деталей и их остаточного ресурса.

1.5 Обзор исследований посвящённых оценке остаточного срока службы изделий в машиностроении и на железнодорожном транспорте

В процессе эксплуатации вагона на детали и узлы воздействует большое количество различных факторов, определяющих процесс старения и приводящих к потере работоспособности. Для вагона важно оценивать остаточный ресурс деталей и узлов до их перехода в предельное состояние и на этой основе назначать сроки очередного контроля технического состояния или глубокой диагностики.

В настоящее время в различных отраслях выполнено большое количество исследований, посвящённых проблеме оценки остаточного ресурса деталей, и предложены различные методы и подходы для его обоснования. Определимся для начала с понятием остаточного срока службы детали.

Остаточный срок службы детали – это один из наиболее важных показателей в теории надёжности, характеризующий долговечность конструкции. Это период времени, от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние, т.е. период, в течение которого объект может эксплуатироваться. Предельное состояние – это состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление работоспособного состояния невозможно [20].

Остановимся на наиболее характерных исследованиях по рассматриваемой тематике.

Так в работе [24] проведён анализ современных методов оценки остаточного ресурса изделий машиностроения. Авторы приводят различные подходы к трактовке остаточного ресурса. Согласно работе остаточный ресурс изделия можно оценивать несколькими методами:

- параметрическими на основе неразрушающего контроля;
- оценки ресурса по индивидуальным кривым усталости;
- оценки ресурса с использованием диффузионного распределения;
- анализа временных рядов;

- вероятностными.

Большой интерес заслуживает работа [55] методика оценки эксплуатационного ресурса с помощью портативного рентгеновского дифрактометра. Первые такие приборы появились в России в начале 90-х годов прошлого века, но большого распространения они не получили в силу экономических причин. Данный прибор позволяет оценивать напряжённо-деформированное состояние многих реальных объектов техники на этапе их изготовления и эксплуатации.

Прибор состоит из трёх частей: гониометра с излучателем и детектором, блока управления, персонального компьютера типа Notebook. Этот прибор обеспечивает возможность определения остаточных и действующих напряжений в деталях и конструкциях различного назначения при их изготовлении, эксплуатации и ремонте.

Метод оценки остаточного ресурса деталей с любым уровнем остаточных сжимающих и растягивающих напряжений, заключается в том, что прибором рентгеновской дифрактометрии определяют остаточные напряжения в два контрольных этапа, фиксируя их в выбранных зонах на поверхности металлической детали, включая все наиболее нагружаемые в процессе эксплуатации области металлической детали. Первый контрольный этап осуществляют при наработке, равной 0-0,9 от проектного ресурса, а наработку между контрольными этапами выдерживают не менее 0,05 от проектного ресурса детали. Для каждой выбранной зоны определяют эксплуатационную скорость изменения остаточных напряжений, после чего определяют максимальную из полученных для выбранных зон эксплуатационную скорость изменения остаточных напряжений, по которой проводят определение назначенного ресурса, а остаточный ресурс определяют как разность между назначенным ресурсом и наработкой до второго контрольного этапа определения остаточных напряжений. Её эффективность показана в работе [31] на примере расчёта остаточного ресурса авиационных деталей. В основном авторы предлагают оценивать остаточной ресурс изделия с помощью применения специальных диагностических средств,

использование которых предполагает высокую доступность к контролю максимально нагруженных наиболее ответственных деталей.

Более традиционный метод рассмотрен в работе [47, 48]. Всеми железнодорожными администрациями, входящими в состав стран СНГ, в 2005 г. утверждена «Методика продления срока службы литых деталей Акустическим эмиссионным методом (АЭ) № 682-2005 ПКБ ЦВ». Суть метода заключается в определении степени опасности дефектов за счёт возможности выявления дефектов, развивающихся в процессе нагружения, расширения числа диагностируемых параметров, повышения чувствительности, паспортизации текущего состояния каждой детали и сравнении его с предыдущим состоянием при последнем обследовании.

Техническое освидетельствование и продление срока службы боковых рам и надрессорных балок выполняется следующим образом: на первом этапе испытаний производится визуально-измерительный контроль, по результатам которого выбраковываются литые детали с явными дефектами, далее следует вихретоковый и магнитные методы исследований (феррозондовый и магнитопорошковый) в определённых зонах (технологические окна, буксовый проём и др.). При выявлении дефектов любым методом деталь также выбраковывается. Детали, не забракованные по результатам электромагнитных методов, поступают на операцию АЭ контроля.

В методах неразрушающего контроля, таких как ультразвуковой, магнитный и вихретоковый, главным браковочным критерием является амплитудный признак, связанный корреляционной зависимостью с размером дефекта. Однако указанная характеристика не позволяет оценить динамику развития дефекта и степень его опасности. Получить какие-либо дополнительные критерии браковки по влиянию дефекта на эксплуатационные свойства в рамках применяемых методов неразрушающего контроля не представляется возможным.

В работах [60, 73] рассмотрен подход к оценке остаточного ресурса узлов и деталей, основанный на прогнозировании скорости развития трещин и оценке живучести материала. Суть метода заключается в определении трещин и

наблюдении за их развитием, с помощью неразрушающего контроля (визуального и капиллярного), магнитного (магнитопорошкового, вихретокового, феррозондового контроля) и акустической эмиссии. Как отмечают авторы, деталь вагона целесообразно диагностировать на первом этапе жизненного цикла. Для каждой детали следует определить геометрические параметры трещины, гарантирующие необходимое время эксплуатации детали (например: до следующего технического контроля). Эти предельные параметры определяются на основе эксперимента и являются нормируемыми для эксплуатационной диагностики. С момента обнаружения трещины с критическими (допустимыми) параметрами деталь может прослужить гарантированный минимальный период без разрушения до её замены. Оценка длительности этого периода определяется на основе анализа скорости развития трещин и оценки живучести материала. Этот подход можно реализовать при обосновании предельных размеров трещин деталей вагонных конструкций.

В работах [2, 77] решается задача оценка фактического технического состояния и оценки (прогнозирования) остаточного ресурса изделий, когда отсутствуют отказы, но могут быть измерены какие-либо параметры детали в процессе эксплуатации (испытаний) с помощью диагностических средств.

Процесс прогнозирования остаточного ресурса предусматривает выполнение следующих этапов:

- оценку технического состояния объекта с помощью диагностического и контрольно-измерительного оборудования;
- разработку аналитического уравнения, описывающего закономерности изменения этого состояния во времени или по наработке;
- экстраполяцию полученного уравнения и определение остаточного ресурса или сроков выполнения очередного контроля технического состояния.

Определение остаточного ресурса объекта осуществляется сравнением текущих на момент прогнозирования значений диагностических параметров с их предельными или допустимыми нормативами.

Сам подход заключается в следующем. Как известно, для постепенных отказов изменение параметра технического состояния конкретного изделия аналитически достаточно хорошо описывается линейным уравнением (1.1) и степенной функцией (1.2), графически представленной на рисунке 1.9:

- линейным уравнением:

$$X(t) = X_0 + \gamma t; \quad (1.1)$$

- степенной функцией:

$$X(t) = X_0 + ct^n, \quad (1.2)$$

где X_0 – начальное значение определяющего параметра; γ – скорость изменения параметра; c и n – параметры изменения технического состояния.

При линейной функции остаточный ресурс τ (после диагностики) при известном значении γ оценивается выражением 1.3:

$$\tau = \frac{X_{np} + X_k}{\gamma} = \frac{X_{np} - (X_0 + \gamma T_k)}{\gamma}, \quad (1.3)$$

где T_k – наработка в момент контроля определяющих параметров; X_{np} – величина предельного износа определяется по условию прочности детали.

Величина предельного износа X_{np} определяется по условию прочности детали, требованием нормативно-технической документации или исходя из требования безопасности. Графическая интерпретация приведена на рисунке 1.9, а).

Однако в некоторых случаях линейная функция можно считать грубым приближением к описанию реальных процессов. В более общей форме деградационные процессы старения и износы описываются полиномиальной (степенной функцией) зависимостью 1.4, графически представлено на рисунке 1.9, б):

$$X(t) = X_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_n t^n. \quad (1.4)$$

В этом случае оценка остаточного ресурса при известных значениях коэффициентов c , c_n и n производится решением уравнения при $X = X_{np}$.

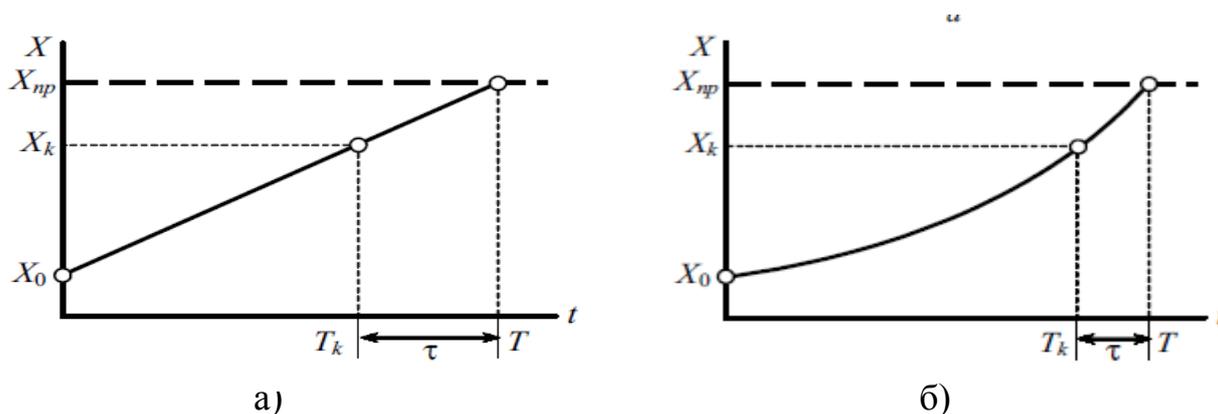


Рисунок 1.9 – Схема определения остаточного ресурса по определяющим параметрам

- а) графическая интерпретация оценки остаточного ресурса по линейной функции;
 б) графическая интерпретация оценки остаточного ресурса по степенной функции.

Данный подход ориентирован на анализ фактического состояния изделия и прогнозирование его изменения при последующей эксплуатации. Остаточный ресурс, в этом случае не зависит от наработки изделия, а зависит от скорости изменения параметров. Также он не зависит от воздействия случайных эксплуатационных нагрузок и случайных изменений в материале изделий [53].

Большое внимание заслуживают работы [41, 70], в которых оценивают остаточный ресурс боковой рамы тележки грузового вагона. В работах остаточный ресурс оценивают по критерию многоцикловой и малоцикловой усталости. Расчёт производится методами на основе гипотезы линейного суммирования и механики разрушений.

Работы, связанные с методикой разработанной ГосНИИВом [49]. Предложенная ГосНИИВом, методика определения срока службы детали T и остаточного ресурса ΔT основана на построении детерминированной зависимости срока службы натурной детали и количества циклов наработки N при усталостных стендовых испытаниях детали, бывшей в эксплуатации в течение T лет.

Остаточный ресурс определяют по формуле 1.5:

$$\Delta T = (T - T_1) = T_1 \frac{N_1}{N_0 - N_1}, \quad (1.5)$$

где T и N_0 – соответственно полный срок службы и число циклов при испытаниях новой детали (в состоянии поставки); T_1 и N_1 – соответственно срок эксплуатации натурной детали до испытаний и число циклов, которое она выдержала при усталостных испытаниях. Основным преимуществом такого подхода является простота, т.е. не требуют больших вычислительных действий.

Аналогичный метод приведён в работе [23]. В этой работе изложены методики определения остаточного ресурса ходовых частей подвижного состава на базе стендовых испытаний малого количества деталей с различным сроком эксплуатации, разработанные в ГосНИИВе, ВНИИЖТе и ГП «УкрНИИВ». На основании сравнительного анализа этих методик показаны их достоинства и недостатки.

Недостатком по критерию многоциклового и малоциклового усталости является то, что необходимо иметь точные данные о нагруженности в циклах, в условиях реальной эксплуатации. Однако в процессе эксплуатации такая информация не собирается. В случае фактического превышения наработки детали в циклах, этот факт ничем не подтвердить. При проведении стендовых испытаний объекта невозможно реализовать все те нагрузки, которые действуют в реальных условиях эксплуатации.

В настоящее время большое количество работ по оценке остаточного ресурса деталей основано на вероятностных методах. Остаточный ресурс является случайной величиной, которая зависит от множества факторов, поэтому может быть описана только вероятностными моделями. В качестве такой модели обычно используется плотность распределения наработок изделия до предельного состояния. Поскольку приведённые методики расчёта остаточного ресурса не дают точной даты наступления предельного состояния, выбор критерия расчёта зависит от квалификации специалиста. Так как данные, собранные для расчёта порой недостоверны, на всех этапах присутствует человеческий фактор, то наиболее подходящим следует считать термин «средний остаточный ресурс» или «ожидаемый остаточный ресурс».

Вероятностные методы более приемлемы в случае, когда отказ может привести к существенным экономическим потерям и возникновению аварийной ситуации. При этом остаточный ресурс оценивается исходя из заданной вероятности отказа элемента конструкции.

Развитию вероятностных методов оценки остаточного ресурса посвящены работы Болотин В.В., Серенсен С.В., Стрельникова В.П., Садыхов Г.С. [1, 4, 5, 67, 71, 72, 76,78] и др.

Одним из новых методов предложенным Стрельниковым В.П. является методика оценки остаточного ресурса с применением функции диффузионного распределения. Как отмечает автор, если известна первоначальная функция распределения ресурса изделий $F(t)$ (или плотность распределения ресурса $f(t)$), то можно определить выражение для характеристики остаточного ресурса.

Плотность диффузионно-монотонного (DM) распределения:

$$f(t) = \frac{t + \mu}{2vt\sqrt{2\pi\mu t}} \cdot \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2v^2\mu t}\right], \quad (1.6)$$

где μ – параметр масштаба, совпадающий со значением медианы распределения;
 v – параметр формы, совпадающий с коэффициентом вариации распределения.

Функция диффузионного распределения:

$$F(t) = DM(t, \mu, v) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{v\sqrt{\mu t}}\right). \quad (1.7)$$

Выражение для вероятности безотказной работы $R(t)$ определяется из следующих соотношений:

$$R(t) = 1 - DM(t, \mu, v) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{v\sqrt{\mu t}}\right). \quad (1.8)$$

Используя известное выражение плотности распределения остаточной наработки, получаем математическое ожидание остаточного ресурса 1.9:

$$X(\tau) = \frac{\left[\mu(1 + \frac{v^2}{2}) - \tau \right] \Phi\left(\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu t}}\right) + \frac{\mu v^2}{2} e^{2v^2} \Phi\left(-\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu t}}\right) + \frac{v\sqrt{\mu\tau}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\mu - \tau)^2}{2t^2 \mu t}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu t}}\right)}. \quad (1.9)$$

В работах [3, 75] предложены методы решения задачи о прогнозировании остаточного ресурса по статистической информации об отказах и по расчётным моделям накопления повреждений.

В работе [51] рассматривается вероятностная оценка остаточного технического ресурса узлов трения и износа, модели изменения определяющих параметров изделий машиностроения. Представлены результаты вероятностно-статистической оценки предельного износа стенок шарового резервуара в условиях коррозионного износа.

В работе [40] показано, что в процессе эксплуатации под воздействием повышенных знакопеременных нагрузок происходит изменение физико-механических свойств металлов, которое приводит к снижению ударной вязкости. Предлагается подход для оценки остаточного ресурса основных деталей и узлов грузовых вагонов железнодорожного транспорта на основе изучения структурных изменений металлов в процессе их эксплуатации. На основе контроля структурных изменений в процессе эксплуатации конструкции может быть создана система оценки остаточного ресурса.

Приведённый обзор не рассматривает всех исследований этой тематике. Анализ работ показывает, что возможно несколько подходов к решению поставленной диссертационной задачи.

Отметим, что результат большинство работ, не используются в практике. Это связано с трудностью применения. В большинстве случаев, неизвестной остаётся точность оценки остаточного ресурса изделий. Значительная часть методик по оценке остаточного ресурса деталей не нашли отражения в технических документах (стандартах).

2 Методика прогнозирования остаточного срока службы детали на основе статистических данных об их отказах

2.1 Методологическая основа задачи оценки остаточного ресурса детали

Как отмечено ранее, наиболее часто к крушениям и сходам подвижного состава на железнодорожном транспорте приводят трещины и изломы основных несущих деталей вагонов, например надрессорной балки и боковой рамы тележки. Причины этого не только в недостаточном качестве изготовления деталей, нарушении технологии изготовления, недостаточной надёжности, но и в низкой контролепригодности этих отказов при техническом обслуживании вагонов на ПТО. В настоящее время для осматривщиков вагонов на ПТО не разработаны переносные средства диагностики, позволяющие на ранней стадии выявлять образовавшиеся в деталях трещины.

Однако с большой вероятностью такие отказы можно выявить в стационарных условиях вагонных ремонтных депо. Поэтому ответственность за безопасное движение вагонов необходимо перераспределять между вагоноремонтными компаниями и эксплуатационными депо. Для этого потребуется уточнить периодичность проведения глубоких диагностик вагона в стационарных условиях депо для выявления таких отказов.

Поскольку такие детали имеют низкую контролепригодность в условиях использования вагона по назначению, а их опасные отказы часто имеют внезапный характер, то для прогнозирования их возникновения невозможно использовать модели, основанные на многократных измерениях контрольных параметров и оценке скорости приближения к неработоспособному состоянию. Поэтому для их прогнозирования требуется использовать вероятностные модели теории надёжности. Задача состоит в том, чтобы оценить остаточный ресурс детали, которая безотказно проработала некоторый период времени и учитывать

его при обосновании периода до очередного ремонта крупного объёма или глубокой диагностики вагона.

Рассмотрим методологическую основу задачи оценки остаточного ресурса детали. Введём в рассмотрение случайную величину ξ_t – остаточный срок службы детали заданного вида (например, боковины тележки грузового вагона) при условии, что она отработала безотказно в течение времени t , т.е.

$$\xi_t = \xi - t, \text{ при условии } \xi > t, \quad (2.1)$$

где ξ – случайная величина, под которой понимается наработка детали до опасного отказа.

Выпишем выражение для вероятности события $\{\xi_t \geq x\}$, состоящего в том, что остаточный срок службы детали будет не меньше времени x .

С учётом (2.1) вероятность этого события можем записать:

$$P\{\xi_t \geq x\} = \left\{ \frac{P(\xi - t > x)}{P(\xi > t)} \right\} = \dots, \quad (2.2)$$

Воспользовавшись теоремой умножения вероятностей в случае двух зависимых событий, а именно:

$$P\{A \cdot B\} = P\{A\} \cdot P\{B/A\}, \quad (2.3)$$

где $B = P(\xi - t > x)$, $A = P(\xi > t)$,

можем записать:

$$P\{A/B\} = \frac{P\{A \cdot B\}}{P\{A\}}, \quad (2.4)$$

продолжим цепочку равенств:

$$\dots = \frac{P\{(\xi \geq t + x) \cdot (\xi > t)\}}{P\{\xi > t\}} = \dots,$$

Как известно, под произведением двух событий A и B понимается событие, состоящее в том, что происходят оба эти события. При этом заметим, что если

выполняется событие $\{\xi > t+x\}$, то и подавно справедливо событие $\{\xi > t\}$. Тогда можем продолжить цепочку равенства следующим образом:

$$\dots = \frac{P\{\xi \geq t+x\}}{P\{\xi > t\}} = \frac{\bar{F}(t+x)}{\bar{F}(t)}, \quad (2.5)$$

где $\bar{F}(t)$ – функция надёжности – вероятность безотказной работы детали в течение времени t ; $\bar{F}(t+x)$ – вероятность безотказной работы детали в течение времени $(t+x)$. Для их получения потребуется статистическая информация об отказах этих деталей в эксплуатации.

Таким образом, получена формула (2.6) для определения вероятности события, состоящего в том, что за остаточный срок службы деталь не откажет в течение требуемого периода времени x при условии, что она использовалась по назначению и безотказно проработала до момента t :

$$P\{\xi_t \geq x\} = \frac{\bar{F}(t+x)}{\bar{F}(t)}. \quad (2.6)$$

Для оценки остаточного ресурса детали, проработавшей некоторый период времени t необходимо решить обратную задачу. Найти такое значение срока службы детали x , в течение которого опасный отказ не возникнет с требуемой вероятностью (или допустимым уровнем риска). Решение этой задачи становится возможным при получении функции вероятности безотказной работы. Стоит отметить, что рассматриваемый опасный отказ (трещина) является ресурсным отказом детали, после которого восстановление её работоспособности невозможно или нецелесообразно. Поэтому функция надёжности – это математическая модель отказа неремонтируемых изделий, которую получают на основе статистической информации об отказах этих деталей в эксплуатации.

Знание остаточного срока службы позволит использовать следующий принцип при выполнении ремонтов различного вида – не допускать эксплуатацию деталей, для которых остаточный срок службы меньше гарантийного периода (например, между глубокими диагностиками). Также с помощью оценки остаточного срока службы детали можно назначать срок проведения очередной

глубокой диагностики или планового ремонта вагона. Стоит отметить, что приведённый алгоритм позволяет решать задачу как относительно календарных наработок (остаточного срока службы), так и километровых и даже тонно-километровых наработок, что более предпочтительно при обосновании системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов [89].

Для практического использования методики требуется определиться с видом вероятностной функцией надёжности, и получить её аналитическое выражение. Как было показано выше, при организации системы технического обслуживания и ремонта прогнозировать остаточный ресурс требуется, прежде всего, для деталей непосредственно влияющих на безопасность движения, поэтому требуется обосновать перечень деталей и узлов грузового вагона, ответственных за безопасность движения.

Как показано в [87], основными признаками предпредельного состояния таких деталей являются в основном трещины, которые носят усталостный характер, т.е. имеются в виду хрупкие разрушения, которые могут немедленно привести к сходу вагона с рельсов.

2.2 Основные элементы конструкции грузового вагона, влияющие на безопасность движения поездов

Конструкция современных грузовых вагонов, состоит из множества отдельных узлов и деталей. Каждая из них должна безотказно функционировать в течение определённого промежутка времени, что зависит от заложенного ресурса.

В конструкции грузового вагона можем выделить следующие группы элементов:

1) Элементы, отказы которых не влияют на работоспособность вагона в целом;

2) Элементы, работоспособность которых за рассматриваемый промежуток времени практически не изменяется;

3) Элементы, отказы которых за рассматриваемый период времени может привести к отказу вагона;

4) Элементы, контроль технического состояния, ремонт и техническое обслуживание которых возможен, не прерывая процесс использования вагона по назначению;

5) Элементы, с ограниченной контролепригодностью, отказы которых могут немедленно привести к крушению поезда.

Именно детали последней группы должны в первую очередь определять такое свойство грузового вагона, как его безопасность. Ограниченная или низкая контролепригодность отдельных элементов вагонных конструкций существенно усложняет работу осмотрщиков вагонов на ПТО. Поскольку они не вооружены соответствующими техническими средствами обнаружения признаков опасных отказов, а полагаются на свой опыт, интуицию и органолептические методы обнаружения отказа (слух, зрение, осязание и т.п.), но при этом несут ответственность за безаварийное проследование вагона в составе поезда на гарантийном участке.

Определить отказы деталей конструкции грузового вагона, влияющих на безопасность движения, для которых в первую очередь необходимо оценивать

остаточный ресурс, позволяет модель аварийности вагона в виде дерева событий, представленная в работе [11]. В качестве вершинного события T рассмотрен сход вагона с рельсов. Модель аварийности позволяет реализовать логическое сведение отказа системы (события T) к отказам её элементов (они на рисунке. 2.1. для удобства анализа пронумерованы от 1 до 19).

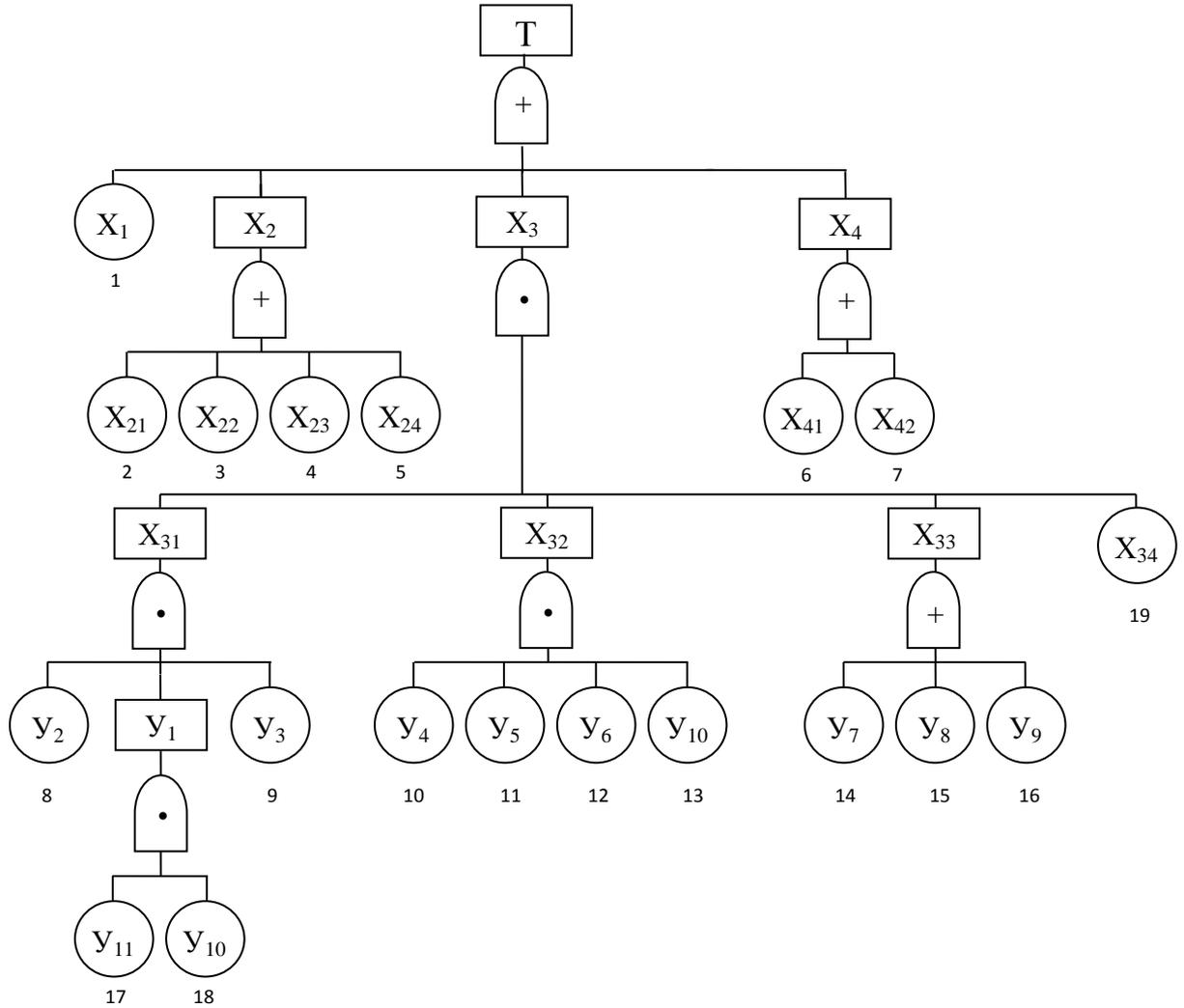


Рисунок 2.1 – Древоидная модель аварийности вагона

На рисунке 2.1 символом \oplus обозначен оператор «ИЛИ», а обозначение \odot соответствует оператору «И», событие X_1 – разрушение колеса, X_2 – обрыв и падение деталей на путь, X_3 – вкатывание гребня колеса на головку рельса, X_4 – разрушение шейки оси, X_{21} – разрушение боковины тележки, X_{22} – разрушение надрессорной балки, X_{23} – разрушение деталей ударно-тягового механизма, X_{24} – разрушение деталей автотормоза, X_{31} – угол набегания колеса на рельс превышает

допуск, X_{32} – угол наклона образующей гребня колеса к горизонтали вне пределов допуска, X_{33} – горизонтальная составляющая нагрузки на колесо намного превышает вертикальную, X_{34} – неблагоприятное сочетание параметров пути и ходовых частей вагона, X_{41} – разрушение сепаратора подшипника, X_{42} – разрушение кольца подшипника, Y_1 – перекося колёсных пар в тележке, Y_2 – неотрегулированность зазоров в скользунах, Y_3 – завышение фрикционных клиньев превышает предельное значение, Y_4 – отклонение характеристик рессорного подвешивания от номинала превышает допуск, Y_5 – разность диаметров колёс в колёсной паре превышает допуск, Y_6 – забегание боковых рам тележки, Y_7 – нарушение режима движения в кривых малого радиуса, Y_8 – поперечное смещение центра масс груза превышает норму, Y_9 – выжимание порожнего вагона, Y_{10} – превышение нормы зазоров в продольных и поперечных направлениях между корпусом буксы и буксовыми направляющими боковины, Y_{11} – износ опорных поверхностей боковины тележки превышает допуск.

Однако древовидная модель аварийности вагона не приспособлена к количественному определению вероятности завершающего события. Поэтому от древовидной модели аварийности переходят к двухполюсной (Рисунок 2.2), используя для этого известный в теории надёжности метод нахождения подмножеств минимальных сечений дерева событий.

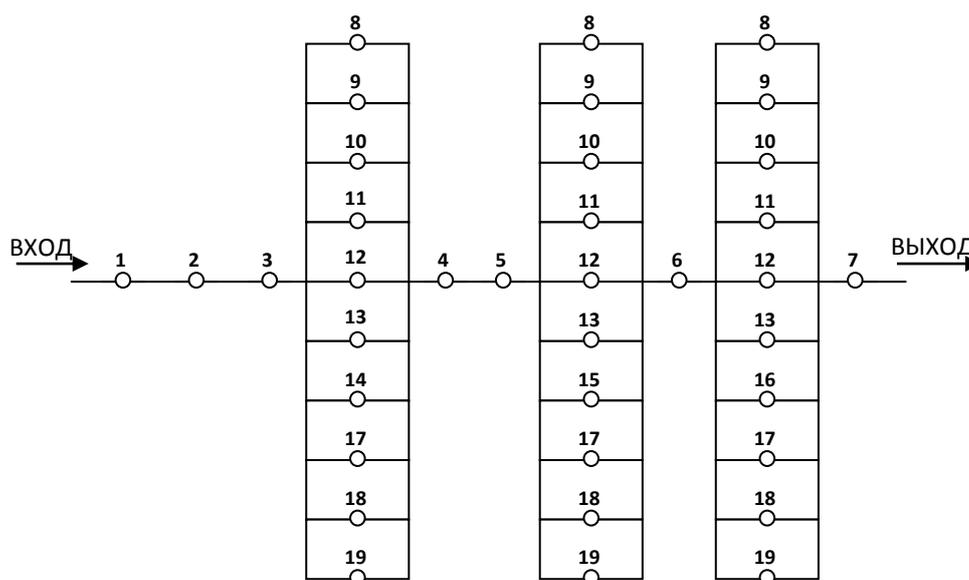


Рисунок 2.2 – Двухполюсная модель аварийности вагона

Имея двухполюсное представление аварийности вагона, не представляет особых трудностей получить формулу вероятности схода вагона с рельсов:

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^7 \bar{F}_i(t) \prod_{k=14}^{16} [1 - B \cdot F_k(t)], \quad (2.7)$$

$$B = \prod_{i=8}^{13} F_i(t) \cdot \prod_{j=17}^{19} F_j(t); \quad \bar{F}_i(t) = 1 - F_i(t), \quad (2.8)$$

где $F_i(t)$ – вероятность безотказной работы деталей.

Из рисунка 2.2. вытекает следующие, среди всех возможных отказов, приводящих к сходу вагона с рельсов, можно две группы отказов [84]. Первая группа отказов – это отказы (события обозначенные цифрами 1-7), возникновение которых сразу приводит к сходу вагона с рельсов. Вторая – это те отказы, которые должны наступить совместно, чтобы произошёл сход. Следовательно, безопасность вагонных конструкций определяют отказы первой группы (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Отказы первой группы

№	Наименование детали	Обозначение
1	Разрушение колеса	X_1
2	Разрушение боковины тележки	X_{21}
3	Разрушение надрессорной балки	X_{22}
4	Разрушение деталей ударно-тягового механизма	X_{23}
5	Разрушение деталей автотормоза	X_{24}
6	Разрушение сепаратора подшипника	X_{41}
7	Разрушение кольца подшипника	X_{42}

Как видно из таблицы наиболее опасным видом отказов для конструкции грузового вагона являются трещины, приводящие к разрушению деталей, что подтверждается статистикой аварийности на железнодорожном транспорте. Таким образом, в качестве деталей, для которых в первую очередь необходимо решать задачу оценки остаточного ресурса с учётом требуемого уровня риска их отказа в течение периода между их глубокими диагностиками (плановыми ремонтами), нужно рассматривать перечисленные выше. Рассмотрим методику

решения задачи оценки остаточного ресурса детали на примере боковины тележки грузового вагона.

3 Оценка остаточного ресурса деталей вагонов на основе статистических данных

Как было показано выше, остаточный срок службы зависит от ВБР (функции распределения наработки детали до опасного отказа). Согласно теории надёжности для её получения требуется обосновать модель отказа (вид закона распределения наработки до опасного отказа), провести эксперимент в соответствии с планом испытаний на надёжность, обработать результаты и получить соответствующие оценки параметров модели отказа.

3.1 Обоснование вида функции распределения наработки до появления опасного отказа

Одним из важных этапов при оценке остаточного ресурса детали, является обоснование вида модели рассматриваемых опасных отказов. В качестве опасного отказа будем рассматривать появление первой и только первой трещины в материале детали. В качестве примера будем рассматривать боковую раму тележки грузового вагона.

Рассмотрим случайную величину (3.1):

$$\eta_n = \min(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n), \quad (3.1)$$

где η_n – наработка детали до появления первой трещины (появления трещины в одной из n частей); τ_i – наработка i -й части рассматриваемой детали до появления в ней первой трещины.

Относительно рассматриваемых случайных величин τ_i – сделаем два допущения:

- случайные величины $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ – независимы;
- случайные величины имеют одинаковый закон распределения $F(t)$.

Предположим, что функцию надёжности $\bar{F}(t)$ в окрестности начала координат можно представить в виде степенной функции (3.2)

$$\bar{F}(t) = 1 - c^{t^\alpha} + o(t^\alpha), \quad (3.2)$$

где c, α – константы; $o(t^\alpha)$ – бесконечно малая величина порядка t^α .

Для того чтобы получить закон распределения наработки детали до появления трещины в первичном виде, введём в рассмотрение некую нормировочную величину B_n , которая зависит от величины n .

Легко согласится, что с помощью математической операции

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \min(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n). \quad (3.3)$$

моделируется процесс дробления рассматриваемой детали на бесконечное число частей, каждая из которых по существу уместается до размеров почти нулевого объёма, т.е. до точки. Тогда под выражением

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\{\min(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) > tB_n\}. \quad (3.4)$$

следует понимать вероятность безотказной работы рассматриваемой детали за время tB_n .

Чтобы вычислить последний предел, выполним следующие преобразования функции, стоящей под знаком \lim :

$$P\{\min(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) > tB_n\} = P\{\tau_1 > tB_n, \tau_2 > tB_n \dots \tau_n > tB_n\} = \dots$$

используя принятые допущения относительно случайных величин τ_i , продолжим цепочку преобразований:

$$\dots = P\{\tau_1 > tB_n\} \times P\{\tau_2 > tB_n\} \dots P\{\tau_n > tB_n\}, = [1 - c \times (tB_n)^\alpha + o(tB_n)^\alpha]^n. \quad (3.5).$$

Учитывая свойство логарифмической функции:

$$A^B = e^{B \ln A}, \ln(1-x) \approx x \text{ при малом } x, \text{ при этом приняв } B_n = n^{-1/\alpha},$$

получим искомое выражение для функции распределение наработки рассматриваемой детали до появления первой трещины в её материале:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\{\min(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) > tB_n\} = e^{-ct^\alpha}. \quad (3.6)$$

Как видно это выражение соответствует классическому закону теории надёжности – закону распределения Вейбулла-Гнеденко.

Итак в рамках сделанных допущений наработка основных деталей до появления в их материале первой трещины описывается двухпараметрическим Вейбулловским законом распределения, который удобно записать в следующем виде:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \quad (3.7)$$

где a и b – параметры масштаба и формы этого закона распределения, определяемые на основе результатов эксперимента.

Таким образом, с математической точностью доказано, что наработка изделия до опасного события (отказа) имеет закон распределения Вейбулла – Гнеденко [85].

Перейдём теперь к оценке параметров этого закона распределения. Технологию получения точечных оценок параметров закона распределения наработки до отказа рассмотрим на примере боковой рамы тележки.

3.2 Методика получения точечных оценок параметров функции распределения наработки детали до опасного отказа

В теории надёжности используются несколько методов определения параметров законов распределения по статистическим данным: метод максимального правдоподобия, метод моментов; метод разделяющих разбиений; графический метод [10, 61] и др.

Наилучшей оценкой наработки до отказа является оценка, обладающая наименьшей дисперсией. Такая оценка называется эффективной. Её удобно получить с помощью метода максимального правдоподобия. Рассмотрим методику оценки параметров законов распределения.

Поскольку НСС рассматриваемых узлов и деталей соизмерим со сроком службы вагона, который составляет 32 года, то в результате эксперимента будет получена неполная выборка: t_1, t_2, \dots, t_m – наработки до отказов, t_1, t_2, \dots, t_s – безотказные наработки.

В общем виде, функция правдоподобия для неполной выборки имеет вид [32].

$$L = \sum_{i=1}^m \ln f_i(t) + \sum_{j=1}^s \ln(1 - F_j(t)), \quad (3.8)$$

где m – число отказов, зафиксированных в период эксперимента; s – число безотказных, наработок в период эксперимента; $F_j(t)$ – функция распределения наработки до опасного отказа (вероятностная модель отказа); $f_i(t)$ – плотность распределения наработки до опасного отказа.

Для рассматриваемой детали наработка до опасного отказа (как показано выше) подчиняется закону Вейбулла–Гнеденко (3.7). Выражение плотности распределения для этой модели отказа имеет вид:

$$f(t) = F'(t) = \frac{b}{a} \left(-\frac{t}{a} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a} \right)^b}. \quad (3.9)$$

С учётом (3.7) и (3.9), выражение функции правдоподобия для неполной выборки и закона распределения Вейбулла–Гнеденко (3.8) будет иметь вид:

$$L = m \ln b - mb \ln a + (b-1) \sum_{i=1}^m \ln t_i - a^{-b} \left[\sum_{i=1}^m t_i^b - \sum_{j=1}^s t_j^b \right], \quad (3.10)$$

где $t_i, i=\overline{1, m}$ – i -ая наработка до отказа; $t_j, j=\overline{1, s}$ – j -ая безотказная наработка.

Искомые точечные оценки параметров a и b получают исходя из максимума функции правдоподобия L , вычисляя частные производные и приравняв их нулю:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial a} = 0 \quad ; \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \quad . \end{array} \right. \quad (3.11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial a} = 0 \quad ; \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \quad . \end{array} \right. \quad (3.12)$$

получим выражение для точечной оценки параметра a :

$$\hat{a} = \left[\frac{\sum_{i=1}^m \hat{t}_i^{\hat{b}} - \sum_{j=1}^s \hat{t}_j^{\hat{b}}}{m} \right]^{\frac{1}{\hat{b}}}. \quad (3.13)$$

Поставив выражение (3.13) в (3.10) получим выражение для оценки параметра b :

$$\frac{m}{\hat{b}} = - \sum_{i=1}^m \ln \hat{t}_i + m \frac{\sum_{i=1}^m \hat{t}_i^{\hat{b}} \ln \hat{t}_i + \sum_{j=1}^s \hat{t}_j^{\hat{b}} \ln \hat{t}_j}{\sum_{i=1}^m \hat{t}_i^{\hat{b}} + \sum_{j=1}^s \hat{t}_j^{\hat{b}}}. \quad (3.14)$$

И так, мы получили выражения для определения точечных оценок параметров закона распределения \hat{a} и \hat{b} .

Следует отметить, что точечная оценка параметра \hat{a} в явном виде зависит от параметра \hat{b} . Однако, получить выражение для определения точечной оценки параметра \hat{b} в явном виде из уравнения 3.14 не представляется возможным. Поэтому для её определения можно воспользоваться методикой, приведённой в работе [16], либо использовать графический метод, либо воспользоваться

методом итераций Ньютона–Рафсона.

Таким образом, для получения вероятностной модели опасного отказа детали и точечных оценок параметров закона распределения наработки до отказа необходимо провести эксперимент и собрать первичную информацию о таких отказах. При этом желательно, как показано в разделе 1.3 использовать схему сбора информации 1-3-5-9. Кроме того, эксперимент необходимо провести в соответствии с одним из планов испытаний на надёжность [20], без чего невозможно корректное применение методов теории вероятностей и математической статистики.

4 Методика формирования первичной статистической информации об опасных отказах деталей

При проведении эксперимента и получении первичной статистической информации об опасных отказах деталей и узлов вагонов возможны принципиальные три подхода. Во-первых, это испытания при нормальных эксплуатационных нагрузках. Во-вторых, ускоренные испытания, к которым относятся стендовые испытания и эксплуатация в опытных поездах. В-третьих, получение статистических данных на основе математического моделирования. Как отмечено выше (см. раздел 1.3) наиболее рациональным является первый подход.

При этом собираемая информация, должна соответствовать одному из планов испытаний на надёжность [37], без чего невозможна корректная её обработка с использованием методов теории вероятностей и математической статистики.

В настоящее время на железнодорожном транспорте действует отраслевая автоматизированная система централизованного пономерного учёта вагонов (ЦПУВ) и её подсистема – журнал технического состояния грузового вагона. В системе по номеру вагона и его ответственных элементов можно проследить процесс изменения их технического состояния. В частности определить дату изготовления и начала эксплуатации, например, боковой рамы тележки в составе данного грузового вагона, а также продолжительность безотказной её эксплуатации на момент постановки вагона в ремонт [91].

Таким образом, существующая информационная база позволяет собирать первичную информацию о наработках до отказов вагонов в условиях непосредственного использования по назначению. Эта система позволяет не только в реальном времени отслеживать техническое состояние вагона, но и проводить условные эксперименты, используя хранящуюся информацию. Существующая информационная система отрасли позволяет собрать

статистическую информацию в соответствии с планом испытаний на надёжности типа [NUT].

План испытаний [NUT] используют часто для невозстанавливаемых изделий. Первый символ определяет, что под наблюдением в эксперименте находится N объектов. Символ U указывает, что отказавший во время испытаний объект не восстанавливают, а заменяют на новый или ранее отремонтированный. Третий символ определяет, что испытания прекращают по истечении времени испытаний или наработки T . Согласно плану испытаний, предполагается, что объектами наблюдения являются однотипные детали, не имеющие конструктивных различий и одинаковые по возрасту.

С помощью системы ЦПУВ в вагонном парке выделяются номера вагонов, которые удовлетворяют определённым требованиям. В качестве примера будем рассматривать универсальные четырёхосные вагоны, собственности Российской Федерации, выпущенные в 2005 и 2006 г. на одном из отечественных вагоностроительных заводов. В соответствии с имеющейся информацией системы ЦПУВ имеется $N=3963$ вагонов, удовлетворяющих указанным требованиям. С помощью базы данных ЖТСВ, технология работы которой приведена в разделе 1.3, для каждого вагона фиксируем случаи обнаружения на станции неисправностей для исследуемой детали (например, боковой рамы тележки). Наблюдение за каждым вагоном будем проводить в течение первого после постройки межремонтного периода, который составляет 22 месяца в пересчёте на календарную продолжительность.

Таким образом, эксперимент проведён на основе статистической информации ГВЦ ОАО «РЖД» в соответствии с планом испытаний [$N=3963$ U $T=22$ мес.].

В результате эксперимента получена выборка, результат наблюдений за эксплуатацией N одинаковых элементов конструкции вагонов в течение времени T , имеющих к моменту начала наблюдения нулевые наработки. Выборка объёма $v=t + s$ содержит ряд наработок завершившихся отказом (обозначим $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_m$), и ряд безотказных наработок (обозначим $t_1, t_2, t_3, \dots, t_s$).

4.1 Точечные оценки параметров закона распределения наработки до опасного отказа деталей вагонов

Рассмотрим технологию получения точечных оценок параметров закона распределения наработки до опасного отказа боковой рамы тележки на основе эксплуатационной информации об отказах. Технологию получения точечных оценок параметров закона распределения наработки до опасного отказа рассмотрим на примере боковины тележки. В качестве опасного отказа детали, как показано выше, необходимо рассматривать трещины и изломы боковины тележки. В соответствии с действующим на сети железных дорог классификатором неисправностей грузовых вагонов этим событиям соответствует код 205 [27].

В эксперименте участвовало $N=3963$ вагонов. Наблюдение проводилось в течение первых 22 месяцев после постройки вагона ($T=22$ мес.). При этом, факт обнаружения осмотрщиком отказа вагона при текущем контроле технического состояния на станции фиксируется и отражается в вагонной учётной форме ВУ-23М. Эта информация (о переводе вагона в состав неисправных и причинах этого) передаётся в вычислительный центр в виде сообщения формы 1353.

В таблице 4.1 приведён пример массива эксплуатационных данных, полученных в соответствии с планом испытаний на надёжность. Всего в эксперименте было зафиксировано 12 случаев обнаружения опасных отказов вагонов, включённых в эксперимент, с кодом 205. Нарботки до отказов вагонов приведены в таблице 4.2.

При этом учитывалось одно важное условие, что в результате неразрушающего контроля отказ боковой балки подтверждён.

Таблица 4.2 – Нарботки до отказов боковины тележек

Условный номер вагона	Нарботка до отказа, мес.	Условный номер вагона	Нарботка до отказа, мес.	Условный номер вагона	Нарботка до отказа, мес.
56861432	5	56874625	15,1	56872546	19,7
56896685	7,16	56873205	15,84	56865326	21,13
56873312	9,64	56867587	18,67	56871688	21,67
56833506	10,62	56872587	18,84	56873056	21,87

С помощью формул (3.13) и (3.14) получены точечные оценки параметров закона распределения $\hat{b} = 2,61$, $\hat{a} = 186$ мес.

Для проверки качества полученных точечных оценок воспользуемся критерием Колмогорова. Для этого сформируем статистический (вариационный) ряд (Таблица 4.3) и получим значения статистической функции распределения наработки до отказа, например с помощью метода Фишбейна.

Таблица 4.3 – Вариационный ряд наработок до опасного отказа боковой рамы тележки

l	i	$\tau_{i,}$ мес.	j	$t_{j,}$ мес.
1	2	3	4	5
1	1	5		
2	2	7,16		
3	3	9,64		
4	4	10,62		
5	5	15,1		
6	6	15,84		
7	7	18,67		
8	8	18,84		
9	9	19,7		
10	10	21,13		
11	11	21,67		
12	12	21,87		
13			1	22
14			2	22
15			3	22
16			4	22
17			5	22
...		
3963			3951	22

Здесь l – порядковый номер наработки в вариационном ряду, τ_i – наработка i -й детали до отказа, i – соответственно порядковый номер наработки до отказа, t_j – безотказная наработка j -й детали, j – порядковый номер безотказной наработки.

Для построения статистической функции распределения наработки до отказа используем метод Фишбейна [93].

$$F_{\phi}(\tau_i) = \frac{i}{v+1-j^*}, \quad (4.1)$$

где v – количество элементов в вариационном ряду (соответствует количеству строк в таблице вариационного ряда), i – порядковый номер отказной наработки, j^* – порядковый номер безотказной наработки, ближайшей в вариационном ряду к i -ой наработке сверху.

С помощью критерия А.Н. Колмогорова проверяем гипотезу о близости полученной модели и статистической функций распределения наработки до опасного отказа боковины. Для этого определяем величину максимального расхождения D_n между полученной теоретической функцией распределения $F(t)$ и статической функцией $F_{\phi}(t)$ [85]. Результаты расчётов приведены в таблице 4.4 и на рисунке 4.2.

Находим максимальное значение D_n . Проверим гипотезу с уровнем значимости $\alpha = 5\%$. После чего по таблице распределения Колмогорова [6] находим квантиль $t_{\alpha} = 1,36$. Выборочное значение критерия $z = D_n \sqrt{n} = 0,000847 \sqrt{3963} = 0,053339 < 1,36$. Как видно $z = D_n \sqrt{n} < t_{\alpha}$, гипотеза о близости теоретического и статического распределений верна, поэтому полученную модель отказа можно использовать при прогнозировании показателей надёжности деталей, и, в частности, остаточного ресурса с вероятностью ошибки не превышающей 5%.

Таблица 4.4 – Определение максимального расхождения между статистической функцией и моделью отказа

№	t, мес.	F(τ_i)	F $_{\phi}$ (τ_i)	$D_n= F_{\phi}(\tau_i)-F(\tau_i) $
1	5	0,00008	0,000252	0,000172
2	7,16	0,0002	0,000504	0,000305
3	9,64	0,00043	0,000756	0,000327
4	10,62	0,00056	0,001009	0,000449
5	15,1	0,0014	0,001261	0,000139
6	15,84	0,00159	0,001513	0,000076
7	18,67	0,00244	0,001765	0,000674
8	18,84	0,00249	0,002018	0,000472
9	19,7	0,0028	0,002270	0,000530
10	21,13	0,00337	0,002522	0,000847
11	21,67	0,00359	0,002774	0,000815
12	21,87	0,00368	0,003027	0,000653

Таким образом, полученная теоретическая функция распределения опасного отказа боковой рамы тележки грузового вагона имеет вид: $1 - \bar{F}(t) = F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{186}\right)^{2,61}}$.
 Её график приведён на рисунке 4.1. Теоретическая и статистическая функции распределения приведены на рисунке 4.2.

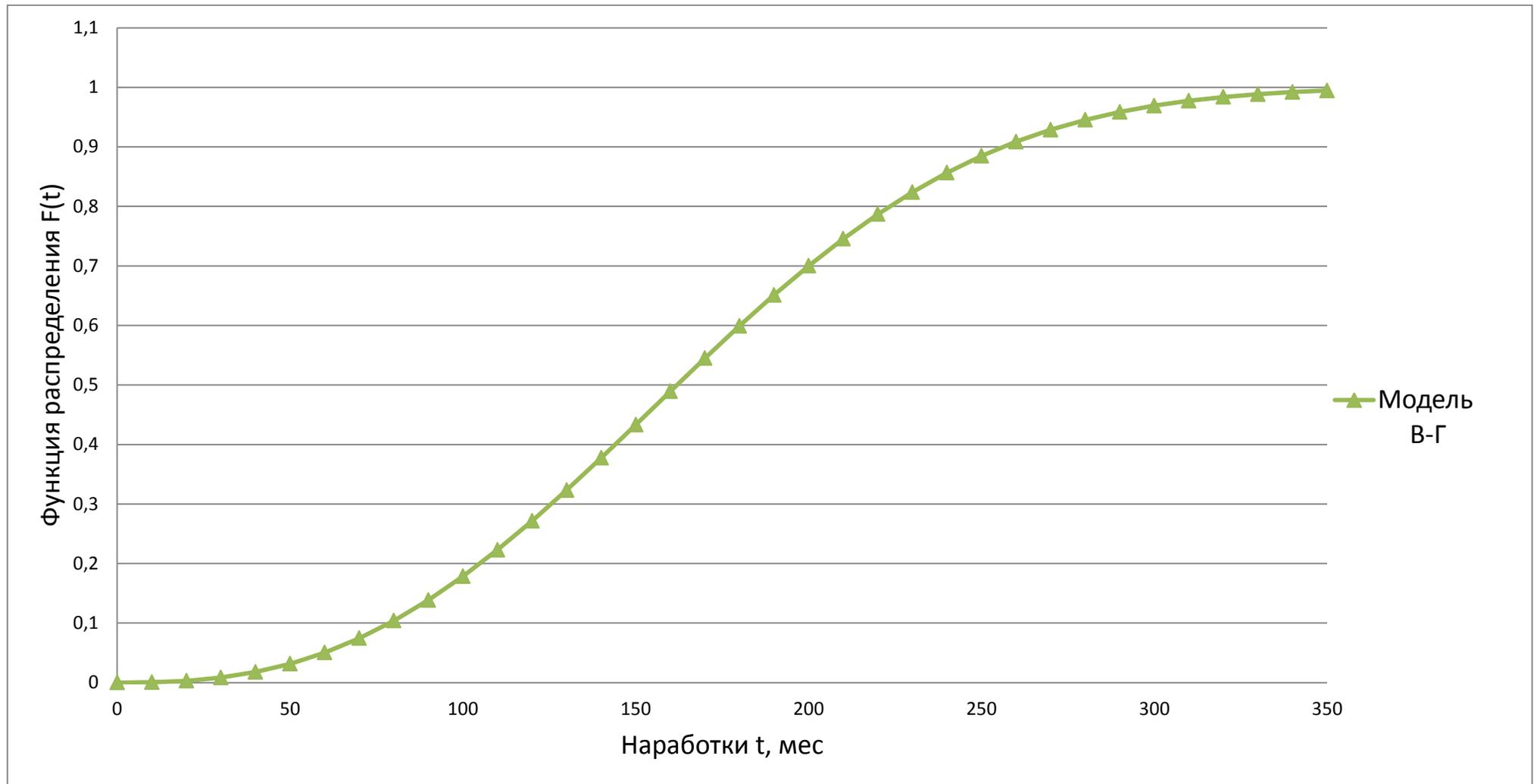


Рисунок 4.1 – Функция распределения опасного отказа боковой рамы тележки грузового вагона с точечными параметрами $\hat{b} = 2,61$, $\hat{a} = 186$ мес.

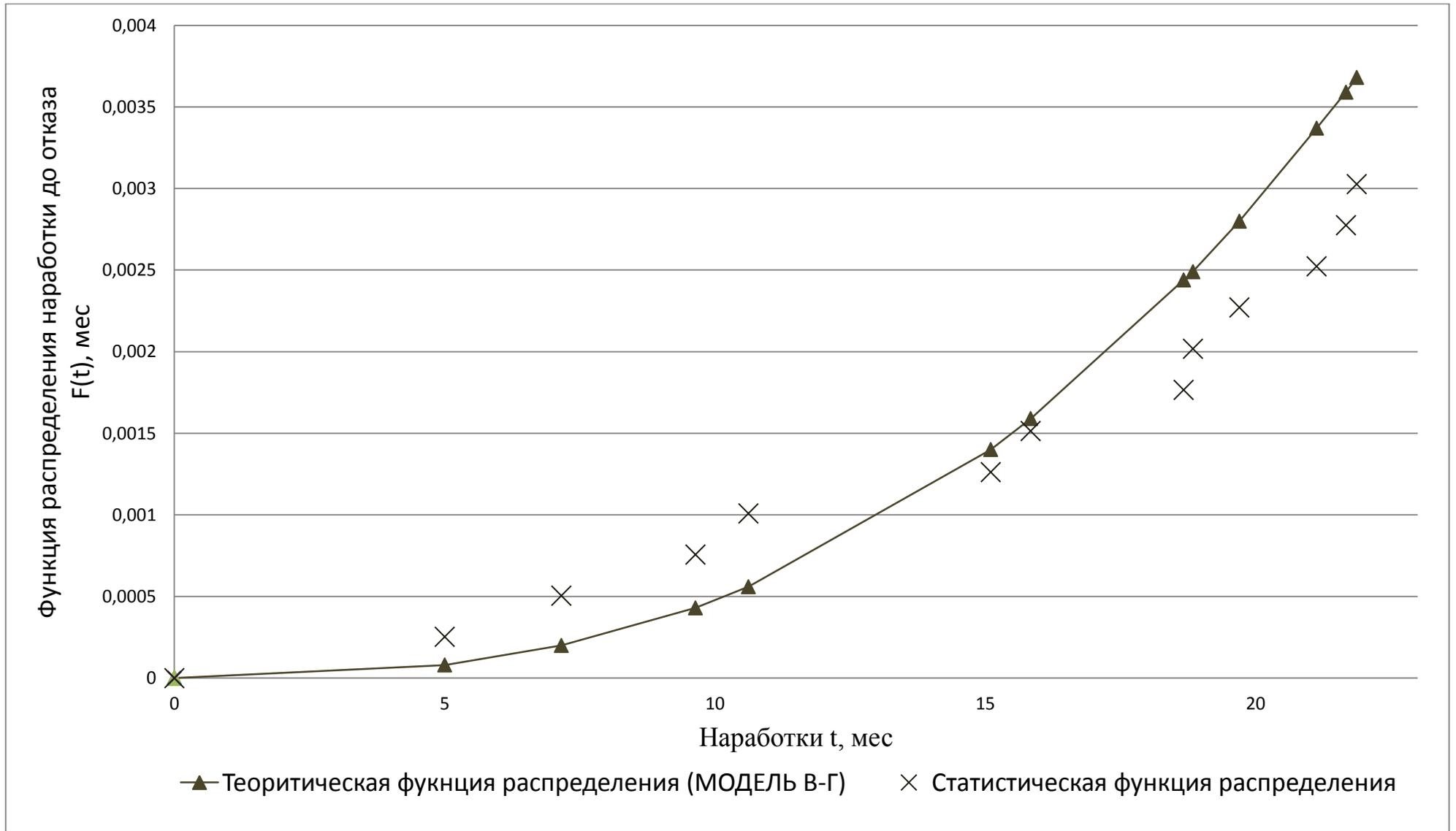


Рисунок 4.2 – Теоретическая и статистическая функция распределения, к определению максимального расхождения функций

Аналогичным образом получены точечные оценки параметров закона распределения Вейбула-Гнеденко для опасных отказов (трещин) по другим ответственным деталям, влияющим на безопасность движения. Расчётные значения приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Точечные оценки параметра закона распределения

№	Наименование детали	Отказ	Параметры	
			\hat{a}	\hat{b}
1	Колесо	Трещина/откол обода, гребня, диска колеса колёсной пары	4434	1,11
2	Боковая рама	Трещины или излом боковины	186	2,61
3	Надрессорная балка	Трещина или излом надрессорной балки	636	2
4	Автосцепка	Трещины в корпусе автосцепки	847	1,73
5	Тяговый хомут	Трещины, излом тягового хомута	899	2

4.2 Оценка остаточного ресурса деталей

В предыдущем разделе получены вероятностные модели опасных отказов наиболее ответственных деталей вагона. Теперь всё готово к решению поставленной задачи – определить тот остаточный срок службы детали, например, боковины тележки, безотказно проработавшей в течение 22 мес., при котором вероятность опасного отказа не превысит требуемого уровня $(1-y)$. Величину $(1-y)$ можно трактовать как уровень допустимого или требуемого риска крушения поезда в период работы вагона между глубокими диагностиками (например, $1-y = 0,01$). С учётом модели отказа (2.6) и формулы (3.7) получим:

$$y = \frac{e^{-\left(\frac{t+x}{\hat{a}}\right)^{\hat{b}}}}{e^{-\left(\frac{t}{\hat{a}}\right)^{\hat{b}}}} \quad (4.2)$$

Решая уравнение (4.2) относительно x , получим искомую формулу остаточного срока службы боковины тележки грузового вагона, безотказно проработавшей время t с учётом управляемого риска её отказа $(1-y)$, имеет вид:

$$x = \hat{a} \sqrt{\left[\left(\frac{t}{\hat{a}} \right)^{\hat{b}} - \ln y \right]} - t \quad (4.3)$$

где y – требуемая вероятность отсутствия опасного отказа в течение остаточного срока службы.

Подставляя в уравнение параметры закона распределения наработки до отказа, получим величину остаточного ресурса боковины тележки, безотказно проработавшей 22 месяца, для вагонов рассматриваемого завода-изготовителя:

$$x = 2,6 \sqrt{\left[\left(\frac{22}{186} \right)^{2,6} - \ln 0,99 \right]} 186^{2,6} - 22 = 14,2 \text{ мес.} \quad (4.4)$$

Итак, с учётом полученных эксплуатационных данных для боковин выпуска 2006 г., отработавших безотказно 22 мес. остаточный срок службы, в течение которого опасный отказ не возникнет с вероятностью $y=99\%$, составит 14,2 мес. Таким образом, по истечении этого срока потребуются аналогичным образом

повторно оценивать величину остаточного срока службы. При этом объём статистической информации о работе рассматриваемой партии деталей увеличится, что потребует перерасчёта параметров модели отказа. Допустим, что после окончания допустимых 14,2 мес. работы детали параметры вероятностной модели \hat{a} и \hat{b} не изменились, то возможно решить аналогичную задачу (оценки остаточного срока службы детали, безотказно проработавшей период $22+14,2=36,2$ мес., с учётом требуемого уровня риска опасного отказа). Так, при $t=36,2$ мес., остаточный срок службы составит 8,4 мес.

В общем случае, процесс эксплуатации боковины тележки можно представить в виде последовательных чередований процесса использования детали по назначению и моментов проведения плановых необходимых глубоких диагностик, в каждой из которых будет оценён остаточный срок службы рассматриваемой детали с заданным уровнем риска опасного отказа. Если допустить, что закон распределения наработки до отказа боковины с течением времени не изменяется, то последовательность контролей технического состояния боковины по мере её старения представлена на рисунке 4.3. Точки на графике соответствуют моментам необходимых запланированных глубоких диагностик детали при заданном риске отказа 0,01 (требуемом уровне вероятности отсутствия отказа 0,99). Аналогичные зависимости можно получить при любых, требуемых уровнях риска $(1-u)$ появления трещины боковины в период между глубокими диагностиками, выполняемыми в условиях вагонных ремонтных депо рисунок 4.4. С помощью программы MATLAB построена трёхмерная модель для поддержки принятия решения о величине остаточного срока службы боковин выпущенных в 2006 году с учётом управляемого риска возникновения опасного отказа (Рисунок 4.5).

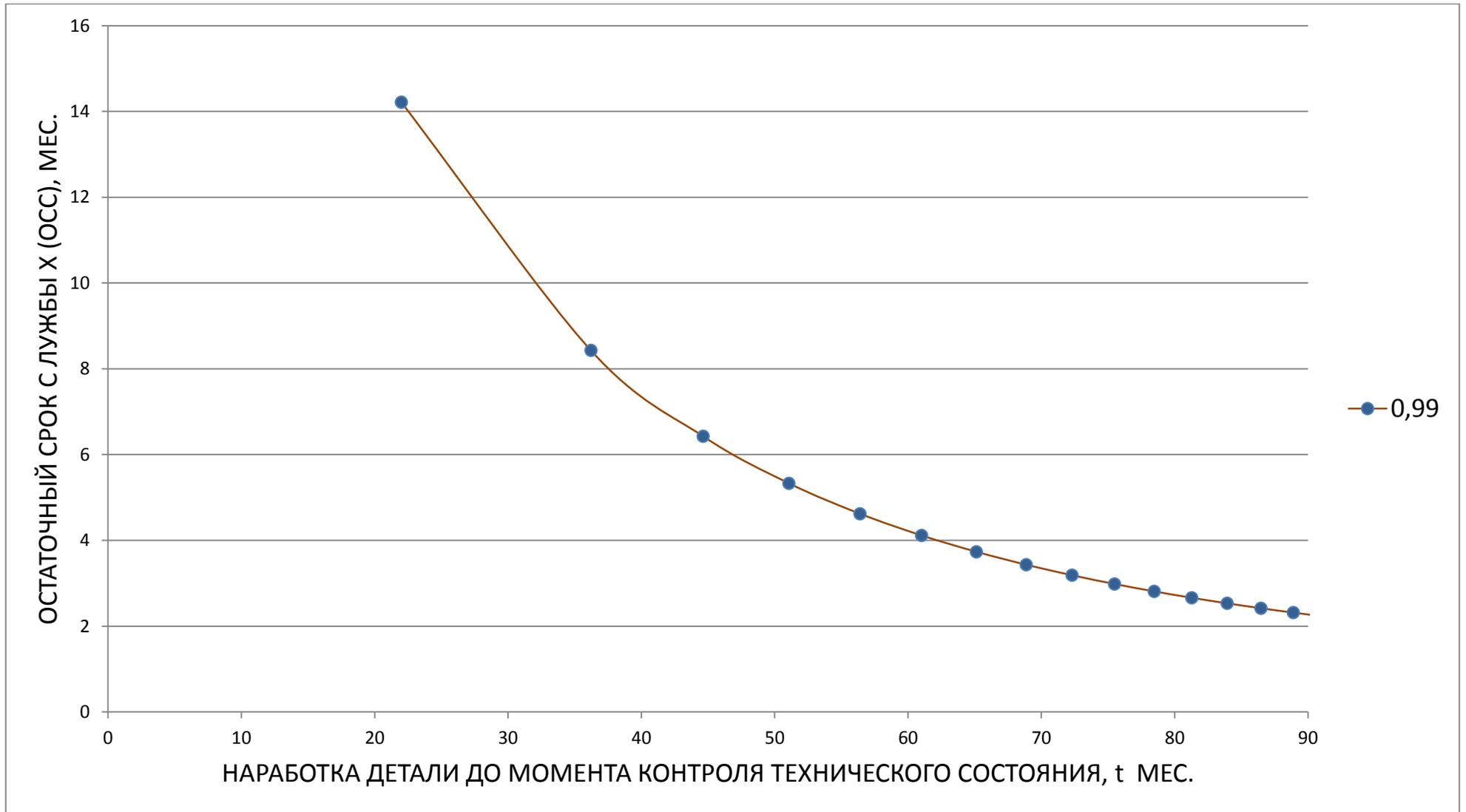


Рисунок 4.3 – Изменение остаточного срока боковой рамы по мере её старения (при значении $y=0,99$)

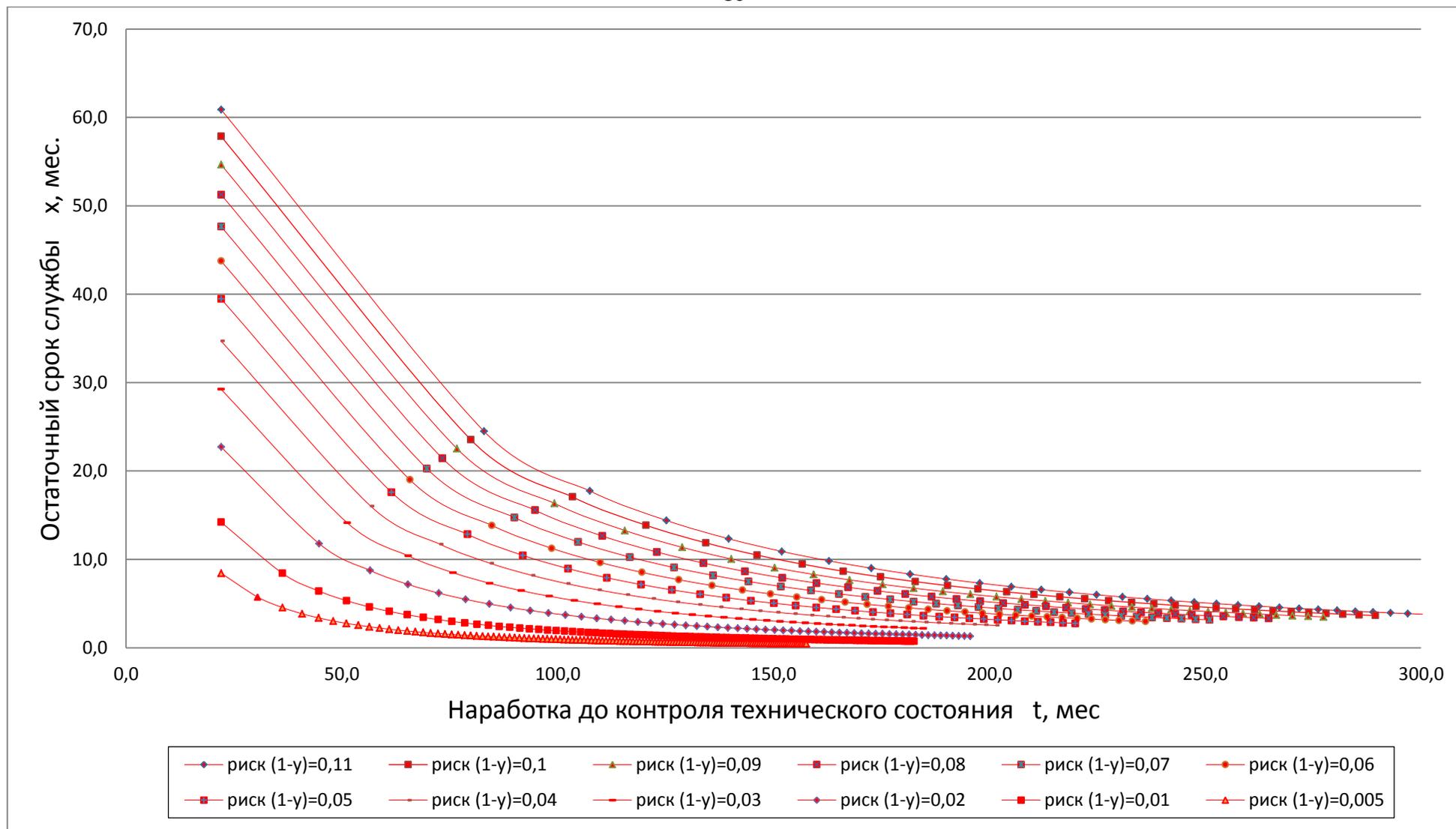


Рисунок 4.4 – Изменение остаточного срока боковины по мере её старения при различных уровнях риска $(1-\gamma)$ для модели отказа Вейбулла-Гнеденко с параметрами $\hat{b} = 2,6$ и $\hat{a} = 186$ мес.

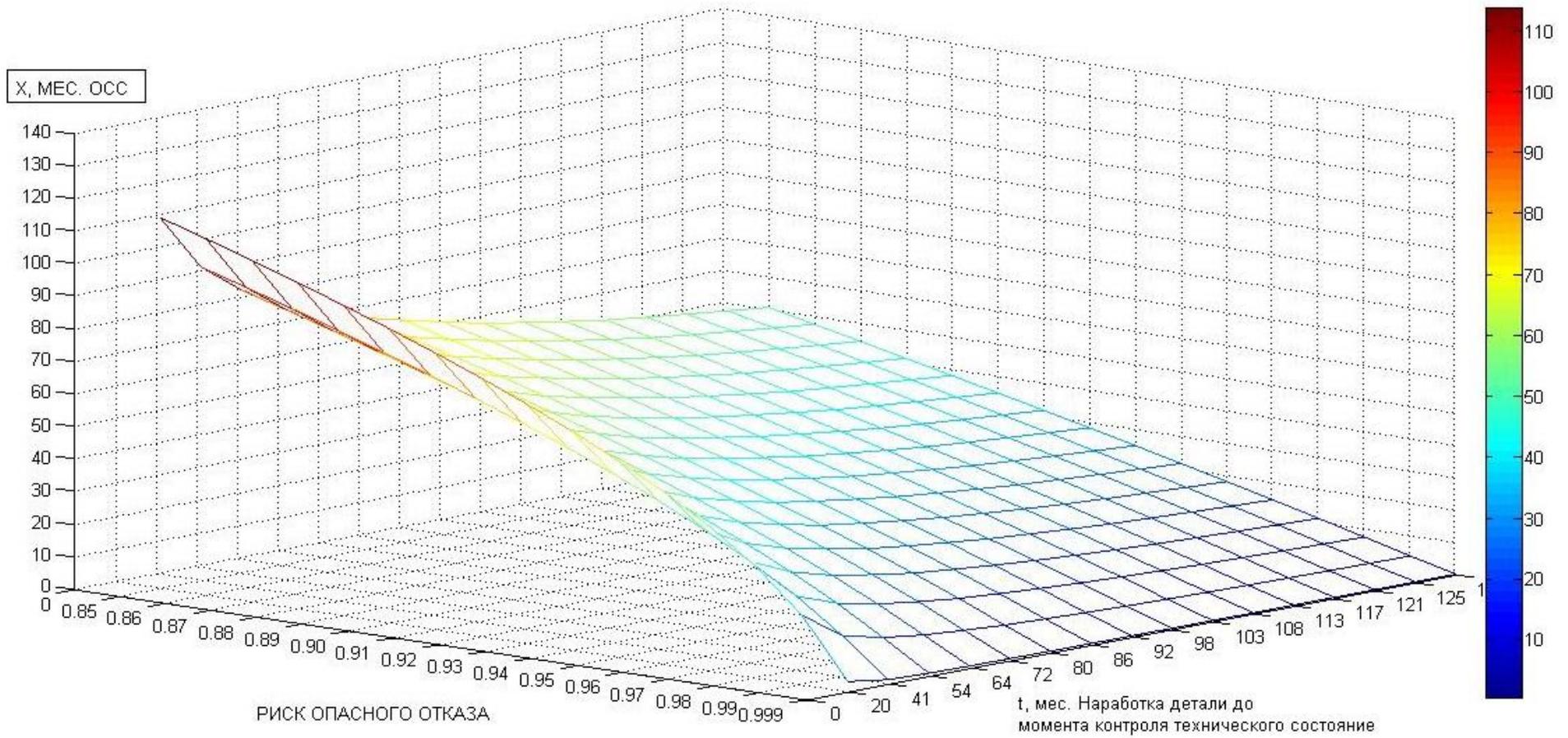


Рисунок 4.5 – Трёхмерная модель для поддержки принятия решения об остаточном сроке службы боковины 2006 года выпуска для системы управления риском её отказа

Аналогичным образом, были получены значения остаточного ресурса для наиболее ответственных деталей (Таблица 4.6) [36]. Из полученных результатов видно, что в конструкции вагона рассматриваемого завода-изготовителя наименее надёжными в эксплуатации являются боковины тележек. Вероятность безотказной работы и средняя наработка до появления трещин боковины существенно ниже по сравнению с остальными деталями, что полностью соответствует сложившейся ситуации на железнодорожном транспорте.

Таблица 4.6 – Остаточный срок службы

№	Наименование детали	Параметры		Остаточный срок службы, мес.	Средняя наработка до отказа, мес.
		\hat{a}	\hat{b}		
1	Колесо	4434	1,11	65,1	4224,47
2	Боковая рама	186	2,61	14,2	165,22
3	Надрессорная балка	636	2	45,4	563,64
4	Автосцепка	847	1,73	43,8	754,87
5	Тяговый хомут	899	2	70,8	796,71

Для повышения качества результатов для практического использования метода необходимо, чтобы информационная база отрасли постоянной собирала информации об отказах по каждой ответственной детали [90]. На практике это возможно реализовать, поскольку каждая ответственная деталь имеет уникальный идентификационный номер, кроме того, в системе ЖТСВ предусмотрено ведение ремонтно-эксплуатационного паспорта вагона, в котором фиксируются все случаи замены основных элементов вагона. Кроме того, в базе ЖТСВ необходимо собирать информацию не только о причинах перевода вагона в нерабочий парк, но и о реально выполненных ремонтных работах, поскольку при проведении текущего ремонта могут быть выявлены отказы, информация о которых в настоящее время теряется. Несмотря на это, в системе вагонного комплекса предусмотрена специальная вагонная учётная форма (ВУ-22) – дефектная ведомость, которая оформляется на каждый вагон при его ремонте и служит основой для расчёта платы за выполненный ремонт. Важно отметить ещё одно условие, в информационной системе необходимо собирать информацию обо всех случаях браковки ответственных деталей, в том числе по результатам

дефектоскопирования в вагонных ремонтных депо, независимо от формы собственности предприятия.

Таким образом, приведённую методику достаточно просто реализовать в вагонных депо и вагоноремонтных заводах [88]. Рассмотренный алгоритм позволит перейти от действующей плановой стратегии проведения ремонтов крупного объёма к планово-диагностической системе ТОиР. Для этого требуется обосновывать периодичность проведения глубоких диагностик, по результатам которых (на основе фактического технического состояния) принимается решение о необходимости отправки вагона в ремонт или продолжении его использования по назначению с установлением срока службы до следующей глубокой диагностики (остаточного срока службы). При этом для его оценки необходимо учитывать усталостные трещины основных несущих узлов и деталей вагонов.

Рассмотренную технологию достаточно просто реализовать и автоматизировать информационной базе ВХ. По мере накопления статистической информации, автоматизированная система сможет обеспечить корректировку значений остаточного срока службы детали и передавать значения в систему управления фактическим техническим состоянием вагона. Кроме того, в значительной степени увеличится «коэффициент полезного использования» системы централизованного пономерного учёта вагонов, которая является важным этапом в развитии железнодорожного транспорта с точки зрения интеллектуализации процесса его функционирования.

Такая система совместно с автоматизированным комплексом, отслеживающим темпы износов основных элементов вагонов, позволит на принципиально ином уровне организовывать работу системы ТОиР в вагонном комплексе.

4.3 Технология принятия решения о возможности выпуска детали из ремонта в составе вагона

Если при деповском ремонте в результате неразрушающего контроля детали зафиксировано её исправное состояние, то этого недостаточно, чтобы, оставить деталь в составе отремонтированного вагона.

Технология принятия решения:

Если при неразрушающем контроле установлено исправное состояние детали, то выполняется сравнение остаточного срока службы этой детали, рассчитанного автоматизированной системой, с периодом гарантийной ответственности ремонтного предприятия (например, периода до следующего планового ремонта).

При формировании ремонтно-эксплуатационного паспорта вагона автоматизированная система выполнит автоматически такую проверку и:

- даст разрешение на установку детали в соответствующий вагон, если остаточный ресурс детали больше периода до очередного ремонта крупного объёма;

- не даст разрешение на установку детали в соответствующий вагон, если остаточный ресурс детали меньше периода до очередного ремонта крупного объёма.

Кроме того, в условиях ремонтного предприятия для вагона можно подбирать детали с равным остаточным ресурсом, формируя соответствующий запрос в автоматизированную систему.

5 Методика оценки остаточного срока службы грузового вагона

Вагон – это сложная система взаимосвязанных деталей, узлов и агрегатов, имеющая комбинированную структуру. Долговечность и эффективность использования во многом зависит от ресурса его элементов. В процессе использования по назначению заложенный при изготовлении ресурс постепенно расходуется, увеличиваются износы и коррозия, возникают усталостные повреждения его элементов, снижается эффективность работы вагона, растёт количество отказов, продолжительность нахождения в неработоспособном состоянии, возрастает риск аварий и крушений.

Для восстановления ресурса вагона в системе эксплуатации грузовых вагонов на железнодорожном транспорте предусмотрено проведение ремонтов крупного объёма (деповских и капитальных). Деповской ремонт выполняют, для восстановления работоспособности, исправности и частичного восстановления ресурса вагона с заменой или восстановлением составных частей ограниченной номенклатуры. Капитальный ремонт выполняют, для восстановления работоспособности, исправности и полного или близкого к полному восстановлению ресурса вагона с заменой или восстановлением составных частей, включая базовые. Проводя капитальный ремонт, продлевают процесс эксплуатации.

Одним из важных для конструкций показателей долговечности является срок службы. Срок службы – это показатель долговечности (показатель единичного свойства надёжности). Согласно ГОСТ 27.002-89 срок службы определяет календарную продолжительность от начала эксплуатации объекта или её возобновления после ремонта до его перехода в предельное состояние, когда дальнейшая эксплуатация невозможна или не целесообразна, и требуется прекратить использование по назначению из-за:

- неустранимого снижения эффективности эксплуатации,
- морального износа,
- истощения технического ресурса,

- нарушения техники безопасности.

Нельзя точно предсказать момент, когда конструкция достигнет предельного состояния, поскольку он имеет вероятностный характер. Собственники грузовых вагонов стремятся максимально израсходовать заложенный в конструкцию ресурс, заинтересованы в увеличении срока службы эксплуатируемых вагонов и готовы восстанавливать (ремонттировать) неограниченное число раз.

Для оценки экономической эффективности и планирования расходов на жизненный цикл в технико-экономических расчётах часто используют усреднённую величину – нормативный срок службы или назначенный срок службы.

Под нормативным сроком службы (НСС) вагона будем понимать тот срок, исходя из которого, назначается процент амортизационных отчислений. Таким образом, нормативный срок службы вагона заданного типа подлежит оценке исходя из других принципов, нежели срок службы детали. Так, например, для оптимизации нормативного срока службы и системы технического обслуживания и ремонта используют экономический критерий – себестоимость единицы работы (пробега) вагона (СЕП) [25]. Расходы на текущее техническое содержание вагона, расходы других служб, участвующих в перевозочном процессе, определяют себестоимость единицы работы вагона, которая определяет на уровень тарифов на перевозки и доходы коммерческих перевозочных компаний.

В СЕП вагона условно выделяют две группы составляющих. Первая – это непосредственно расходы на содержание вагона, т.е. затраты вагонного хозяйства, зависящие от свойств надёжности, технического состояния, возраста и его цены. К ним относятся:

- затраты на приобретение вагона;
- затраты на капитальные ремонты;
- затраты на деповские ремонты;
- затраты на текущее техническое содержание.

Вторая – это удельные расходы других хозяйств отрасли (тяги, пути, движения и т.п.).

Как приведено в работах [35, 42] математическая формулировка задачи обоснования нормативного срока службы и системы технического обслуживания и ремонта имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(l_{ij}) \rightarrow \min; \\ l_{ij} \leq l_{БД}; \\ \left| \frac{M}{\Pi(l_{ij})} - \alpha \right| < \varepsilon, \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.1) \\ (5.2) \\ (5.3) \end{array}$$

где $f(l_{ij})$ – целевая функция (ЦФ), имеющая экономический характер; l_{ij} – j -й пробег вагона в пределах i -го ремонтного цикла; $l_{БД}$ – параметр безопасности вагона рассматриваемого типа; M – мощность ремонтной базы вагонов рассматриваемого типа; $\Pi(l_{ij})$ – потребность в плановом ремонте вагонов рассматриваемого типа для заданного года; α – коэффициент технологического запаса мощности ремонтной базы вагонов рассматриваемого типа; ε – требуемая точность расчётов (0,05÷0,1).

Объект оптимизационной задачи – математического аналог системы ремонта вагона (l_{ij}) представляет собой матрицу системы ТОиР, имеющую трапецеидальную форму:

$$(l_{ij}) = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1m_1} & & & \\ l_{21} & l_{22} & \dots & \dots & l_{2m_2} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \\ l_{n_1} & l_{n_2} & \dots & \dots & \dots & \dots & l_{n,m_n} \end{bmatrix}, \quad (5.4)$$

где l_{ij} – понимают j -й пробег вагона в пределах i -го ремонтного цикла; n – количество ремонтных циклов, т.е. число строк матрицы на единицу больше числа КР вагона за его срок службы; m_i – структура i -го ремонтного цикла $i = \overline{1, n}$,

т.е. количество пробегов вагона между соседними плановыми ремонтами, при этом количество ДР в пределах i -го ремонтного цикла на единицу меньше структуры этого ремонтного цикла (m_i); сумма элементов матрицы есть НСС вагона.

С помощью параметров m_1, m_2, \dots, m_n , удовлетворяющих условию:

$$m_1 < m_2 < \dots < m_n \quad (5.5)$$

при решении задачи задаётся структура рассматриваемых решений (сравнимых вариантов систем ТООиР вагона).

В качестве целевой функции объекта следует использовать показатель качества функционирования другого объекта, на ранг выше рассматриваемого. Так, при обосновании системы ТООиР и её параметров (т.е. для вагонного хозяйства) таковым является железнодорожный транспорт в целом. Благодаря этому, в качестве объекта оптимизации рассматривается многоуровневая иерархическая модель управления функционированием железнодорожного транспорта. Кроме того, при выборе целевой функции учтены возможности информационной базы отрасли, которая в настоящее время не позволяет решать задачу относительно себестоимости тонно-километровой работы. Тем самым в качестве целевой функция принята себестоимости единицы пробега вагона, которая имеет вид:

$$f(l_{ij}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} R_{КРi} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i-1} R_{ДРij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (a_{ij} l_{ij} + b_{ij} l_{ij}^2) + S - Q + \sum_k d_k}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} l_{ij}}, \quad (5.6)$$

где $R_{КРi}$ – стоимость i -го капитального ремонта вагона; $R_{ДРij}$ – стоимость j -го деповского ремонта в пределах i -го ремонтного цикла; a_{ij}, b_{ij} – параметры роста расходов на текущее техническое содержание в j -й периоде в пределах i -го ремонтного цикла для вагона рассматриваемого типа по мере его старения; S – цена вагона; Q – ликвидная стоимость вагона; d_k – затраты k -го хозяйства (кроме вагонного), приходящиеся на один вагон.

Доказательство того, что ЦФ (5.6) имеет глобальный минимум приведено в работе [83].

Целевая функция (5.6) явно или косвенно определена на множестве параметров, определяющих состояние железнодорожного транспорта. Поэтому при объективном изменении этих параметров неизбежно меняется и значение себестоимости. Следовательно, могут измениться и целесообразная величина остаточного назначенного срока службы вагона, и параметры его системы ТОиР.

Таким образом, становится актуальной задача: – оценить величину остаточного назначенного срока службы грузового вагона, отработавшего некоторый известный срок, и обосновать параметры его системы ТОиР с учётом изменений параметров эксплуатационной среды.

5.1 Методы оценки остаточного срока службы вагонов

Остаточный назначенный срок службы грузового вагона – это показатель, который для собственников подвижного состава имеет принципиальное значение, определяя доходность и прибыльность компаний. Встречаются два вида решаемых задач.

Первая задача связана с интересами собственников в максимальном увеличении срока полезного использования имеющихся вагонов, т.е. периода, в который он приносит доходы. Такая постановка объясняется тем, что с одной стороны, заложенный в техническую документацию НСС вагона [59] не имеет расчётного обоснования. С другой, вагоны одного года выпуска к моменту окончания НСС имеют разное фактическое техническое состояние, из-за различных режимов и условий эксплуатации, объёмов выполненных ремонтных работ и т.п. В результате этого, стало возможным введение в систему ремонта вагонов такого уникального для технических средств вида ремонта, как «капитальный ремонт с продлением срока полезного использования вагона» (КРП) [84].

Стоит отметить, что большое количество вагонов парка прошли такой капитальный ремонт, существенно уменьшив при этом спрос на новые грузовые вагоны. Поэтому в настоящее время этот вид ремонта запрещён на железнодорожном транспорте.

Например, НСС полувагона согласно [59], составляет 22 года. До проведения КРП вагону (по окончании НСС) экспертная комиссия принимала решение о возможности продления его срока эксплуатации вагона и допустимости проведения КРП. В соответствии с порядком продления срока полезного использования грузовых вагонов [58], величина продления согласно ТУ 32 ЦВ 2481-2003 составляла 11 лет для полувагонов, а параметры системы ТОиР назначались, как и у нового вагона. Срок, на который можно было продлить эксплуатацию (т.е. остаточный срок службы вагона), требует расчётного обоснования для каждого конкретного вагона в зависимости от его фактического

технического состояния. Однако методика такого расчётного обоснования отсутствует. Таким образом, в применявшейся методике отсутствует расчётное обоснование как целесообразного срока продления ресурса (остаточного нормативного срока службы), так и параметров системы ТОиР в этот период.

Вторая задача связана с интересами собственников в создании системы управления техническим состоянием вагонов, обеспечивающей максимум прибыльности и рентабельности компании в изменяющихся условиях эксплуатационной среды. При этом реализовать такую систему управления не возможно без использования методики обоснования остаточного срока службы вагона и определения параметров системы его ТОиР.

В настоящее время различными научными организациями и специалистами предлагаются несколько способов обоснования остаточного срока службы вагона. Большинство из них ориентировано на решение первой задачи и имеют упомянутый выше недостаток. Так, например, в работе [14] предложено оценивать остаточный срок службы вагона (остаточный ресурс) как сочетание трёх методик:

- определения остаточного ресурса вагона при разовых ударах, когда напряжения в элементах конструкции превышают предел временной прочности (для отказа в виде излома) или текучести (для отказа в виде деформации). При этом предполагается знание скорости изнашивания несущих элементов.

- определения работоспособности по критерию малоциклового усталости. При этом определяется расчётный остаточный срок службы при фактических значениях нагрузок, вычитается НСС и результат делится на коэффициент запаса.

- определения остаточного срока службы по критерию многоциклового усталости.

В основе этой методики положена оценка фактического состояния основных элементов вагона (по физическим параметрам) и прогнозирование их изменения при последующей эксплуатации.

В правилах проведения КРП заключение о возможности последующей эксплуатации конкретного вагона делают по величине отклонений толщины

элементов его несущих конструкций (прокатных профилей), полученных на основании толщинометрии с учётом точности измерений, а также результатах дефектоскопирования. Величину остаточного ресурса вагона получают, как правило, на основе расчёта напряженно-деформированного состояния конструкции с учётом скорости деградации этих элементов (например, коррозионного износа). В работе [81] для принятия решения о возможности выполнения КРП предложен расчётно-экспертно-статистический метод управления индивидуальным ресурсом. А в работах, например, [34] предлагается использовать для прогнозирования технического состояния вагона программный комплекс, реализующей FDMS-метод синтеза нечётких моделей прочности с использованием критериев коррозионного износа и усталостной прочности.

Эти методики направлены на то, чтобы на основе фактического состояния конструкции (с помощью толщинометрии и др. средств диагностики) спрогнозировать, через сколько времени физические параметры конструкции выдут из области допустимых значений (например, напряжений). При этом значения параметров (например, физические размеры) предельного состояния конструкции определяются по допускаемым напряжениям, числу циклов нагружения и т.п. Однако, как показано в разделе 4 приведённые методики оценивают ресурс не вагона как системы со связанной структурой, а лишь отдельных элементов. Проведение толщинометрии этих элементов возможно только в условиях специализированных ремонтных предприятий и проводится только по окончании назначенного срока службы вагона. Это означает, что прогноз, полученный по одному измерению, может иметь существенную ошибку. Кроме того, при прогнозировании остаточного ресурса используют детерминированные модели, несмотря на то, что наработка до предельного состояния имеет вероятностный характер.

В работах не рассматривается проблема оценки эффективности эксплуатации отремонтированных вагонов в последующий период, не определены СЕП вагона, показатель безопасности и т.п. Кроме того, в работах не ставится задача обоснования периодичности проведения ремонтов крупного объёма,

глубоких диагностик и других важных параметров системы ТОиР в период продлённого срока службы.

Экономисты предлагают оценивать остаточный нормативный срок службы с учётом величины «морального износа» конструкции. Когда при появлении более производительной и экономичной в эксплуатации модели, становится нецелесообразным использование существующей конструкции [80].

Проблеме оценки ресурса конструкции, определению нормативного срока службы (т.е. наработки конструкции до перехода её в предельное состояние) с учётом экономических критериев последующей эксплуатации посвящено большое количество как отечественных, так и зарубежных работ. Среди них можно отметить: [7, 28, 43, 57, 69]. В этих работах большинство специалистов склоняются к мнению, что срок службы это технико-экономическое понятие.

Ни в одной из перечисленных работ не ставится цель обосновать параметры системы технического обслуживания и ремонта вагона в рассматриваемый период.

Одной из работ, в которой выполняется не только оценка нормативно остаточного срока службы, но параметры его системы ТОиР – это работа В.Б. Митюхина [42].

Например, для параметров эксплуатационной среды, приведённых в таблице 5.1 и 5.2 соответствующей им оптимальной системы ТОиР со структурой 4-6-8-9 и НСС=30 лет, полученной в работе [Там же], СЕП вагона по формуле 5.6 составит 2449,11 у.е./год, её составляющие приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.1 – Условные затраты

№ п/п	Затраты	Обознач.	Знач. (в у.е.)
1	Цена полувагона	S	20000
2	Ликвидная цена полувагона	Q	2500
3	Норматив затрат на деповской ремонт	$R_{ДР}$	300
4	Норматив затрат на капитальный ремонт вагона	$R_{КР}$	1500
5	Издержки других хозяйств (кроме ВХ) за срок службы вагона	D	18000
6	Параметры роста затрат на ТО и ТР	a_i, b_i	[42, стр. 223]

Таблица 5.2 – Характеристики полувагона и ремонтного хозяйства

1	Мощность ремонтного хозяйства парка полувагонов	M	200000	Ваг/год
2	Параметр безопасности полувагона	$l_{БД}$	20	мес.
3	Технологический коэффициент запаса мощности ремонтного хозяйства парка полувагонов	α	1,2	-
4	Коэффициент точности определения потребности в ДР парка полувагонов	ε	0,1	-

Таблица 5.3 – Структура затрат на покупку и содержание полувагона.

Вариант системы ремонта	Структура затрат, у.е.					Итого	Себестоимость единицы пробега вагона, у.е./год
	TP	DP	KP	$S-Q$	D		
Оптимальная система ремонта ω_0	27052,5	6900	4500	17500	18000	73952,5	2449,11

Кроме того, в работе приведён пример оценки оптимального срока продления назначенного срока службы и параметров системы ТОиР на основе разработанной методики, использующей оптимизационную задачу (5.1)-(5.3). Задача и методика сформулированы относительно вагонов с истекшим назначенным сроком службы. В качестве объекта оптимизации используется матрица системы ТОиР в период последующей эксплуатации. При этом цена грузового вагона считается полностью амортизированной, и в выражении целевой функции она принимается равной нулю. Предлагаемый в работе подход отличается от рассмотренных выше, и состоит в том, что в период остаточного срока службы использование вагона по назначению должно быть экономически эффективным. При этом должны быть обеспечены безусловная безопасность движения (безопасность конструкции вагона) и учтены возможности существующей ремонтной базы.

Однако можно показать, что если в процессе эксплуатации вагона изменились параметры эксплуатационной среды, например, возросли (в силу объективных причин) на 10 % составляющие расходов на техническое содержание (Таблица 5.4), то при эксплуатации вагона по системе ремонта с

назначенными параметрами ω_0 (НСС=30 лет) СЕП увеличится на 3,7 % (Таблица 5.5).

Таблица 5.4 – Изменённые условные затраты

№ п/п	Затраты	Обозначение	Значение (в у.е.)
1	Цена полувагона	S	22000
2	Ликвидная цена полувагона	Q	2750
3	Норматив затрат на деповской ремонт	R_{DP}	330
4	Норматив затрат на капитальный ремонт вагона	R_{KP}	1650

Таблица 5.5 – Структура затрат на покупку и содержание полувагона.

Вариант системы ремонта	Структура затрат, у.е.					Итого	Себестоимость единицы пробега вагона, у.е./год
	TP	DP	KP	$S-Q$	D		
система ремонта ω_0	27884,1	7590	4950	19250	18000	77674,2	2540,8

Таким образом, при изменении параметров эксплуатационной среды входящих в оптимизационную задачу (5.1)-(5.3), СЕП вагона увеличится, а система ТОиР с назначенными параметрами перестаёт быть оптимальной.

В работе предложено при изменении параметров эксплуатационной среды выполнять перерасчёт параметров системы ТОиР и нормативного срока службы грузового вагона по методике (формулы 5.1 – 5.3). При этом для конструкций, отработавших некоторый период времени остаточный назначенный срок службы предлагается определять как разницу между полученным значением в новых условиях и текущим возрастом вагона.

Однако, стоит отметить, что упомянутая технология оценки остаточного назначенного срока службы и параметров системы ТОиР не может быть применена для вагонов, отработавших некоторый период времени. Это связано с тем, что объект оптимизации – матрица системы ТОиР, полученная при решении задачи (5.1)-(5.3), может быть применена в изменившихся условиях эксплуатации (при новых значениях параметров эксплуатационной среды) лишь для нового вагона. И на практике невозможно для существующих вагонов (отработавших некоторый период времени) изменить матрицу межремонтных периодов в той

части, которую вагон уже отработал. Т.е. методика не может быть применена для вагонов рассматриваемого типа, отработавших некоторый период времени по принятой ранее системе ремонта.

Поэтому для поддержания СЕП на оптимальном уровне при изменившихся параметрах эксплуатационной среды необходима более общая методика, которая позволяет учитывать фактически отработанный срок службы грузового вагона рассматриваемого типа, а также величину расходов запланированных и фактических. Для решения этой задачи предлагается новая методика расчётного обоснования остаточного срока службы грузового вагона конкретного типа и параметров его системы ТОиР.

5.2 Объект оптимизации

При исполнении вагонным хозяйством своих функций (рассмотренных ранее) необходимо использовать согласованные между собой технологии, для того чтобы вагон и транспорт в целом функционировали в оптимальном (относительно заранее выбранного критерия) режиме. Исторически исследования в вагонном деле ведутся в двух автономных направлениях:

- совершенствования технологии и организации ремонта, повышения эффективности функционирования ремонтной базы;
- совершенствования вагонных конструкций в части их прочностных и динамических качеств, повышения надёжности и долговечности.

Методическое объединение упомянутых линий позволяет заниматься совершенствованием транспортной системы в целом, а не изменением лишь отдельных её элементов. Такой подход даёт возможность оценивать новые конструктивные решения вагонов в рамках производственно-технологических систем. С этой целью предложена методика оптимизации параметров системы «вагон – эксплуатационная среда» в рамках решения единой оптимизационной задачи относительно наперёд заданного критерия. Под эксплуатационной средой вагона понимается следующая триада:

- процесс использования вагона по назначению, интенсивность которого определяется величиной его оборота и среднесуточным пробегом;
- динамическая, климатическая, технологическая и иная нагруженность вагона, интенсивность которой определяется темпом накопления повреждений в материале конструкции вагона, которые реализуются в виде отказов в случайные моменты времени;
- технический уровень предприятий вагонного хозяйства, который характеризуется мощностью, себестоимостью и качеством технического содержания вагонов.

Система «вагон – эксплуатационная среда» состоит из элементов различной природы и, следовательно, необходимо подобрать такое связующее звено между

запланированных КР $n_{KP}^0 = n^0 - 1 = 2$, количество запланированных деповских ремонтов $n_{DP}^0 = m_s^0 - n_{KP}^0 = 12 - 3 = 9$. Значения элементов матрицы l_{ij} – j -й межремонтный период в пределах i -го ремонтного цикла получены в результате решения задачи (5.1)-(5.3).

Для упрощения математических выкладок вместо двойного индекса межремонтных периодов будем использовать в дальнейшем одинарный, т.е. система ремонта будет $[l_i^0]$ будет представлена в виде вектора $[l_i^0]$:

$$[l_i^0] = \left| l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4 \quad l_5 \quad l_6 \quad l_7 \quad l_8 \quad l_9 \quad l_{10} \quad l_{11} \quad l_{12} \right|.$$

Введём в рассмотрение «точку» перерасчёта оптимальных межремонтных периодов и остаточного срока службы, соответствующую параметров состояния железнодорожного транспорта. Обозначим x – номер межремонтного периода, по окончании которого вагону выполняют назначенный по системе $[l_i^0]$ ремонт крупного объёма, после которого корректируется остаточный назначенный срок службы с учётом изменившихся параметров эксплуатационной среды ($x=1, \overline{m_s^0}$). Пусть $x=3$. Это означает, что после окончания периода l_3 вагону выполняют запланированный КР и очередной $(x+1)$ межремонтный период назначают с учётом скорректированных (перерассчитанных) значений вектора (матрицы) системы ремонта, полученных при решении задачи оценки остаточного нормативного срока службы грузового вагона. Этот откорректированный вектор обозначим $[l_j^x]$. Каждый элемент вектора l_j^x определяется соотношением:

$$[l_j^x] = \begin{cases} l_j^x = l_i, & j=i, & \text{если} & i \leq x, & i = \overline{1, m_s^0} \\ l_j^x = l_j^x, & & \text{если} & j > x & j = \overline{1, m_s^x} \end{cases}, \quad (5.7)$$

где m_s^x – количество межремонтных периодов в откорректированном векторе системы ремонта, которое может отличаться от ранее оптимального m_s^0 .

Например, если рассмотреть систему $[l_j^x]$ той же структуры, что и исходная $[l_i^0]$, т.е. частный случай $m_s^x = m_s^0$, то вектор $[l_j^x]$ будет иметь вид:

$$[l_j^x] = \left| l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4^x \quad l_5^x \quad l_6^x \quad l_7^x \quad l_8^x \quad l_9^x \quad l_{10}^x \quad l_{11}^x \quad l_{12}^x \right|,$$

где l_i , $i=\overline{1,3}$ – межремонтные периоды, отработанные вагоном и не подлежащие перерасчёту, т.е. в рамках решаемой задачи принимаются постоянными;

l_j^x – неизвестные (искомые) периоды, требующие перерасчёта в новых условиях эксплуатации. Их величина определяет искомый оптимальный остаточный нормативный срок службы вагона рассматриваемого типа:

$$ОНСС(l_j^x) = \sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x, \quad (5.8)$$

а сумма всех элементов полученного вектора (матрицы) определяет величину откорректированного нормативного срока службы вагона рассматриваемого типа:

$$НСС(l_j^x) = \sum_{j=1}^{m_s^x} l_j^x. \quad (5.9)$$

5.3 Математическая формулировка задачи

Пусть для некоторой конструкции вагона заданного типа в начальный момент времени обоснована система ТОиР $[l_i^0]$, определён НСС и себестоимость единицы его пробега. Конструкция проработала некоторый период времени, обозначим его T_0 . Предположим, что по его окончании изменяются параметры эксплуатационной среды, влияющие на решение оптимизационной задачи, например, на себестоимость единицы пробега.

Как показано выше (см. пример в разд. 5.1) при увеличении таких параметров возрастает себестоимость единицы пробега, при условии, что параметры системы ТОиР останутся прежними (т.е. $[l_i^0]$). Стоит вопрос: за счёт рационального подбора параметров системы ТОиР, а также остаточного нормативного срока службы сократить возросшую себестоимость единицы пробега вагона рассматриваемого типа в последующий период эксплуатации при безусловном обеспечении безопасности движения и соответствии возможностям вагоноремонтной базы.

Математическая постановка сформулированной задачи соответствует решению следующей задачи на условный экстремум:

$$\left[\begin{array}{l} f(l_{ij}^x) \rightarrow \min; \\ l_{ij}^x \leq l_{БДij}; \\ \left| \frac{M}{\Pi(l_{ij}^x)} - \alpha \right| < \varepsilon, \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.10) \\ (5.11) \\ (5.12) \end{array}$$

где $f(l_{ij}^x)$ – целевая функция, суть которой себестоимость единицы пробега вагона за остаточный срок службы;

$l_{БДij}$ – параметр безопасности вагона, под которым понимается максимально допустимый пробег вагона между глубокими диагностиками;

M – мощность ремонтного хозяйства вагонов рассматриваемого типа;

$P(t_{ij}^x)$ – потребность в глубоких диагностиках вагонов рассматриваемого типа (или в ДР в зависимости от стратегии этого ремонта) в течение интересующего нас календарного года;

α – коэффициент технологического запаса мощности ремонтного хозяйства вагонов рассматриваемого типа;

ε – требуемая точность расчётов (0,05÷0,1).

Дадим словесную формулировку решаемой задачи. На допустимом множестве матриц (t_{ij}^x) требуется выделить ту, на которой целевая функция $f(t_{ij}^x)$ принимает минимальное значение. Под допустимым множеством матриц (t_{ij}^x) понимаем такое, в котором каждая матрица одновременно удовлетворяет ограничению (5.11) и (5.12).

5.4 Целевая функция

В рассматриваемой задаче объект оптимизации отличается от объекта задачи (5.1)-(5.3). Кроме того при оценке себестоимости единицы пробега вагона отработавшего некоторый период времени l_0 потребуется учесть расходы в этот период на фактически выполненные ремонты и доходную составляющую, определяемую значением $f(l_{ij}^0)$. Поэтому целевая функция будет иметь более сложный вид, по сравнению с выражением (5.5).

Составляющими целевой функции при решении рассматриваемой задачи приняты следующие расходы:

- на приобретение вагона с учётом его ликвидной стоимости (амортизационные отчисления);
- на капитальные ремонты;
- на деповские ремонты;
- на техническое обслуживание и текущий ремонт (т.е. техническое содержание);
- других хозяйств отрасли (тяги, пути, движения и т.п.).

Рассмотрим эти составляющие. В дальнейшем для упрощения формы записи объекта оптимизации и составляющих целевой функции будем использовать вместо двойной индексации одинарную.

Удельные расходы на амортизацию (восстановление) стоимости вагона необходимы для того, чтобы в течение назначенного срока службы конструкции можно было постепенно возместить её стоимость, т.е. собранных средств должно быть достаточно для покупки нового вагона аналогичной конструкции.

При определении размера амортизационных отчислений, включаемых в СЕП вагона за остаточный назначенный срок службы, необходимо учитывать средства, полученные от предшествующего периода эксплуатации конструкции. Таким образом, суммарные расходы, которые необходимо возместить за остаточный назначенный срок службы составят величину:

$$F_S = (S^0 - Q^0) - \frac{S^0 - Q^0}{L_0} \sum_{i=1}^x l_i = (S^0 - Q^0) \frac{\sum_{i=x+1}^{m_s^0} l_i}{L_0}, \quad (5.13)$$

где S^0 – покупная цена вагона на начало его эксплуатации;

Q^0 – запланированная величина ликвидной стоимости вагона;

L_0 – запланированный назначенный срок службы вагона по системе $[l_i^0]$,

$$L_0 = \sum_{j=1}^{m_s^0} l_j;$$

l_i – i -й межремонтный пробег вагона по системе ремонта $[l_i^0]$;

m_s^0 – количество элементов вектора системы ремонта $[l_i^0]$;

x – количество периодов, отработанных вагоном до перехода на откорректированную систему ремонта $[l_i^x]$.

Не вызывает сомнений, что в процессе эксплуатации вагона цена аналогичной новой конструкции может измениться (например, возрасти). Это потребуется учесть при определении удельных расходов на амортизацию стоимости. Поэтому математическое выражение рассматриваемой составляющей СЕП вагона за остаточный назначенный срок службы будет иметь вид:

$$f_S = \frac{F_S + \Delta S}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x} = \frac{(S^0 - Q^0) \sum_{i=x+1}^{m_s^0} l_i^0 + \Delta S}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x}, \quad (5.14)$$

где ΔS – изменение покупной цены вагона;

m_s^x – количество элементов искомого вектора системы ремонта $[l_j^x]$.

Изменение удельных расходов на амортизацию стоимости вагона в зависимости от величины остаточного срока службы представлено на рисунке 5.1.

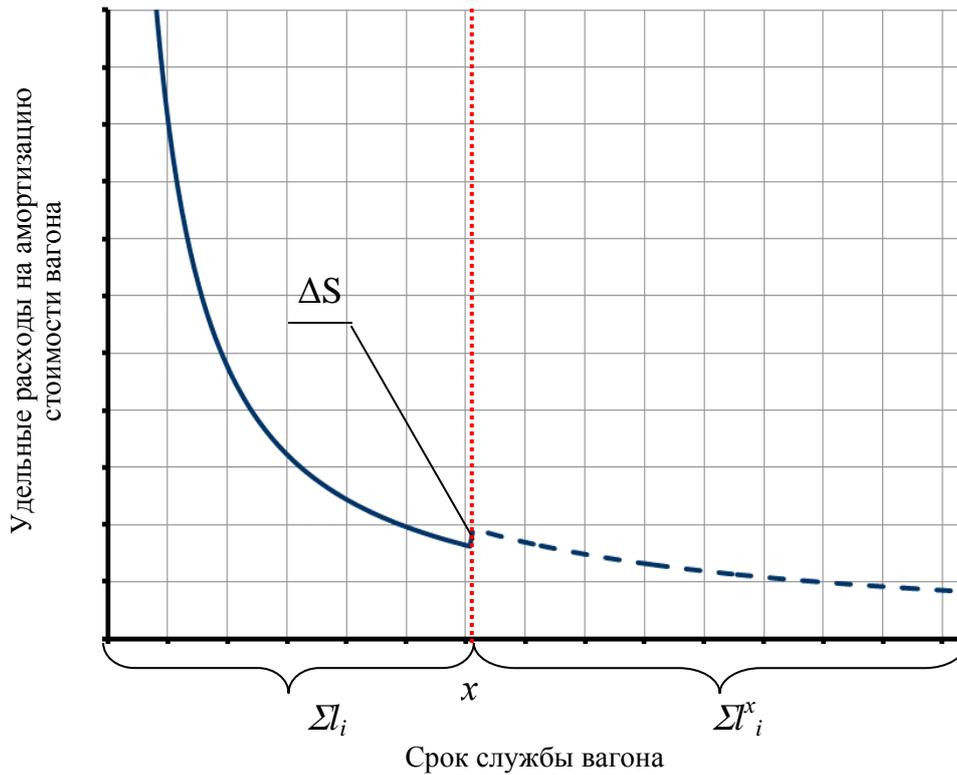


Рисунок 5.1 – Удельные расходы на амортизацию стоимости вагона в зависимости от остаточного срока службы

Удельные расходы на проведение капитального ремонта. Для выполнения КР требуются единовременные расходы, размер которых по своей величине, как правило, сопоставим с ценой вагона. Эти затраты, как и затраты на закупку вагона, возвращают в процессе последующей эксплуатации за счёт включения в себестоимость отчислений на КР.

Разница суммарных затрат на выполненные КР по системе $[l_i^0]$ и возмещённых за предшествующий период эксплуатации (заложенных в себестоимость единицы пробега вагона) определяет величину расходов, которые необходимо получить от эксплуатации в течение последующего остаточного назначенного срока службы. Их величина составит:

$$F_{KP} = \sum_{i=1}^{n_{KP}^v} RKR_i^0 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{KP}^0} RKR_i^0}{L_0} \sum_{i=1}^x l_i, \quad (5.15)$$

где RKR_i^0 – затраты на i -й КР вагона рассматриваемого типа;

n_{KP}^0 – количество КР, запланированных по системе ремонта $[l_i^0]$;

n_{KP}^V – количество КР, фактически выполненных из запланированных по системе ремонта $[l_i^0]$;

$\sum_{i=1}^{n_{KP}^0} RKR_i^0$ – суммарные расходы на КР, запланированных для нового вагона;

$\sum_{i=1}^{n_{KP}^V} RKR_i^0$ – суммарные расходы на фактически выполненные КР;

$\sum_{i=1}^x l_i$ – фактически выполненная наработка вагона от начала эксплуатации.

В качестве расходов на один КР будем в дальнейшем использовать величину средних расходов на КР за срок службы (RKR^0), которые не будут изменяться от номера ремонта, тогда запишем:

$$F_{KP} = n_{KP}^V \cdot RKR^0 - \frac{n_{KP}^0 \cdot RKR^0}{L_0} \sum_{i=1}^x l_i.$$

С учётом возможного изменения количества КР за остаточный срок службы, а также изменения его средней стоимости, величина удельных расходов на КР за остаточный срок службы будет определяться:

$$f_{KP}(l_j^x) = \frac{F_{KP} + \Delta R_{KP}}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x}, \quad (5.16)$$

где ΔR_{KP} – суммарные расходы на КР вагона за остаточный срок службы, которые определяются:

$$\Delta R_{KP} = \sum_{j=1}^{n_{KP}^x} RKR_i^x = n_{KP}^x \cdot RKR^x, \quad (5.17)$$

где RKR^x – затраты на проведение КР в течение остаточного назначенного срока службы, которые могут отличаться от запланированных для нового вагона RKR^0 ,

n_{KP}^x – количество КР, запланированных в течение остаточного назначенного срока службы в соответствии с вектором $[l_j^x]$.

Представим RKR^x как сумму двух составляющих:

$$RKR^x = RKR^0 + \Delta RKR^x, \quad (5.18)$$

где ΔRKR^x – изменение средней стоимости проведения вагону КР.

Количество КР n_{KP}^x можно представить в виде:

$$n_{KP}^x = n_{KP}^0 - n_{KP}^V + \Delta n_{KP}^x, \quad (5.19)$$

где Δn_{KP}^x – изменение количества запланированных КР за остаточный срок службы вагона.

Тогда (5.16) можно представить в виде:

$$f_{KP}(l_j^x) = \frac{n_{KP}^V \cdot RKR^0 - \frac{n_{KP}^0 \cdot RKR^0}{L_0} \sum_{i=1}^x l_i}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x} +$$

$$+ \frac{n_{KP}^0 \cdot RKR^0 - n_{KP}^V \cdot RKR^0 + \Delta n_{KP}^x \cdot RKR^0 + n_{KP}^x \cdot \Delta RKR^x}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x} = \dots$$

после упрощения получим окончательно выражение

$$f_{KP}(l_j^x) = \frac{\frac{n_{KP}^0 \cdot RKR^0}{L_0} \sum_{i=x+1}^{m_s^0} l_i + \Delta n_{KP}^x \cdot RKR^0 + n_{KP}^x \cdot \Delta RKR^x}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x}. \quad (5.20)$$

Удельные расходы на КР графический представлены на рисунке 5.2

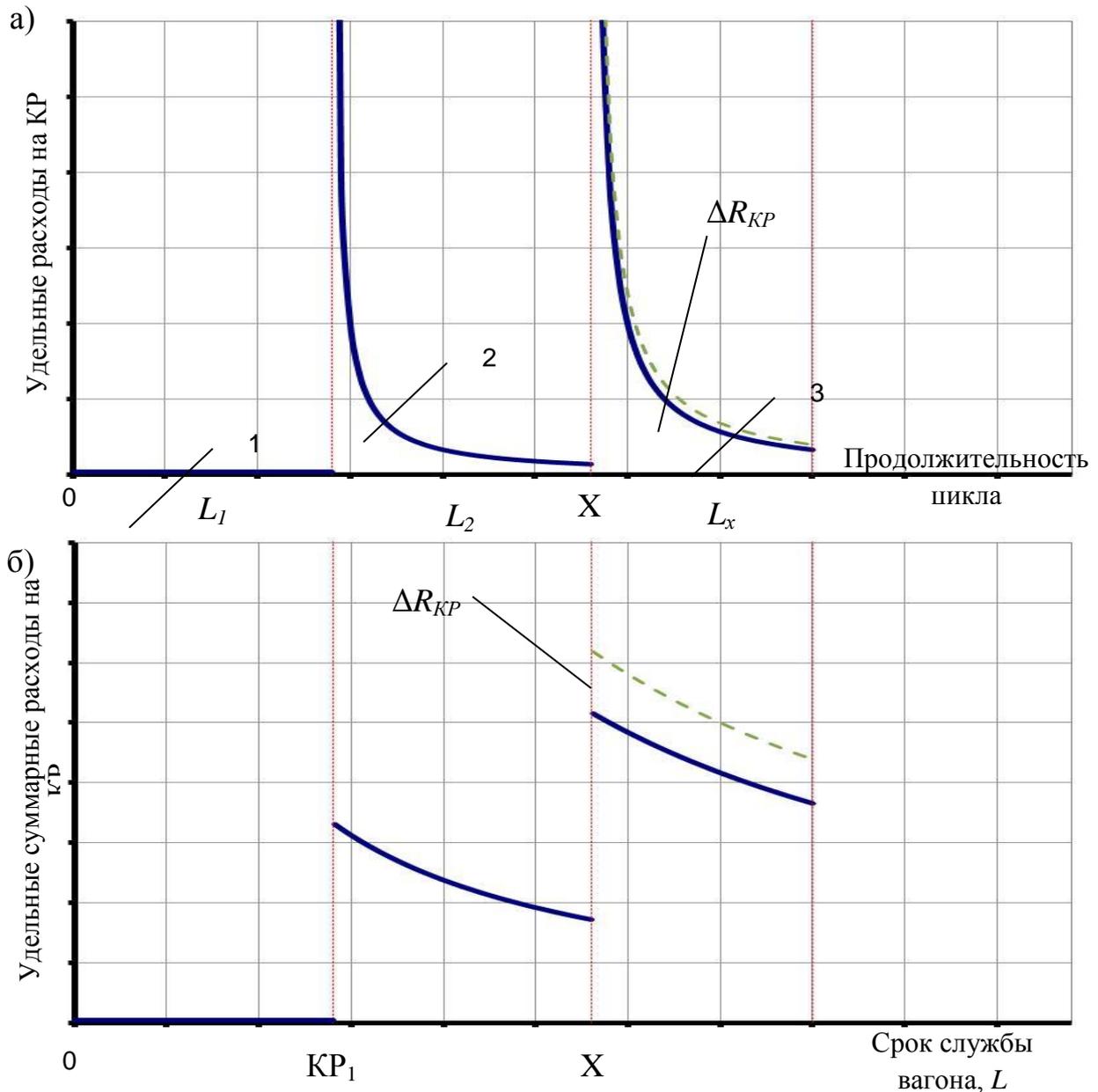


Рисунок 5.2 – Изменение расходов на капитальные ремонты:

- а) удельные расходы в зависимости от продолжительности ремонтного цикла;
 б) удельные суммарные расходы в зависимости от срока службы. L_1 и L_2 – продолжительность первого и второго ремонтного цикла; L_x – продолжительность ремонтного цикла в остаточный нормативный срок службы вагона; X – момент времени в который выполняется оценка остаточного нормативного срока службы.

Как видно из рисунка в первом ремонтном цикле (продолжительностью – L_1) удельные затраты на КР равны 0, поскольку используется ресурс, заложенный при изготовлении вагона. Во втором цикле (график 2) чем больше срок работы до следующего КР, тем меньше величина амортизационных отчислений в течение

этого цикла. Третьем цикле (график 3) КР потребуется выполнить по более высокой стоимости, чем было запланировано, т.е. расходы на КР увеличились относительно запланированных на величину $\Delta R_{КР}$. Кроме того, функция удельных суммарных расходов имеет конечные разрывы, величина которых определяется стоимостью соответствующего КР.

Удельные расходы на проведение деповских ремонтов (ДР). Эти ремонты также относят к ремонтам крупного объёма, выполнение которых планируется аналогично КР.

Таким образом, суммарные расходы на выполненные ДР, возмещаемые в течение остаточного назначенного срока службы составят:

$$F_{ДР} = \sum_{i=1}^{n_{ДР}^V} RDR_i^0 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{ДР}^0} RDR_i^0}{L^0} \sum_{i=1}^x l_i^0, \quad (5.21)$$

где RDR_i^0 – затраты на i -й ДР вагона рассматриваемого типа;

$n_{ДР}^0$ – количество ДР, запланированных по системе ремонта $[l_i^0]$;

$n_{ДР}^V$ – количество ДР, фактически выполненных из запланированных по системе ремонта $[l_i^0]$;

$\sum_{i=1}^{n_{ДР}^0} RDR_i^0$ – суммарные расходы на ДР, запланированных для нового вагона;

$\sum_{i=1}^{n_{ДР}^V} RDR_i^0$ – суммарные расходы на фактически выполненные ДР.

В качестве расходов на один ДР будем в дальнейшем использовать величину средних расходов за срок службы (RDR^0), которые не будут изменяться от номера ремонта, тогда получим:

$$F_{ДР} = n_{ДР}^V \cdot RDR^0 - \frac{n_{ДР}^0 \cdot RDR^0}{L_0} \sum_{i=1}^x l_i.$$

С учётом возможного увеличения стоимости одного ДР и их количества в течение планируемого остаточного назначенного срока службы удельные расходы на ДР будут определяться:

$$f_{\text{ДР}}(l_j^x) = \frac{F_{\text{ДР}} + \Delta R_{\text{ДР}}}{\sum_{j=1}^{m_x} l_j^x}, \quad (5.22)$$

где $\Delta R_{\text{ДР}}$ – суммарные расходы на ДР вагона за остаточный срок службы, которые определяются:

$$\Delta R_{\text{ДР}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{ДР}}^x} RDR_i^x = n_{\text{ДР}}^x \cdot RDR^x, \quad (5.23)$$

где RDR^x – затраты на проведение ДР в течение остаточного назначенного срока службы, которые могут отличаться от запланированных для нового вагона RDR^0 , $n_{\text{ДР}}^x$ – количество ДР, запланированных в течение остаточного назначенного срока службы в соответствии с вектором $[l_j^x]$.

Представим RDR^x как сумму двух составляющих:

$$RDR^x = RDR^0 + \Delta RDR^x, \quad (5.24)$$

где ΔRDR^x – изменение средней стоимости проведения вагону ДР.

Количество ДР $n_{\text{ДР}}^x$ можно представить в виде:

$$n_{\text{ДР}}^x = n_{\text{ДР}}^0 - n_{\text{ДР}}^V + \Delta n_{\text{ДР}}^x, \quad (5.25)$$

где $\Delta n_{\text{ДР}}^x$ – изменение количества запланированных ДР за остаточный срок службы вагона.

Тогда после упрощения, получим окончательное выражение:

$$f_{\text{ДР}}(l_j^x) = \frac{\frac{n_{\text{ДР}}^0 \cdot RDR^0}{L_0} \sum_{i=x+1}^{m_s^0} l_i + \Delta n_{\text{ДР}}^x \cdot RDR^0 + n_{\text{ДР}}^x \cdot \Delta RDR^x}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x}. \quad (5.26)$$

Чем продолжительней период времени до следующего ДР, тем меньше удельные затраты на ДР (Рисунок 5.3).

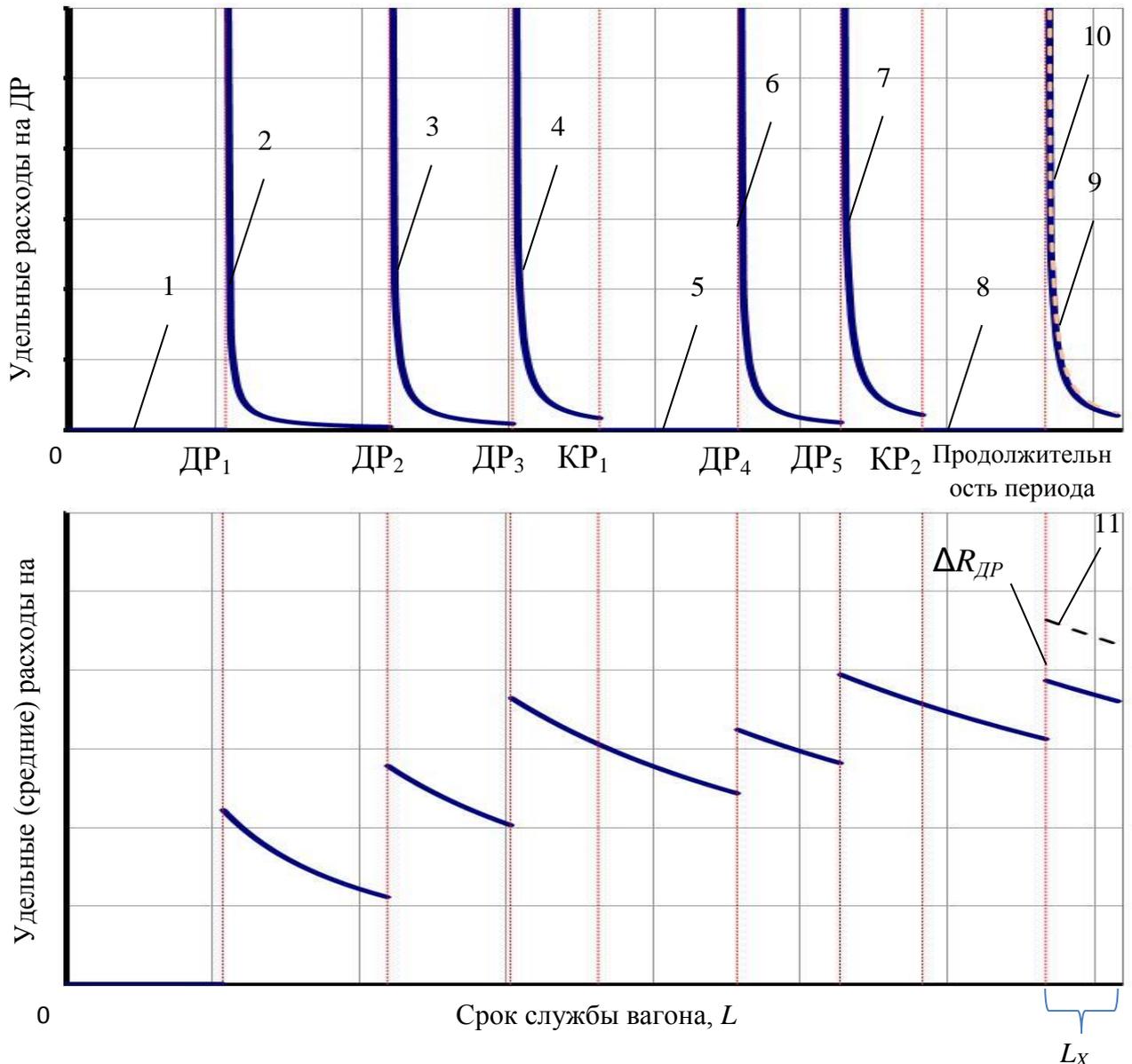


Рисунок 5.3 – Изменение удельных расходов на деповские ремонты:

где 1,2,3...6 – изменение удельных расходов на ДР в 1,2,3...6 периоде; 11 – изменение средних удельных расходов от срока службы с учётом роста цены ДР.

а) – удельные расходы в зависимости от продолжительности межремонтного периода;

б) – средние удельные расходы в зависимости от срока службы.

Как видно в течение всего первого межремонтного периода величина удельных затрат на ДР равна нулю (Рисунок 5.3 график 1), поскольку в этот период используется ресурс, заложенный в новом вагоне. Аналогично после

каждого ДР, удельные расходы на ДР также равны нулю на графике представлено 5 и 8, поскольку в этот период расходуется ресурс, восстановленный при КР.

График изменения суммарных удельных (средних) расходов на проведение ДР с учётом изменения стоимости ДР в остаточный срок службы имеет кусочно-непрерывный вид (Рисунок 5.3 график 11). Как видно из рисунка 5.3, с увеличением межремонтных периодов происходит уменьшение удельных затрат на ДР. Однако, при этом следует ожидать возрастания расходов на текущие ремонты и техническое обслуживание (ТР). Аналогичная связь существует между ДР и КР, а также между КР и ТР.

Включённые в СЕП вагона затраты на текущие ремонты и техническое обслуживание не являются постоянными. ТР производится по мере необходимости при обнаружении отказов вагона.

Затраты на выполнение технического обслуживания и ТР имеют дискретный характер, т.е. изменяются неравномерно во времени. Как правило, расходы на проведение технического обслуживания и ТР невелики по сравнению со стоимостью плановых ремонтов и скачкообразно возрастают во время проведения соответствующих работ.

Суммарные расходы на техническое обслуживание и ТР, которые переносятся на последующий срок эксплуатации и возмещаются в течение остаточного назначенного срока службы составят:

$$F_{TP} = \sum_{i=1}^x (a_i l_i + b_i l_i^2) - \frac{\sum_{i=1}^{m_s^0} (a_i l_i + b_i l_i^2)}{L^0} \sum_{i=1}^x l_i^0, \quad (5.27)$$

где a_i и b_i – коэффициенты роста затрат по мере старения вагона на i – м межремонтном периоде.

С учётом количества планируемых расходов на техническое обслуживание и ТР в последующий период эксплуатации удельные расходы будут определяться:

$$f_{TP}(l_j^x) = \frac{F_{TP} + \sum_{j=x+1}^{m_s^x} (a_j^x l_j^x + b_j^x l_j^{x^2})}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x}, \quad (5.28)$$

где a_j^x и b_j^x – коэффициенты роста затрат на техническое обслуживание и ТР по мере старения вагона на j -м межремонтном периоде планируемого остаточного назначенного срока службы.

Методика оценки параметров роста затрат на техническое обслуживание и ТР грузовых вагонов подробно рассмотрена в [83]. При этом учитываются расходы на однократный контроль осмотрщиком технического состояния вагона на ПТО, расходы на подготовку вагона к перевозкам и расходы на выполнение текущего отцепочного ремонта.

Графическое представление изменения удельных расходов на техническое обслуживание и ТР в межремонтных периодах в зависимости от продолжительности межремонтного пробега показано на рисунке 5.4.

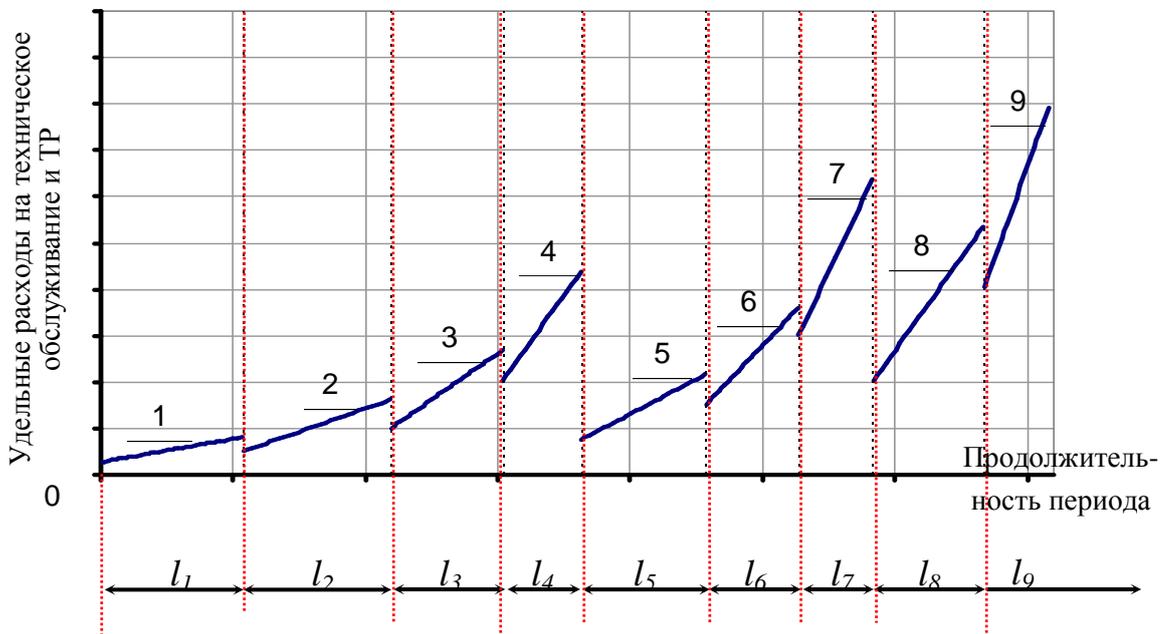


Рисунок 5.4 – Изменение удельных расходов на техническое обслуживание и ТР

где 1,2,3...9 – изменение удельных расходов на ТР в 1,2,3...9 периоде.

После проведения очередного ДР и КР удельные затраты на техническое обслуживание в межремонтном периоде снижаются до нуля, но затем по мере увеличения пробега возрастают по линейному закону, причём интенсивность упомянутого возрастания растёт от одного периода и ремонтного цикла к другому по мере старения вагона.

При определении СЕП работы вагона необходимо учитывать затраты других хозяйств, организующих, выполняющих и обеспечивающих перевозочный процесс. Обозначим через d_1, d_2, d_3 и d_4 – издержки других хозяйств соответственно локомотивного, путевого, грузового движения, и хозяйства сигнализации, централизации, блокировки и связи. Таким образом, суммарные издержки других хозяйств, переносимые на последующий период эксплуатации составят:

$$F_d = \frac{\sum_{i=1}^H d_i^0}{L^0} \sum_{i=x+1}^{m_s^0} l_i, \quad (5.29)$$

где d_i – суммарные издержки за назначенный срок службы вагона i -го хозяйства;
 H – количество хозяйств.

Величина удельных расходов других хозяйств, входящих в себестоимость единицы работы вагона в последующий период эксплуатации с учётом их возможного изменения составят:

$$f_d(l_j^x) = \frac{F_d + \Delta D}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x} = \frac{\sum_{i=1}^H d_i^0}{L^0} \frac{\sum_{i=x+1}^{m_s^0} l_i^0 + \Delta D}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x}, \quad (5.30)$$

где ΔD – изменение суммарных издержек в течение остаточного назначенного срока службы.

Выше были рассмотрены отдельные составляющие СЕП вагона, с учётом их изменённых значений для последующего планируемого периода эксплуатации – искомого остаточного назначенного срока службы. Таким образом, целевая

функции с учётом полученных выражений её составляющих (5.14), (5.20), (5.26), (5.28), (5.30) будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 f(l_j^x) &= f_s + f_{KP} + f_{DP} + f_{TP} + f_d = \\
 &= \frac{\left(S^0 - Q^0 \right) \sum_{i=x+1}^{m_s^0} l_i + \Delta S}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x} + \frac{\frac{n_{KP}^0 \cdot RKR^0}{L_0} \sum_{i=x+1}^{m_s^0} l_i + \Delta n_{KP}^x \cdot RKR^0 + n_{KP}^x \cdot \Delta RKR^x}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x} + \\
 &+ \frac{\frac{n_{DP}^0 \cdot RDR^0}{L_0} \sum_{i=x+1}^{m_s^0} l_i + \Delta n_{DP}^x \cdot RDR^0 + n_{DP}^x \cdot \Delta RDR^x}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x} + \\
 &+ \frac{\sum_{i=1}^x \left(a_i l_i + b_i l_i^2 \right) - \frac{\sum_{i=1}^{m_s^0} \left(a_i l_i + b_i l_i^2 \right)}{L^0} \sum_{i=1}^x l_i^0 + \sum_{j=x+1}^{m_s^x} \left(a_j^x l_j^x + b_j^x l_j^{x^2} \right)}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x} + \\
 &+ \frac{\sum_{i=1}^H d_i^0 \sum_{i=x+1}^{m_s^0} l_i^0 + \Delta D}{\sum_{j=x+1}^{m_s^x} l_j^x}.
 \end{aligned} \tag{5.31}$$

Существование минимума целевой функции докажем графически. Как показано на рисунке 5.5 с помощью графического суммирования (сложения графиков) составляющих СЕП удельных расходов существование возрастающих и убывающих составляющих обуславливает существование минимального значения целевой функции. При этом можно отметить, что, как видно из рисунка,

минимум целевой функции в новых условиях (с учётом изменений расходов на содержание вагона) за остаточный срок службы достигается в момент окончания второго ремонтного цикла. Таким образом, существует правило, что остаточный срок службы вагона, для которого СЕП имеет наименьшее значение, всегда будет состоять из целого числа ремонтных циклов.

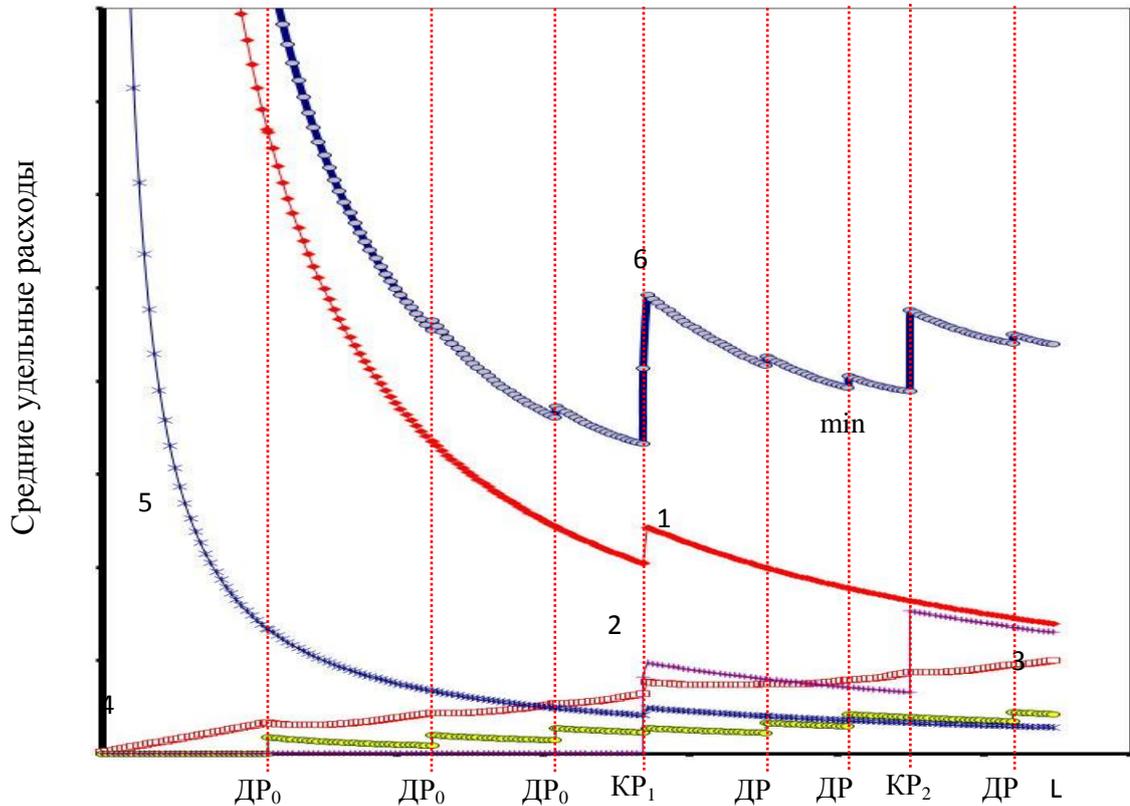


Рисунок 5.5 – Изменение составляющих целевой функции

$ДР_0$ – выполненные ремонты, не предусматривают к пересмотру;

1 – удельные расходы на амортизацию стоимости вагона; 2 – средние удельные расходы на КР;

3 – средние удельные расходы на ДР; 4 – средние удельные расходы на обслуживание и ТР;

5 – средние удельные расходы других хозяйств; 6 – СЕП – общие удельные расходы.

5.5 Технология поиска экстремума целевой функции

Рассмотрим технологию поиска экстремума целевой функции. На примере простейшей структуры системы ремонта «2-2» (Рисунок 5.6) подробно рассмотрим методику решения задачи.

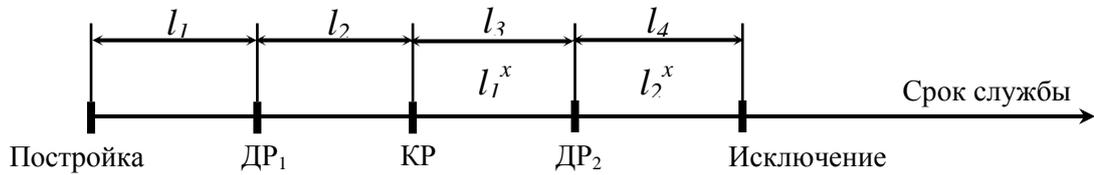


Рисунок 5.6 – Графическое представление структуры «2-2»

Пусть существующей системе ТОиР вагона соответствует матрица межремонтных пробегов $[l_i^0]$, действующая с момента его постройки, которая имеет вид:

$$[l_i^0] = \begin{pmatrix} l_1 & l_2 \\ l_3 & l_4 \end{pmatrix}. \quad (5.32)$$

Эта система имеет следующие параметры:

количество ремонтных циклов $n_0=2$, т.е. структура двухцикловая;

количество запланированных КР: $n_{КР}^0 = (n_0-1)=1$;

количество межремонтных интервалов $m_s^0=4$;

количество запланированных ДР: $n_{ДР}^0 = (m_s^0 - n_0) - 1 = 2$.

Необходимо для вагона, отработавшего некоторый период времени, например, равный l_1+l_2 , подобрать такие межремонтные периоды последующего периода эксплуатации третий и четвёртый по счёту, обозначим их l_3^x и l_4^x , чтобы СЕП была наименьшей при новых параметрах эксплуатационной среды:

$$(l_j^x) \rightarrow \min . \quad (5.33)$$

При этом, искомый вектор межремонтных пробегов имеет вид:

$$l_j^x = |l_1 \quad l_2 \quad l_3^x \quad l_4^x|, \quad (5.34)$$

где l_1 и l_2 – межремонтные периоды, отработанные вагоном, в рамках рассматриваемой задачи не подлежат оптимизации и принимаются постоянными;

l_3^x и l_4^x – межремонтные периоды предстоящего периода эксплуатации, оптимальные значения которых требуется получить и которые в сумме определяют оптимальный остаточный назначенный срок службы вагона.

Рассмотрим составляющие целевой функции (5.31).

Удельные расходы на амортизацию стоимости вагона в соответствии с (5.14), имеют вид:

$$f_S(l_j^x) = \frac{S^0 - Q^0 \sum_{i=2+1}^4 l_i + \Delta S}{\sum_{j=2+1}^4 l_j^x} = \frac{(S^0 - Q^0)(l_3 + l_4) + L_0 \cdot \Delta S}{L_0 \cdot (l_3^x + l_4^x)}, \quad (5.35)$$

где S^0 и Q^0 – покупная цена и ликвидная стоимость вагона;

ΔS – увеличение стоимости вагона;

$L^0 = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$ – запланированный нормативный срок службы вагона;

l_i – отработанные межремонтные периоды;

l_j^x – искомые оптимальные межремонтные периоды.

Удельные расходы на КР в соответствии с (5.20) имеют вид:

$$f_{KP}(l_j^x) = \frac{\frac{1 \cdot RKR^0}{L^0} \sum_{i=2+1}^4 l_i + 0 \cdot RKR^0 + 1 \cdot \Delta RKR^x}{\sum_{j=2+1}^4 l_j^x} = \frac{RKR^0(l_3 + l_4) + L_0 \cdot \Delta RKR^x}{L_0 \cdot (l_3^x + l_4^x)}, \quad (5.36)$$

где RKR^0 – запланированные затраты на единственный КР;

ΔRKR^x – величина, на которую в новых условиях увеличивается стоимость КР.

Удельные расходы на ДР в соответствии с (5.26) имеют вид:

$$\begin{aligned}
 f_{DP}(l_j^x) &= \frac{2 \cdot RDR^0 \sum_{i=2+1}^4 l_i + 0 \cdot RDR^0 + 2 \cdot \Delta RDR^x}{L^0 \sum_{j=2+1}^4 l_j^x} = \\
 &= \frac{2 \cdot RDR^0 (l_3 + l_4) + 2 \cdot L_0 \cdot \Delta RDR^x}{L_0 \cdot (l_3^x + l_4^x)}, \quad (5.37)
 \end{aligned}$$

где RDR^0 – запланированные затраты на ДР;

ΔRDR^x – увеличение стоимости ДР.

Удельные расходы на техническое обслуживание и ТР:

$$\begin{aligned}
 f_{TP}(l_j^x) &= \frac{\sum_{i=1}^2 (a_i l_i + b_i l_i^2) - \frac{\sum_{i=1}^4 (a_i l_i + b_i l_i^2)}{L^0} \sum_{i=1}^2 l_i + \sum_{j=2+1}^4 (a_j l_j^x + b_j l_j^{x^2})}{(l_3^x + l_4^x)} = \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^2 (a_i l_i + b_i l_i^2) \cdot \sum_{i=3}^4 l_i - \sum_{i=3}^4 (a_i l_i + b_i l_i^2) \cdot \sum_{i=1}^2 l_i + \sum_{j=2+1}^4 (a_j l_j^x + b_j l_j^{x^2}) \cdot L_0}{L_0 \cdot (l_3^x + l_4^x)}, \quad (5.38)
 \end{aligned}$$

где a_i и b_i – коэффициенты роста затрат на техническое обслуживание и ТР по мере старения вагона в i -ом межремонтном периоде;

a_j и b_j – коэффициенты роста затрат на техническое обслуживание и ТР по мере старения вагона в j -ом межремонтном периоде.

Введём обозначение:

$$A_0 = \sum_{i=1}^2 (a_i l_i + b_i l_i^2) \cdot \sum_{i=2+1}^4 l_i - \sum_{i=2+1}^4 (a_i l_i + b_i l_i^2) \cdot \sum_{i=1}^2 l_i. \quad (5.39)$$

Тогда получим:

$$f_{TP}(l_j^x) = \frac{A_0 + L_0 \cdot \sum_{j=2+1}^4 (a_j l_j^x + b_j l_j^{x^2})}{L_0 \cdot (l_3^x + l_4^x)}. \quad (5.40)$$

Удельные расходы других хозяйств:

$$f_d(l_j^x) = \frac{\sum_{i=1}^H d_i^0 - \frac{\sum_{i=1}^H d_i^0}{L^0} \sum_{i=1}^2 l_i^0 + \Delta D}{\sum_{j=2+1}^4 l_j^x} = \frac{\sum_{i=1}^H d_i^0 \cdot (l_3 + l_4) + L_0 \cdot \Delta D}{L_0 \cdot (l_3^x + l_4^x)}. \quad (5.41)$$

Для СЕП вагона:

$$f(l_j^x) = f_S + f_{KP} + f_{ДР} + f_{ТР} + f_d; \quad (5.42)$$

необходимое условие экстремума будет иметь вид:

$$\frac{\partial (f_S + f_{KP} + f_{ДР} + f_{ТР} + f_d)}{\partial l_j^x} = 0, \quad (j = \overline{3,4}). \quad (5.43)$$

Выпишем частные производные рассмотренных составляющих:

$$\frac{\partial f_S}{\partial l_j^x} = - \frac{(S_0 - Q_0) \cdot (l_3 + l_4) + L_0 \cdot \Delta S}{L_0 \cdot (l_3^x + l_4^x)^2}, \quad j = \overline{3,4}; \quad (5.44)$$

$$\frac{\partial f_{KP}}{\partial l_j^x} = - \frac{RKR^0 \cdot (l_3 + l_4) + L_0 \cdot \Delta RKR^x}{L_0 \cdot (l_3^x + l_4^x)^2}, \quad j = \overline{3,4}; \quad (5.45)$$

$$\frac{\partial f_{ДР}}{\partial l_j^x} = - \frac{2 \cdot RDR^0 (l_3 + l_4) + L_0 \cdot \Delta RDR^x}{L_0 \cdot (l_3^x + l_4^x)^2}, \quad j = \overline{3,4}; \quad (5.46)$$

$$\frac{\partial f_{ТР}}{\partial l_j^x} = \frac{L_0 \cdot (a_j + 2b_j l_j^x) \sum_{j=3}^4 l_j^x - \left(A_0 + L_0 \cdot \sum_{j=3}^4 (a_j l_j^x + b_j l_j^{x^2}) \right)}{L_0 \cdot (l_3^x + l_4^x)^2}, \quad j = \overline{3,4}; \quad (5.47)$$

$$\frac{\partial f_d}{\partial l_j^x} = - \frac{\left(\sum_{i=1}^H d_i \cdot (l_3 + l_4) + L_0 \cdot \Delta D \right)}{L_0 \cdot (l_3^x + l_4^x)^2}, \quad j = \overline{3,4}. \quad (5.48)$$

Тогда имеем:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f}{\partial l_j^x} = & \frac{-\left((S_0 - Q_0) \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta S\right) - \left(RKR^0 \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta RKR^x\right)}{L^0 \cdot (l_3^x + l_4^x)^2} + \\
& + \frac{-\left(2 \cdot RDR^0 \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta RDR^x\right)}{L^0 \cdot (l_3^x + l_4^x)^2} + \\
& + \frac{L_0 \cdot \left(a_j + 2b_j \cdot l_j^x\right) \sum_{j=3}^4 l_j^x - \left(A_0 + L_0 \cdot \sum_{j=3}^4 \left(a_j l_j^x + b_j l_j^{x^2}\right)\right)}{L^0 \cdot (l_3^x + l_4^x)^2} + \\
& - \frac{\left(\sum_{i=1}^H d_i \cdot \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta D\right)}{L^0 \cdot (l_3^x + l_4^x)^2} = 0; j = \overline{3, 4}.
\end{aligned} \tag{5.49}$$

Таким образом, для нахождения оптимальных значений l_3^x и l_4^x необходимо решить полученную систему уравнений:

$$\left[\begin{aligned} & -\left((S_0 - Q_0) \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta S\right) - \left(RKR^0 \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta RKR^x\right) - \\ & -\left(2 \cdot RDR^0 \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta RDR^x\right) + \end{aligned} \right] \tag{5.50}$$

$$+ \left[L_0 \left(a_3 + 2b_3 l_3^x\right) \sum_{j=3}^4 l_j^x - \left(A_0 + L_0 \sum_{j=3}^4 \left(a_j l_j^x + b_j l_j^{x^2}\right)\right) \right] - \left(\sum_{i=1}^H d_i \cdot \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta D\right) = 0$$

$$\left[\begin{aligned} & -\left((S_0 - Q_0) \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta S\right) - \left(RKR^0 \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta RKR^x\right) - \\ & -\left(2 \cdot RDR^0 \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta RDR^x\right) + \end{aligned} \right] \tag{5.51}$$

$$+ \left[L_0 \left(a_4 + 2b_4 l_4^x\right) \sum_{j=3}^4 l_j^x - \left(A_0 + L_0 \sum_{j=3}^4 \left(a_j l_j^x + b_j l_j^{x^2}\right)\right) \right] - \left(\sum_{i=1}^H d_i \cdot \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta D\right) = 0$$

Перейдём к более простой эквивалентной системе уравнений. Для этого, вычитаем (5.51) из (5.50), получим соответственно уравнение:

$$a_3 + 2b_3 l_3^x - a_4 - 2b_4 l_4^x = 0. \quad (5.52)$$

К этому уравнению добавим, например, (5.50):

Используя (5.52), выразим l_4^x через l_3^x :

$$l_4^x = \frac{b_3}{b_4} l_3^x + \frac{a_3 - a_4}{2b_4}. \quad (5.53)$$

Таким образом, получили формулу для определения l_4^x . Подставляя полученное выражение в (5.50), получим квадратное уравнение относительно первого неизвестного межремонтного периода в течение остаточного срока службы вагона l_3^x следующего вида:

$$A \cdot (l_3^x)^2 + B \cdot l_3^x + C = 0, \quad (5.54)$$

где коэффициенты А, В и С имеют вид:

$$A = b_3 + b_3^2 \left(\frac{1}{b_4} \right); \quad (5.55)$$

$$B = b_3 \left[a_3 \frac{1}{b_4} - \frac{a_4}{b_4} \right]; \quad (5.56)$$

$$C = \frac{(a_3 - a_4)^2}{4b_4} - \left((S_0 - Q_0) \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta S \right) - \left(RKR^0 \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta RKR^x \right) - \left(2 \cdot RDR^0 \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta RDR^x \right) - \left(-\frac{A_0}{L_0} \right) - \left(+ \sum_{i=1}^H d_i \cdot \sum_{i=3}^4 l_i + L_0 \cdot \Delta D \right). \quad (5.57)$$

Аналогичным образом получены рекуррентные формулы для нахождения коэффициентов квадратного уравнения и оптимальных межремонтных периодов системы ремонта при любой структуре системы ремонта.

$$l_j^x = \frac{b_{x+1}}{b_j} l_{x+1}^x + \frac{a_{x+1} - a_j}{2b_j}; j = \overline{x+2, m_s^x}. \quad (5.58)$$

Значение первого межремонтного периода можно получить, решая уравнение:

$$A \cdot (l_{x+1}^x)^2 + B \cdot l_{x+1}^x + C = 0, \quad (5.59)$$

где коэффициенты будут определяться:

$$A = b_{x+1} + b_{x+1}^2 \sum_{k=x+2}^{m_s^x} \frac{1}{b_k}; \quad (5.60)$$

$$B = b_{x+1} \left[a_{x+1} \sum_{k=x+2}^{m_s^x} \frac{1}{b_k} - \sum_{k=x+2}^{m_s^x} \frac{a_k}{b_k} \right]; \quad (5.61)$$

$$C = \frac{1}{4} \sum_{k=x+2}^{m_s^x} \frac{(a_{x+1} - a_k)^2}{b_k} - \left((S_0 - Q_0) \frac{\sum_{i=1}^x l_i}{L_0} + \Delta S \right) -$$

$$- \left(\frac{n_{KP}^0 \cdot RKR^0 \sum_{i=1}^x l_i}{L_0} + \Delta n_{KP}^x \cdot RKR^0 + n_{KP}^x \cdot \Delta RKR^x \right) -$$

$$- \left(\frac{n_{DP}^0 \cdot RDR^0 \sum_{i=1}^x l_i}{L_0} - \Delta n_{DP}^x \cdot RDR^0 + n_{DP}^x \cdot \Delta RDR^x \right) -$$

$$- \left(- \sum_{i=1}^x (a_i l_i + b_i l_i^2) \cdot \frac{\sum_{i=x+1}^{m_s^0} l_i}{L_0} - \sum_{i=x+1}^{m_s^0} (a_i l_i + b_i l_i^2) \cdot \frac{\sum_{i=1}^x l_i}{L_0} \right) -$$

$$- \left(\frac{\sum_{k=1}^H d_k \cdot \sum_{i=1}^x l_i}{L_0} + \Delta D \right), \quad (5.62)$$

где x – номер межремонтного периода в исходной матрице системы ремонта $[l_i^0]$, после которого вагону выполняют запланированный ремонт, а следующий ремонт крупного объёма (или глубокая диагностика) назначается в соответствии с найденным оптимальным периодом за остаточный нормативный срок службы, т.е. в соответствии с матрицей $[l_j^x]$, Δn_{KP}^x – изменение числа КР ремонтов в перспективном периоде работы по сравнению с запланированным по системе ремонта $[l_i^0]$; n_{KP}^x – количество КР, планируемых по структуре с $[l_j^x]$; $\Delta n_{ДР}^x$ – изменение числа ДР ремонтов в перспективном периоде работы по сравнению с запланированным по системе ремонта $[l_i^0]$; $n_{ДР}^x$ – количество ДР, планируемых по структуре с $[l_j^x]$.

5.6 Методика оценки параметра безопасности грузового вагона

Под параметром безопасности вагона $l_{БД}$ будем понимать максимально допустимый период между соседними глубокими диагностиками вагона. Под глубокой диагностикой будем понимать тот объём контрольных и диагностических работ, который выполняют при ДР или КР.

Безопасность грузового вагона определяется безотказной работой составных его частей, каждая из которых имеет ограниченную контролепригодность в эксплуатации, отказ любой из них при неблагоприятном стечении обстоятельств может внезапно привести к крушению поезда.

Как показано в разделе 4, при определении периодичности проведения глубоких диагностик основных элементов вагонных конструкций, входящих в расчётную схему аварийности грузового вагона, можно воспользоваться методикой прогнозирования (с учётом требуемого уровня риска крушения) остаточного срока службы детали, проработавшей некоторый период времени.

Поэтому при проведении планового ремонта остаточные сроки службы основных деталей, определяемые с помощью приведённой выше методики, должны быть учтены при назначении даты проведения очередной глубокой диагностики вагона. Очевидно, что величину параметра безопасности $l_{БД}$ будет определять наименее надёжный элемент конструкции, для которого остаточный срок службы наименьший. Таким образом, параметр безопасности для вагона отработавшего некоторый период времени, в зависимости от его комплектации, будет определяться:

$$l_{БД} = \min(\tau_1^{ОСТ}, \tau_2^{ОСТ}, \tau_3^{ОСТ}, \dots, \tau_i^{ОСТ}), \quad (5.63)$$

где $\tau_i^{ОСТ}$ – остаточный срок службы i -й ответственной детали, список которых приведён в таблице 4.5. Как уже выше отмечалось (см. главу 4) минимальное значение остаточного срока службы имеет боковая рама тележки. Поэтому параметр безопасности $l_{БД}$ определяется остаточным сроком службы боковой рамы. Этот срок определяет период, по истечении которого потребуется

проведение очередной глубокой диагностики деталей вагона, после которой аналогично необходимо определить следующую дату диагностики.

Таким образом, план контроля боковины тележки, определяемый по модели изменения её остаточного срока службы, будет определять изменение параметра безопасности вагона при условии, что деталь не откажет и не будет заменена новой. Зависимость периодичности глубоких диагностик в зависимости от срока службы вагона приведена на рисунке 5.7;

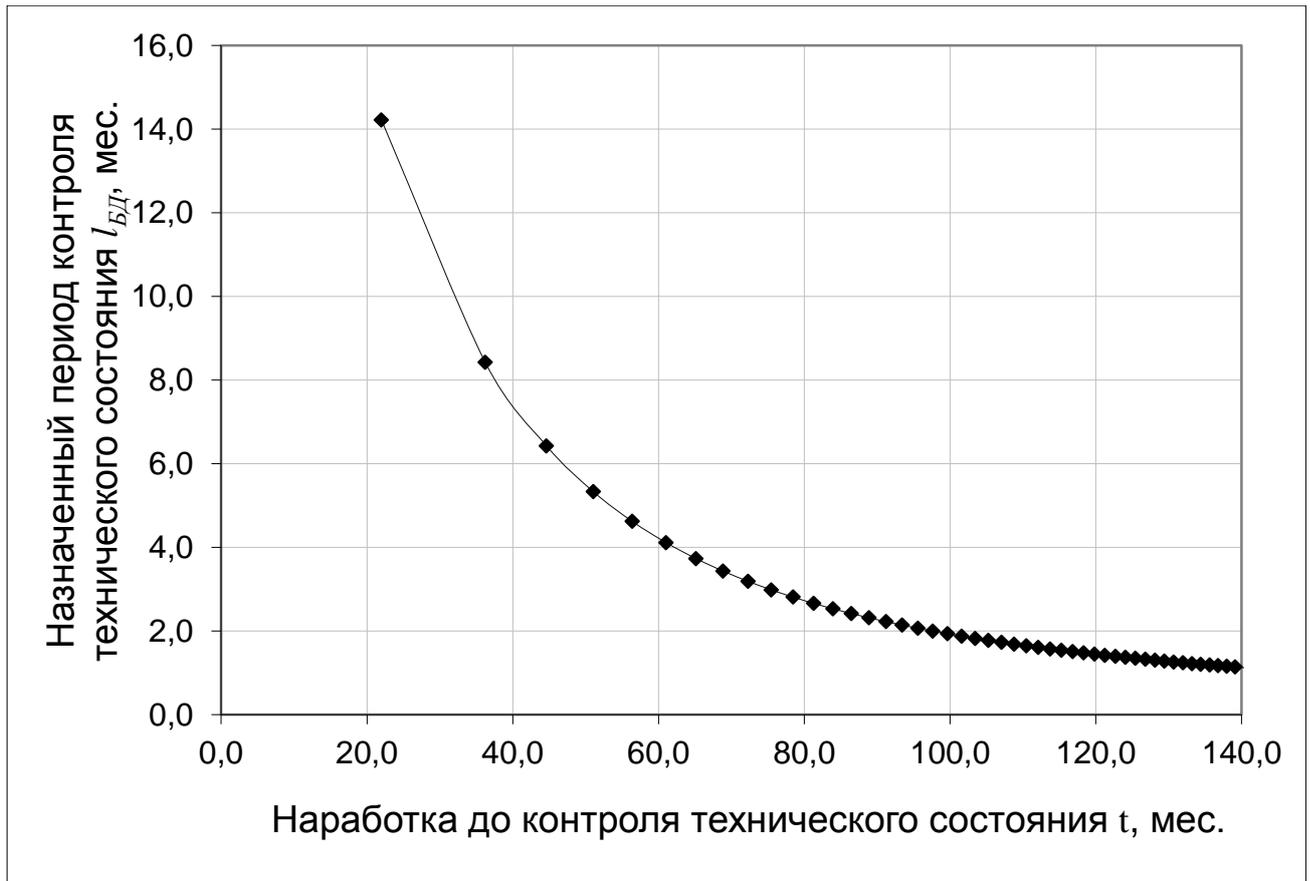


Рисунок 5.7 – План проведения глубокой диагностики грузового вагона

Расчётные значения периодичности проведения глубокой диагностики вагона сведены в таблицу 5.6.

Таблица 5.6 – План контроля (глубокой диагностики) вагона

№ п/п	Точка прогноза технического состояния, мес.	Периодичность проведения глубокой диагностики, мес.	№ п/п	Точка прогноза технического состояния, мес.	Периодичность проведения глубокой диагностики, мес.
1	22,0	14,2	16	91,2	2,2
2	36,2	8,4	17	93,4	2,1
3	44,6	6,4	18	95,6	2,1
4	51,1	5,3	19	97,6	2,0
5	56,4	4,6	20	99,6	1,9
6	61,0	4,1	21	101,6	1,9
7	65,1	3,7	22	103,5	1,8
8	68,9	3,4	23	105,3	1,8
9	72,3	3,2	24	107,1	1,7
10	75,5	3,0	25	108,8	1,7
11	78,5	2,8	26	110,5	1,6
12	81,3	2,7	27	112,1	1,6
13	83,9	2,5	28	113,7	1,6
14	86,5	2,4	29	115,3	1,5
15	88,9	2,3	30	116,8	1,5

5.7 Методика расчёта потребности в плановых ремонтах

Представим, потребность в плановых ремонтах в виде функции зависящей от принятой системы ремонта, т.е. от матрицы (l_{ij}) . Обозначим эту функцию через $P(l_{ij})$. Сама функция $P(l_{ij})$ трактуется нами как количество вагонов рассматриваемого типа, нуждающихся в плановом ремонте.

Для расчёта потребности вагонов необходимо располагать двумя массивами данных о:

- возрастном составе парка вагонов рассматриваемого типа;
- параметрах системы ремонта вагонов рассматриваемого типа в виде межремонтных пробегов.

Определение потребностей в плановых ремонтах осуществляется в два этапа:

- отдельно для каждой возрастной группы парка вагонов определяется та её доля, которую следует направить в ДР в течение интересующего нас календарного года;
- суммирование полученных решений по всем возрастным группам.

Будем предполагать, что изготовление вагонов и их приобретение осуществляется равномерно в пределах календарного года. Понятно, что функция $P(l_{ij})$ может быть задана лишь алгоритмически.

Указанный алгоритм реализуем в виде расчёта потребности в ДР и КР по следующим формулам:

$$P^{ДР}(l_1, l_2, \dots, l_N) = \sum_n M_n^{ДР} \cdot H_n; \quad (5.64)$$

$$P^{ДР}(l_1, l_2, \dots, l_N) = \sum_n M_n^{ДР} \cdot H_n, \quad (5.65)$$

где H_n – количество вагонов в n -ой возвратной группе;

$M_n^{ДР} = \sum_{j=1}^u m_n^{(j)}$ – доля вагонов n -й возрастной группы, которую следует отправить в

ДР в течение интересующего года;

$$m_n^{(j)} = \begin{cases} 0, & \text{если } \varphi_n^{(j)} \geq 24; \\ 2 - \frac{\varphi_n^{(j)}}{12}, & \text{если } 12 < \varphi_n^{(j)} < 24; \\ \frac{\varphi_n^{(j)}}{12}, & \text{если } \varphi_n^{(j)} \leq 12. \end{cases} \quad (5.66)$$

Забегая несколько вперёд, заметим, что значение величины “ u ” определяется из (5.70).

При вычислении $\varphi_n^{(j)}$ по формуле:

$$\varphi_n^{(j)} = \Delta_n - \sum_{i=1}^{K_n^{(j)}} l_i^{(n)}, \quad (5.67)$$

под знаком суммирования находятся только те пробеги $l_i^{(n)}$, по завершении которых начинается ДР. Остальные пробеги используются для определения M_n^{KP} - доли вагонов n -й возрастной группы, которую следует отправить в КР в течение интересующего нас календарного года;

$$M_n^{KP} = \begin{cases} 0, & \text{если } \varphi_n^{(m_k+1)} \geq 24; \\ 2 - \frac{\varphi_n^{(m_k+1)}}{12}, & \text{если } 12 < \varphi_n^{(m_k+1)} < 24; \\ \frac{\varphi_n^{(m_k+1)}}{12}, & \text{если } \varphi_n^{(m_k+1)} \leq 12, \end{cases} \quad (5.68)$$

где m_k – структура k -го ремонтного цикла. Последние два выражения связаны соотношением

$$K_n^{(j)} = m_k + 1. \quad (5.69)$$

При этом m_k определяется из условия:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{m_k} l_i^{(n)} < \Delta_n < \sum_{i=1}^{m_k+1} l_i^{(n)}; \\ l_{m_k+1}^{(n)} \leq 12, \end{cases} \quad (5.70)$$

причём, если $l_{m_k+1}^{(n)} > 12$, то $M_n^{KP} = 0$.

Здесь:

$$\Delta_n = (t_{рем} - t_{узг}^n) / 12$$

где $t_{рем}$ – конец интересующего нас календарного года;

$t_{узг}^n$ – начало года изготовления вагонов n -й возрастной группы;

$t_i^{(n)}$ – i -й межремонтный пробег вагона n -й возрастной группы.

Для определения значений величин $K_n^{(j)}$, входящих в (5.66), где $j = \overline{1, u}$, представим их в виде последовательности членов возрастающей арифметической прогрессии с разностью, равной единице. Достаточно определить лишь два крайних члена данной последовательности.

$$K_n^{(1)}, K_n^{(2)}, \dots, K_n^{(u)}. \quad (5.71)$$

Значение $K_n^{(u)}$ определяется из условия:

$$\max_u \sum_{i=1}^{K_n^{(u)}} l_i^{(n)} \leq \Delta_n. \quad (5.72)$$

Первый элемент последовательности (5.69) удовлетворяет соотношению

$$K_n^{(1)} = K_n^{(t)} + 1, \quad (5.73)$$

где $K_n^{(t)}$ определяется из условия:

$$\max_t \sum_{i=1}^{K_n^{(t)}} l_i^{(n)} < \Delta_n - 24, \quad (5.74)$$

причём, если $K_n^{(u)} - K_n^{(t)} \leq 1$, то $K_n^{(1)} = K_n^{(u)}$.

Справедливость приведённых формул доказывается с помощью метода математической индукции.

Опираясь на задание формул (5.64) и (5.65) с помощью цепочки соотношений (5.66)-(5.73) нетрудно разработать программное обеспечение к расчёту потребности в ДР и КР при различных системах ремонта и возрастных составов парка вагонов.

5.8 Структура базы исходных данных

Для решения задачи (5.10)-(5.12) необходима информация, которую можно разделить на несколько блоков. На примере четырёхосного полувагона рассмотрим эти блоки, которые определяют:

- составляющие расходов на содержание вагона, т.е. составляющие целевой функции, блок представлен в таблице 5.7;
- мощность ремонтной базы вагонов рассматриваемого типа (в таблице 5.8 приведены данные для полувагонов);
- возрастной состав парка вагонов рассматриваемого типа, используемый для расчёта потребности в плановых ремонтах вагонов в течение интересующего календарного года (представлен в таблице 5.9);
- составляющие издержек других хозяйств ОАО «РЖД».

Таблица 5.7 – Структура исходных данных для определения целевой функции

1	Покупная и ликвидная цена вагона
2	Затраты на ДР по мере старения вагона
3	Затраты на КР по мере старения вагона
4	Рост затрат на текущие ремонты и техническое обслуживание вагона по мере его старения
5	Издержки других хозяйств ОАО «РЖД» за срок службы вагона

Таблица 5.8 – Пример исходных данных мощности ремонтной базы вагонного хозяйства

Наименование вагонного депо	Заявленная мощность депо, ваг./г.	Наименование вагонного депо	Заявленная мощность депо, ваг./г.
Аскиз	3120	Люблино	3150
Буря	3180	Лосиноостровская	3200
Белогорск	3050	Льгов	3400
Борзя	3000	Лянгасово	3140
Белово	3000	Лихая	3200
Барабинск	3150	Морозовская	3310
Бердяуш	3180	Магнитогорск	3080
Бобринск-Донской	3250	Гороблагодатная	3000
Вязьма	3020	Нижнеудинск	3400
Зуевка	3000	Ожерелье	3200
Грязи	3100	Пермь-сорт.	2900

Продолжение таблицы 5.8

Кемь	3200	Прокопьевск	2950
Кандалакша	3050	Тайга	3100
Курск	3350	Узловая	3180
Красноуфимск	3300	Уфалей	3350
Коноша	3200	Уссурийск-сорт.	3100
Каменоломня	3120	Челябинск	3400
Каменск-Уральский	3280	Череповец	3070
Курган	3200	Чернышевск	3240
Кемерово	3200	Черемхово	3350
Петербург-сорт.	3120	Юбилейное	3000

Таблица 5.9 – Возрастной состав парка полувагонов

Год выпуска	Количество	Год выпуска	Количество	Год выпуска	Количество
1973	1522	1988	5349	2003	20974
1974	4540	1989	6452	2004	10059
1975	4821	1990	6859	2005	5277
1976	5310	1991	5174	2006	6876
1977	5207	1992	4997	2007	5204
1978	5557	1993	6383	2008	6805
1979	5033	1994	8176	2009	7000
1980	4900	1995	8260	2010	8000
1981	4585	1996	6262	2011	4000
1982	4508	1997	4221	2012	6500
1983	5240	1998	1891	2013	2000
1984	5270	1999	1231	2014	1500
1985	6173	2000	1408	2015	6000
1986	6479	2001	4146	2016	5000
1987	5907	2002	9862	2017	0

5.9 Алгоритм решения задачи

Алгоритм решения задачи (5.10)-(5.12) состоит из следующих этапов.

1. Формирование базы исходных данных.

Исходные данные, необходимые для расчёта включают:

- параметры действующей системы ТОиР и нормативный срок службы, соответствующие матрице l_{ij} .

- составляющие расходов на содержание вагона до и после их изменения, представлены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Затраты на содержание полувагона

№ п/п	Затраты	Обозначение	
		до изменение	после изменения
1	Цена полувагона	S^0	S^x
2	Ликвидная цена полувагона	Q^0	Q^x
3	Норматив затрат на деповской ремонт	RDR^0	RDR^x
4	Норматив затрат на капитальный ремонт вагона	RKR^0	RKR^x
5	Издержки других хозяйств ОАО «РЖД» (кроме ВЛХ) за срок службы вагона	d^0	d^x

- СЕП до и после изменения составляющих расходов для действующей структуры, которые можно подсчитать по формуле (5.6).

- характеристики ремонтного хозяйства рассматриваемого типа вагона для определения мощности ремонтного хозяйства M , технологический коэффициент запаса мощности α и коэффициент точности ε .

- блок, ориентированный на оценку параметра $l_{БД}$ по формуле (5.63).

2. Задаются множество Ω допустимых с учётом ограничения (5.7) структур системы ремонта, где $\omega_i^x \in \Omega$.

3. Для каждой структуры системы ремонта ω_k^x , из условия \min целевой функции определяем периодичность проведения плановых ремонтов $l_{ij}^{(\omega_k^x)}$.

4. Используя формулу:

$$l_{ij}^x = \begin{cases} l_{ij}^{(\text{Экк})} \text{ при } l_{ij}^{(\text{Экк})} < l_{\text{БД}ij}; \\ l_{\text{БД}ij} \text{ при } l_{ij}^{(\text{Экк})} \geq l_{\text{БД}ij}, \end{cases} \quad (5.75)$$

производится корректировка экономически целесообразных межремонтных пробегов $l_{ij}^{(\text{Экк})}$ согласно значениями параметра безопасности вагона (5.63).

5. Для откорректированных межремонтных пробегов рассчитывается потребность в деповских и капитальных ремонтах вагонов $\Pi(l_{ij}^x)$ в течение интересующего нас календарного года.

6. Проверяется условие (5.12) соответствия потребности плановых ремонтах возможностям ремонтной базы.

7. Если условие не выполняется, то решение задачи не допустимо, и необходимо перейти к другой структуре, если условие выполняется, то вычисляется СЕП(l_{ij}^x) для рассматриваемой структуры системы ремонта.

8. Выполнить сравнение СЕП(l_{ij}^x) для структур $\omega_i^x \in \omega_{i-1}^x$. Система ТОиР с наименьшей СЕП является искомой.

6 Тестовый пример применения методики оценки остаточного срока службы вагона

В качестве примера рассмотрим применение методики для вагонов некоторого условного типа.

Пусть действующая структура системы ремонта «4-5-6», в системе ТОиР вагона соответствует матрице межремонтных пробегов (l_{ij}^0).

$$[l_{ij}^0] = \begin{vmatrix} 14,0 & 8,3 & 6,4 & 5,3 & & & \\ 14,0 & 8,3 & 6,4 & 5,3 & 4,6 & & \\ 14,0 & 8,3 & 6,4 & 5,3 & 4,6 & 4,1 & \end{vmatrix}$$

Данная система ремонта имеет следующие параметры: количество ремонтных циклов $n_0=3$, т.е. трёх цикловая, количество запланированных КР $n_{КР}^0 = (n_0-1)=2$, количество межремонтных интервалов $m_s^0=15$, количество запланированных ДР: $n_{ДР}^0 = (k_0-n_0)-1=12$.

Составляющие расходов на содержание вагона до и после их изменения, представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Составляющие расходов на содержание вагона

№ п/п	Составляющие	Расходы руб.		Увеличение расходов ΔR
		до изменения	после изменения	
1	Цена полувагона	2000000	2400000	400000
2	Ликвидная цена полувагона	200000	240000	40000
3	Норматив затрат на деповской ремонт	200000	240000	40000
4	Норматив затрат на капитальный ремонт вагона	600000	720000	120000
5	Издержки других хозяйств ОАО «РЖД» (кроме ВЛХ) за срок службы вагона	0	0	0

С учётом таблицы 6.1 рассчитанные фактические расходы на содержание вагона за НСС представлены в таблице 6.2. После изменения составляющих на 20 % СЕП увеличилась на 18,7 %.

Таблица 6.2 – Составляющие расходы на содержание вагона для структуры «4-5-6»

ω_0	Структура затрат, руб./мес.				Итого	НСС(l_{ij}^0), мес.	СЭП (l_{ij}^0) вагона, руб./мес.
	ТР	ДР	КР	S-Q			
до изменения	355966,8	2400000	1200000	1800000	5755966,8	115,3	49935,1
после изменения	355966,8	2880000	1440000	2160000	6835966,8	115,3	59304,5

Таблица 6.3 – Характеристика ремонтного хозяйства

Характеристика	Обознач.	Размерн.	Знач.
Мощность ремонтного хозяйства парка полувагонов	M	Ваг/год	80000
Технологический коэффициент запаса мощности ремонтного хозяйства парка полувагонов	α	-	1,2
Коэффициент точности определения потребности в ДР парка полувагонов	ε	-	0,1

Параметры роста затрат на текущие отцепочные ремонты, т.е. a_{ij} , и b_{ij} примем в соответствии с работой [42].

Используемые коэффициенты роста затрат на текущие ремонты полувагона по мере его старения ТР a_{ij} , руб./мес., b_{ij} , руб./мес². представлены в таблицах 6.4 и 6.5.

Таблица 6.4 – Параметры роста затрат на текущее обслуживание и ТР a_{ij} , руб./мес.

Цикл	Значения параметра для каждого номера межремонтного периода									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	333	933	1333	2167	3167	5000	6833	9167	9667	10000
2	367	1027	1467	2383	3483	5500	7517	10083	10633	11000
3	500	1400	2000	3250	4750	7500	10250	13750	14500	15000

Таблица 6.5 – Параметры роста затрат на текущее обслуживание и ТР b_{ij} , руб./мес².

Цикл	Значения параметра для каждого номера межремонтного периода									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	111,1	116,7	166,7	194,4	222,2	277,8	361,1	416,7	500,0	555,6
2	122,2	128,3	183,3	213,9	244,4	305,6	397,2	458,3	550,0	611,1
3	166,7	175,0	250,0	291,7	333,3	416,7	541,7	625,0	750,0	833,3

Параметр безопасности вагона $l_{БД}$ принимаем в соответствии с приведёнными значениями таблицы 5.6.

Предположим, конструкция полувагона отработала до первого КР, например, периоды l_1, l_2, l_3, l_4 .

Вектор межремонтных пробегов, определяющих остаточный срок службы вагона имеет вид:

$$[l_i^x] = \left| \begin{array}{cccccccccccccccc} l_1 & l_2 & l_3 & l_4 & l_5^x & l_6^x & l_7^x & l_8^x & l_9^x & l_{10}^x & l_{11}^x & l_{12}^x & l_{13}^x & l_{14}^x & l_{15}^x \end{array} \right|$$

Здесь l_j^x – j -й межремонтный период, оптимальное значение которого требуется определить с учётом изменившихся параметров эксплуатационной среды.

Относительно системы ТОиР (l_{ij}^0) зададим множество структур системы ремонта (Таблица 6.6).

Таблица 6.6 – Конкурирующие структуры системы ремонта

№	Обознач.	Структура	№	Обознач.	Структура
1	ω_1	4/0-5-1	11	ω_{11}	4/0-6-1
2	ω_2	4/0-5-2	12	ω_{12}	4/0-6-2
3	ω_3	4/0-5-3	13	ω_{13}	4/0-6-3
4	ω_4	4/0-5-4	14	ω_{14}	4/0-6-4
5	ω_5	4/0-5-5	15	ω_{15}	4/0-6-5
6	ω_6	4/0-5-6	16	ω_{16}	4/0-6-6
7	ω_7	4/0-5-7	17	ω_{17}	4/0-6-7
8	ω_8	4/0-5-8	18	ω_{18}	4/0-6-8
9	ω_9	4/0-5-9	19	ω_{19}	4/0-6-9
10	ω_{10}	4/0-5-10	20	ω_{20}	4/0-6-10

Для каждой структуры системы ремонта с помощью формулы (5.53) определим периодичность проведения планового ремонта, результаты приведены в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Экономически целесообразные межремонтные пробеги $l_{ij}^{(Эк)}$, мес.

ω_1	78,0	71,7	49,0	39,8						
	70,7	64,7	44,1	35,7	29,0					
	51,4									
ω_2	78,0	71,7	49,0	39,8						
	69,4	63,5	43,3	34,9	28,3					
	50,5	45,5								
ω_3	78,0	71,7	49,0	39,8						
	69,2	63,3	43,1	34,8	28,2					
	50,3	45,3	30,5							
ω_4	78,0	71,7	49,0	39,8						
	69,4	63,5	43,2	34,9	28,3					
	50,5	45,5	30,6	24,1						
ω_5	78,0	71,7	49,0	39,8						
	69,9	64,0	43,6	35,2	28,6					
	50,8	45,9	30,9	24,3	19,0					
ω_6	78,0	71,7	49,0	39,8						
	70,7	64,8	44,2	35,7	29,0					
	51,5	46,5	31,3	24,7	19,4	12,2				
ω_7	78,0	71,7	49,0	39,8						
	71,8	65,8	44,9	36,3	29,5					
	52,3	47,2	31,8	25,1	19,8	12,5	7,1			
ω_8	78,0	71,7	49,0	39,8						
	72,9	66,9	45,6	37,0	30,1					
	53,1	48,0	32,4	25,6	20,2	12,8	7,3	3,6		
ω_9	78,0	71,7	49,0	39,8						
	74,1	68,0	46,4	37,6	30,7					
	53,9	48,8	32,9	26,1	20,6	13,2	7,6	3,8	2,6	
ω_{10}	78,0	71,7	49,0	39,8						
	75,2	69,0	47,1	38,2	31,2					
	54,7	49,5	33,5	26,6	21,0	13,5	7,8	4,0	2,8	2,2
ω_{11}	78,0	71,7	49,0	39,8						
	71,2	65,3	44,5	36,0	29,2	20,1				
	51,8									
ω_{12}	78,0	71,7	49,0	39,8						
	70,0	64,1	43,7	35,3	28,6	19,6				
	50,9	45,9								
ω_{13}	78,0	71,7	49,0	39,8						
	69,7	63,8	43,5	35,1	28,5	19,5				
	50,7	45,7	30,8							
ω_{14}	78,0	71,7	49,0	39,8						
	69,9	64,0	43,6	35,2	28,6	19,6				
	50,9	45,9	30,9	24,4						
ω_{15}	78,0	71,7	49,0	39,8						
	70,4	64,5	43,9	35,5	28,8	19,8				
	51,2	46,2	31,1	24,6	19,2					

Продолжение таблицы 6.7

ω_{16}	78,0	71,7	49,0	39,8						
	71,2	65,3	44,5	36,0	29,2	20,1				
	51,8	46,8	31,5	24,9	19,5	12,3				
ω_{17}	78,0	71,7	49,0	39,8						
	72,2	66,2	45,1	36,6	29,7	20,5				
	52,6	47,5	32,0	25,3	19,9	12,6	7,2			
ω_{18}	78,0	71,7	49,0	39,8						
	73,3	67,3	45,9	37,2	30,3	20,9				
	53,4	48,3	32,6	25,8	20,3	12,9	7,4	3,6		
ω_{19}	78,0	71,7	49,0	39,8						
	74,4	68,3	46,6	37,8	30,8	21,4				
	54,2	49,0	33,1	26,2	20,7	13,3	7,7	3,8	2,7	
ω_{20}	78,0	71,7	49,0	39,8						
	75,5	69,3	47,3	38,4	31,4	21,8				
	54,9	49,8	33,6	26,7	21,1	13,6	7,9	4,1	2,9	2,3

В соответствии со значениями параметра безопасности вагона (Таблица 5.6), используя правило (5.75), откорректируем экономически целесообразные межремонтные пробеги для рассматриваемых вариантов системы ремонта. Результаты получаемых межремонтных периодов с учётом требований безопасности движения приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Межремонтные пробеги с учётом требований безопасности движения, мес.

ω_1	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
	14,0									
ω_2	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
	14,0	8,3								
ω_3	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
	14,0	8,3	6,4							
ω_4	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
	14,0	8,3	6,4	5,3						
ω_5	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
ω_6	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
ω_7	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1	3,7			

Продолжение таблицы 6.8

ω_8	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1	3,7	3,4		
ω_9	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1	3,7	3,4	2,8	
ω_{10}	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1	3,7	3,4	2,8	2,2
ω_{11}	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
	14,0									
ω_{12}	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
	14,0	8,3								
ω_{13}	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
	14,0	8,3	6,4							
ω_{14}	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
	14,0	8,3	6,4	5,3						
ω_{15}	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6					
ω_{16}	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
ω_{17}	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1	3,7			
ω_{18}	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1	3,7	3,4		
ω_{19}	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1	3,7	3,4	2,8	
ω_{20}	14,0	8,3	6,4	5,3						
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1				
	14,0	8,3	6,4	5,3	4,6	4,1	3,7	3,4	2,8	2,2

По методике описанной выше (см. разд. 5.7), определим потребность в депокских и капитальных ремонтах вагонов рассматриваемого типа в течение 2017 г. $P(t_{ij}^x)$ для каждой из рассмотренных структур. Результат проверки соответствия потребности в ремонтах возможностям ремонтной базы приведён в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Потребности в ДР и КР полувагонов в течение 2017 г.

Ω	Структура	Потребность в ДР	Потребность в КР	Ограничение по мощности рем. базы
ω_1	4/0-5-1	33146	6450	Не удовлетворяет
ω_2	4/0-5-2	40929	6450	Не удовлетворяет
ω_3	4/0-5-3	48021	6450	Не удовлетворяет
ω_4	4/0-5-4	54935	6450	Не удовлетворяет
ω_5	4/0-5-5	61762	6450	Удовлетворяет
ω_6	4/0-5-6	68141	6450	Удовлетворяет
ω_7	4/0-5-7	73972	6450	Не удовлетворяет
ω_8	4/0-5-8	79309	6450	Не удовлетворяет
ω_9	4/0-5-9	84847	6450	Не удовлетворяет
ω_{10}	4/0-5-10	90776	6450	Не удовлетворяет
ω_{11}	4/0-6-1	37346	7817	Не удовлетворяет
ω_{12}	4/0-6-2	44787	7817	Не удовлетворяет
ω_{13}	4/0-6-3	51738	7817	Не удовлетворяет
ω_{14}	4/0-6-4	58586	7817	Не удовлетворяет
ω_{15}	4/0-6-5	65030	7817	Удовлетворяет
ω_{16}	4/0-6-6	70862	7817	Удовлетворяет
ω_{17}	4/0-6-7	76146	7817	Не удовлетворяет
ω_{18}	4/0-6-8	81781	7817	Не удовлетворяет
ω_{19}	4/0-6-9	87891	7817	Не удовлетворяет
ω_{20}	4/0-6-10	94391	7817	Не удовлетворяет

Как видно из последней таблицы среди всех рассмотренных вариантов структуры системы ремонта условия (5.12) выполняется для структур ω_5 , ω_6 , ω_{15} и ω_{16} . Для этих структур системы ремонта вычисляем СЕП(l_{ij}^x) выделим ту, у которой СЕП(l_{ij}^x) принимает минимальное значение (Таблица 6.10).

Таблица 6.10 – Затраты на содержания полувагона за остаточный срок службы

Ω	Структура затрат, руб.					Итого	l_{ij}^x , мес.	СЕП(l_{ij}^x), руб./мес.
	$S-Q$	DP	KP	TP	D			
ω_5	1629250,1	1812333,5	966166,8	213239,9	0	4620990,3	77,2	59873,3
ω_6	1629250,1	2052333,5	966166,8	251006,1	0	4898756,5	81,3	60269,7
ω_{15}	1629250,1	2052333,5	966166,8	240935,1	0	4888685,5	81,3	60145,8
ω_{16}	1629250,1	2292333,5	966166,8	278701,3	0	5166451,7	85,4	60510,1

Как видно из таблицы 6.10 искомой структурой системы ТОиР является структура 4/0-5-5.

Определяя оптимальное значение СЕП за остаточный срок службы в условиях изменения параметров эксплуатационной среды, нетрудно подсчитать ожидаемый экономический эффект от применения рассмотренной методики. Перерасчёт параметров системы ремонта за остаточный срок службы позволит сократить увеличение СЕП при росте расходов на содержание вагона. Например, переход от действующей системы со структурой «4/0-5-6» к системе со структурой «4/0-5-5» при новых параметрах эксплуатационной среды позволит экономить 396,4 руб./мес. на один вагон. При переводе некоторого парка вагонов например, 10000 вагонов на оптимальную в новых условиях систему (4/0-5-5) экономический эффект составит порядка 3964 тыс. руб./мес., что соответствует порядка 46,5 млн. руб. в год. Таким образом, внедрение методики оценки остаточного срока службы вагона с учётом его фактического технического состояния позволяет получить существенный экономический эффект.

Заключение

В диссертации в результате проведённого исследования получены следующие результаты:

1. Разработана методика оценки остаточного ресурса деталей, имеющих внезапные отказы, которая ориентирована на использование существующей информационной базы железнодорожного транспорта и может быть автоматизирована.

2. Разработанную технологию принятия решения о возможности выпуска детали из ремонта в составе конкретного вагона можно реализовать в условиях вагонных депо. По мере накопления статистической информации, система обеспечит корректировку значений остаточного срока службы каждой ответственной детали.

3. На основе построения дерева отказов вагона определено, что безопасность вагона определяют трещины и изломы таких деталей, как колесо, надрессорная балка, боковая рама тележки, автосцепка.

4. На основе проведённого эксперимента получена вероятностная модель изменения остаточного ресурса детали по мере её старения с учётом требуемого риска опасного отказов основных ответственных деталей.

5. Изменение параметра безопасности – периодичности проведения глубоких диагностик вагону предложено оценивать с учётом остаточных сроков службы ответственных его составных частей.

6. За счёт применения разработанной методики расчётного обоснования параметров системы технического обслуживания и ремонта вагона и корректировки его назначенного остаточного срока службы можно уменьшить влияние изменений параметров эксплуатационной среды на стоимость жизненного цикла вагона и себестоимость перевозок.

Список сокращений и условных обозначений

ВХ – вагонное хозяйство

ПТЭ – правила технической эксплуатации

ПТО – пункт технического обслуживания

ВУ – вагонная учётная форма

ЦПУВ – система централизованного пономерного учёта грузовых вагонов

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

АСУЖТ – автоматизированная система управления ж.д. транспорта

АБДПВ – автоматизированная база данных парка вагонов

ЖТСВ – журнал технического состояния вагонов

САИПС – система автоматической идентификации подвижного состав

ИВЦ – информационно-вычислительные центр

ГВЦ – главный вычислительные центр

АРМ – автоматизированное рабочее место

ТОиР – техническое обслуживания и ремонт

НАР – непланово-аварийный ремонт

НАР-Р – непланово-аварийный ремонт регламентированный

НАР-Н – непланово-аварийный ремонт нерегламентированный

ППР – планово-предупредительный ремонт

ПАР – планово-аварийный ремонт

ПДР – планово-диагностический ремонт

НПР – непланово-профилактический ремонт

SNCF – Société Nationale des Chemins de fer Français

НСС – нормативный срок службы

СЕП – себестоимость единицы работы (пробега)

Список литературы

1. Алшехаби, С., Непараметрическая оценка среднего остаточного ресурса стареющих изделий / С. Алшехаби, Г.С. Садыхов // Надёжность и качество: Труды Международного симпозиума. – 2007. – С. 10.
2. Баженов, Ю.В. Прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов автомобилей в условиях эксплуатации / Ю.В. Баженов, М.Ю. Баженов // Фундаментальные исследования. – 2015. – №4 – С. 16-21.
3. Бачурин, Н.С. Методика оценки показателей надёжности трамвайного вагона / Н.С. Бачурин, А.А. Красниченко, Иванов Н.Л. // Транспорт Урала. – 2009. – №1. – С. 36-39.
4. Боев, С.Ф. Теоретические и методологические основы оценок остаточного ресурса изделий / С.Ф. Боев, В.П. Савченко, Г.С. Садыхов // Научно-технические технологии. – 2013. – № 9. – С. 21 – 31.
5. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 311 с.
6. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
7. Бронштейн, Л.А. Определение оптимального срока службы подвижного состава автомобильного транспорта / Л.А. Бронштейн, С.Р. Лейдерман // Труды Московского инженерно-экономического института. – 1961. – №XVI. – С. 144-157.
8. Бунин, Б.Б. Оценка долговечности и остаточного ресурса рам тележек локомотивов / Б.Б. Бунин, Э.С. Оганьян, Т.М. Пономарева, В.Г. Шевченко // Тяжёлое машиностроение. – 2007. – №4 – С. 31-33.
9. Бунин, Б.Б. Оценка остаточной долговечности рам тележек магистральных тепловозов// Б.Б. Бунин, Э.С. Оганьян / Тр. ин-та ВНИКТИ. – 2002. – №81. – С. 2-11.
10. Войнов, К.Н. Надёжность вагонов / К.Н. Войнов. – М.: Транспорт, 1989. – 110 с.

11. Вологодина, Л.Б. Совершенствование системы обеспечения безопасной эксплуатации грузовых вагонов на основе новых информационных технологий: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Вологодина Людмила Борисовна. – М., 2004. – 190 с.
12. Воробьев, А.А. Оценка ресурса оборудования ТПС / А.А. Воробьев, А.В. Скребков // Мир транспорта. – 2012. – №5. – С. 15-18.
13. Воронин, Ю.Ф. Снижение изломов вагонных рам. / Ю.Ф. Воронин // Техника железных дорог. – 2014. – №1. – С. 16-17.
14. Вучечич, И.И. Оценка остаточного ресурса грузовых вагонов железных дорог / И.И. Вучечич, Б.А. Деркач, А.Д. Кочнов. // Вестник ВНИИЖТа. – 2008. – №2. – С. 14-18.
15. Галиев, И.И. Причины нарушения безопасности движения грузовых вагонов в эксплуатации / И.И. Галиев, В.А. Николаев, Б.Б. Сергеев, Е.А. Самохвалов, Д.Ю. Лукс // Известия Транссиба. – 2013. – №3(15). – С. 133-141.
16. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надёжности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьёв. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
17. Горский, А.В. Оптимизация системы ремонта локомотивов / А.В. Горский, А.А. Воробьев. – М.: Транспорт, 1994, – 210 с.
18. Горский, А.В. Надёжность электроподвижного состава / А.В. Горский, А.А. Воробьев. – М.: Маршрут, 2005. – 303 с.
19. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – М.: Изд. стандартов, 1980. – 12 с.
20. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 01.07.1990. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 37 с.
21. Григорьев, П.С. Прогнозирование остаточного ресурса рам промышленных тепловозов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Григорьев Павел Сергеевич. – М., 2016. – 24 с.
22. Гридюшко, В.И. Вагонное хозяйство: учеб. пособ. для вузов ж.-д. трансп. / В.И. Гридюшко, В.П. Бугаев, Н.З. Криворучко; [под ред. В.И. Гридюшко, Ю.С. Подшивалова]. – М.: Транспорт, 1988. – 295 с.

23. Донченко, А.В. Прогнозирование остаточного ресурса ходовых частей подвижного состава, исчерпавших свой ресурс / А.В. Донченко, Л.С. Ольгард, С.В. Бондарев, Л.Г. Волков // Наука та прогресс транспорту. – 2007. – №15 – С. 83-87.

24. Дубровин, В.И., Методы оценки остаточного ресурса изделий (Обзор) / В.И. Дубровин, В.А. Клименко // Математические машины и системы. – 2010. – №4. – С. 162-168.

25. Иванов, А.А. Экономический расчёт периодичности плановых ремонтов грузовых вагонов / А.А. Иванов, И.В. Плотников, П.А. Устич // Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Вагонное хозяйство». – М.: МИИТ. 2006. – 44 с.

26. Ивашов, В.А. Основы технического обслуживания вагонов: учеб. пособ. / В.А. Ивашов, М.В. Орлов. – Екатеринбург: 1995. – 82 с.

27. Классификатор «Основные неисправности грузовых вагонов» (К ЖА 2005) / Дирекция совета по железнодорожному транспорту государств-участников содружества, информационно-вычислительным центр железнодорожной администраций. – М.: 2005. – 16 с.

28. Колегаев, Р.Н. Экономическая оценка качества и оптимизация системы ремонта машин / Р.Н. Колегаев. – М.: Машиностроение, 1980. – 240 с.

29. Коссов, В.С. Расчётно-экспериментальная оценка ресурса грузовых вагонов / В.С. Коссов, Э.С. Оганьян // Техника железных дорог. – 2014. – №1. – С. 25-27.

30. Костенко, Н.А. Особенности разрушения и расчёт надёжности литых деталей грузовых вагонов, работающих в режиме случайных нагрузок, с учётом влияния низких температур и циклического повреждения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.01 / Костенко Нина Алексеевна. – М., 1979. – 131 с.

31. Котелкин, А.В. Применение метода рентгеновской дифрактометрии для оценки состояния элементов конструкции авиационной техники. / А.В. Котелкин, А.Д. Звонков, А.В. Лютцау, Д.Б. Матвеев, И.Г. Роберов // Техника воздушного флота (ТВФ). – 2012. – № 4. – С. 21-25.

32. Котуранов, В.Н. Нагруженность элементов конструкции вагона / В.Н. Котуранов, В.Д. Хусидов, П.А. Устич, А.И. Быков. – М.: Транспорт, 1991. – 238 с.
33. Лапшин, В.Ф. Основы технического обслуживания вагонов: учеб. пособие / В.Ф. Лапшин, М.В. Орлов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – 375 с.
34. Лафта, В.М. К вопросу о прогнозировании остаточного ресурса грузовых вагонов на основе метода синтеза нечётких моделей прочности / В.М. Лафта // Тез. докл. Третьей Всероссийской межд. науч.-техн. конф. «Будущее машиностроения России». – 2010. – С. 225-227.
35. Лхамжавын, Б. Разработка и обоснование сроков службы и системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов (На примере полувагонов Улан-Баторской железной дороги): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Лхамжавын Болд. – М., 2008. – 24 с.
36. Мажидов, Ф.А. К оценке показателей надёжности элементов вагонов / А.А. Иванов, Ф.А. Мажидов // Труды пятнадцатой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МИИТ, – 2014. – С. II-29.
37. Мажидов, Ф.А. Определение остаточного срока службы боковой рамы на основе статических данных грузовых вагонов / Ф.А. Мажидов, Н.Д. Зверева // Труды пятнадцатой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МИИТ, – 2014. – С. II-62.
38. Мажидов, Ф.А. Определение остаточного срока службы элементов вагонных конструкции на основе статических данных / Ф.А. Мажидов, А.А. Иванов // Труды X Международной научной-практической конференции «Trans-Mech-Art-Chem». – М.: МИИТ, – 2014. – С. I-64-I-65.
39. Мажидов, Ф.А. Применение научного метода к моделированию программы PROCASST / Ф.А. Мажидов, А.А. Иванов // Межвузовский сборник научных работ аспирантов и молодых учёных Журнал «Наука, Техника, Человек». – 2014. – №6. – С. 22-25.
40. Матяш, Ю.И. Физико-Химические основы оценки остаточного ресурса узлов и деталей грузовых вагонов железнодорожного транспорта / Ю.И. Матяш, Ю.М. Сосновский, А.Г. Петракова // Известия Транссиба. – 2015 – №2. – С. 12-17.

41. Махутов, Н.А. К вопросу оценки ресурса и безопасной эксплуатации конструкций подвижного состава / Н.А. Махутов, В.С. Коссов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – №11. – С. 43-47.

42. Митюхин, В.Б. Повышение эффективности вагонного хозяйства на основе использования новых информационных технологий: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Митюхин Виталий Борисович. – М., 2002. – 131 с.

43. Михлин, В.М. К вопросу определения оптимального межремонтного срока службы узла или агрегата машины / В.М. Михлин // Труды ГОСНИТИ. – 1964. – №4. – С. 111-139.

44. Мишарин, А., Информатизация – важнейшее средство повышения эффективности работы отрасли / А. Мишарин // Железнодорожный транспорт. – 1999. – № 9. – С. 19-23.

45. Морчиладзе, И.Г. Железнодорожные цистерны: учеб. пособ. для вузов ж.-д. трансп. / И.Г. Морчиладзе, А.П. Никодимов, М.М. Соколов, А.В. Третьяков. – М.: ИБС-Холдинг, 2006. – 516 с.

46. Мотовилов, К.В. Технология производства и ремонта вагонов: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / К. В. Мотовилов, В.С. Лукашук, В.Ф. Криворудченко, А.А. Петров. – М.: Маршрут, 2003. – 382 с.

47. Муравьев, В.В. Анализ результатов работы по продлению срока службы литых деталей тележек с использованием метода акустической эмиссии / В.В. Муравьев // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2014. – №4. – С. 32-37.

48. Муравьев, В.В. Диагностирование литых деталей тележек грузовых вагонов / В.В. Муравьев // В мире неразрушающего контроля. – 2006. – № 4. – С. 78-80.

49. Нормы для расчёта и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). ГОСНИИВ-ВНИИЖТ, – М. 1996. – 318 с.

50. Оганьян, Э.С. Условия безопасной эксплуатации литых деталей тележек грузовых вагонов / Э.С. Оганьян, Н.Ф. Красюков // Бюллетень объединённого учёного совета ОАО «РЖД» – 2013. – №3. – С. 13-20.

51. Окладникова, Е.Н. Вероятностная оценка ресурса узлов трения износа / Е.Н. Окладникова, Е.В. Сугак // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2005. – №3. – С. 148-152.
52. Орлов, М.В. Вагонное хозяйство, организация технического обслуживания и ремонта вагонов: метод. указ. к дипл. проект. для студ. по специальности «ВАГОНЫ» / М.В. Орлов, Н.Ф. Сирина. – Екатеринбург: 2002 – 47 с.
53. Островский, В.А. Теория надёжности: учеб. для вузов / В.А. Островский. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. Шк., 2008. – 463 с.
54. Осяев, А.Т. Современные методы и инновационные технологии технического обслуживания подвижного состава / А.Т. Осяев // Железнодорожный транспорт. – 2014. – №10. – С. 74-77.
55. Пат. № 2215280 РФ. Способ оценки остаточного ресурса / А. В. Котелкин, А.Д. Звонков, А.В. Лютцау и др // – Бюл. – 2003. – №30. – С8.
56. Патрик, Т. Амин. Порядок допуска грузовых вагонов на сеть железных дорог северной Америки / Амстед рейл. Москва. 2016. С. 37.
57. Петухов, Р.М. Методика экономической оценки износа и сроков службы машин / Р.М. Петухов. – М.: Экономика, 1965. – 168 с.
58. Положение о продлении срока службы грузовых вагонов курсирующих в международном сообщении / Совет по железнодорожному транспорту государств–участников содружества. – Москва, 2010. – 29 с.
59. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении / Дирекция совета по железнодорожному транспорту государств–участников содружества, научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. – Москва, 2012. – 17 с.
60. Протопов, А.Л. Размер трещины и живучесть боковой рамы тележки / А.Л. Протопов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – №2. – С. 32-34.

61. Решетов, Д.Н. Надёжность машин / Д.Н. Решетов [и др.] – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
62. Савоськин, А.Н. Надёжность деталей при постепенных отказах, вызванных накоплением усталостных повреждений / А. Н. Савоськин, Е. В. Сердобинцев // Надёжность и контроль качества. – 1986. – №11. – С. 13-19.
63. Савоськин, А.Н. Надёжность несущих деталей подвижного состава при усталостных повреждениях / А.Н. Савоськин, Е.В. Сердобинцев // Вестник ВНИИЖТ. – 1984. – № 7. – С. 33-36.
64. Савоськин, А.Н. Прогнозирование надёжности несущих деталей при внезапных отказах / А.Н. Савоськин, В.В. Франц // Проблемы прочности, – 1984. – №6. – С. 103–107.
65. Савоськин, А.Н. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / А. Н. Савоськин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
66. Садыхов, Г.С. Математическая модель исследования дискретного ресурса изделий, работающих в циклических режимах эксплуатации / Г.С. Садыхов, В.П. Савченко, А.А. Артюхов // Научно-технические технологии. – 2016. – №1. – С. 19-25.
67. Садыхов, Г.С. Основы оценок остаточного ресурса изделий. / Г.С. Садыхов, В.П. Савченко, О.В. Елисеева // Естественные науки. – 2011. – № СПЕС. – С.83-99.
68. Сакеев, А.И. Итоги работы вагонного хозяйства в 2014 году / А.И. Сакеев // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2015. – №1. – С. 2-7.
69. Селиванов, А.И. Основы теории старения машин / А.И. Селиванов. – М.: Машиностроение, 1964. – 408 с.
70. Сенько, В.И. Анализ причин повреждения и возможности продления срока службы боковых рам тележек грузовых вагонов / В.И. Сенько, М.И. Пастухов, С.В. Макеев, И.Ф. Пастухов // Вестник Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого. – 2010. – № 4 – С. 13-18.

71. Серенсен, С.В. Долговечность деталей машин с учётом вероятности разрушения при нестационарном переменном нагружении. / С.В. Серенсен, В.П. Когаев // Вестник машиностроения. – 1966. – №1. – С. 3-6.

72. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчёты деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.

73. Смирнов, В.А. Оценка остаточного ресурса узлов и деталей подвижного состава по результатам неразрушающего контроля / В.А. Смирнов, В.Ф. Кузнецов // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – №1 (39). – С. 76-78.

74. Справочные материалы причин поступления грузовых вагонов приписки России, стран СНГ и Балтии в текущий отцепочный ремонт за 3 месяца 2014 года / Центральная дирекция инфраструктуры управления вагонного хозяйства, ПКБ ВХ. – М.: 2014. – 107 с.

75. Стародубцева, С.А., Прогнозирование остаточного ресурса конструкции деталей машин / С.А. Стародубцева, Гусев А.С. // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2012. – №2. – С. 355-360.

76. Стрельников, В.П. Определение ожидаемой остаточной наработки при DM-распределении / В.П. Стрельников // Математичні машини і системи. – 2000. – № 1. – С. 94-100.

77. Стрельников, В.П. Оценка остаточного ресурса на основе измерения диагностических параметров / В.П. Стрельников // Сетевой электронный научный журнал «СИСТЕМОТЕХНИКА». – 2003. – №1. – С. 7.

78. Стрельников, В.П. Оценка остаточного ресурса объектов на основе данных об отказах в процессе эксплуатации / В.П. Стрельников // Тяжёлое машиностроение. – 2004. – № 1. – С. 11-13.

79. Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава во Франции / SNCF (www.sncf.fr) // Железные дороги мира. – 2011. – № 3. – С. 46-53.

80. Токарев, Г.Г. Рациональные сроки службы автомобилей / Г.Г. Токарев. – М.: Автотрансиздат, 1962. – 79 с.

81. Третьяков, А.В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации / А.В. Третьяков. – СПб.: ОМ-Пресс, 2004. – 348 с.
82. Тычков, А.С. Диагностирование тяговых электродвигателей грузовых электровагонов по параметрам магнитного поля. дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Тычков Александр Сергеевич. – Самара, 2009. – 183 с.
83. Устич, П.А. Вагонное хозяйство: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / П.А. Устич, И.И. Хаба, В.А. Ивашов; [под ред. П.А. Устича]. – М.: Маршрут, 2003. – 560 с.
84. Устич, П.А. Метод расчётного обоснования нормативного срока службы вагона с учётом управляемого риска переходя его в аварийное состояние / П.А. Устич, А.А. Иванов, Ф.А. Мажидов // Труды шестнадцатой научно – практической конференции «Безопасность движения поездов». МИИТ, – 2015. – С. I-21-I-24.
85. Устич, П.А. Надёжность рельсового нетягового подвижного состава / П.А. Устич, В.А. Карпычев, М.Н. Овечников. – М.: ИГ Вариант, 1999. – 416 с.
86. Устич, П.А. Научные основы проектирования системы "Вагон среда". / П.А. Устич, В.М. Макухин, В.М. Меланин. – М.: МИИТ, 1996. – 214 с.
87. Устич, П.А. Остаточный срок службы детали и алгоритм управления фактическим состоянием грузового вагона с учётом требуемого уровня риска возникновения опасного отказа / П.А. Устич, А.А. Иванов, Ф.А. Мажидов, А.А. Салтыкова // «News of science». – 2015. – С. 83-94.
88. Устич, П.А. Оценка остаточного срока службы деталей вагона с учётом управляемого риска их опасного отказа / П.А. Устич, А.А. Иванов, Ф.А. Мажидов, А.А. Салтыкова // Труды шестнадцатой научно – практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МИИТ, – 2015. – С. II-128– II-130.
89. Устич, П.А. Оценка остаточного срока службы деталей вагонов на основе статических данных об их отказах / П.А. Устич, А.А. Иванов, Ф.А. Мажидов // «Мир транспорта». – 2015. – №6. – С. 196-205.

90. Устич, П.А. Применение информационных технологий в системе технического обслуживания и ремонта вагонов / П.А. Устич, А.А. Иванов, Ф.А. Мажидов // Бюллетень транспортной информации. – 2016. – №9. – С. 13-21.

91. Устич, П.А. Некоторые аспекты проблемы нормирования уровня безопасности движения на примере железнодорожного транспорта./ П.А. Устич, А.А. Иванов, Г.В. Аверин, М.А. Кузнецов, С.В. Петров // Надёжность. – 2011. – №1, – С. 59-73.

92. Фаерштейн, Ю.О. Надёжность вагонов: информационное обеспечение / Ю.О. Фаерштейн // ж.-д. Транспорт. – 1983. – №5. – С. 34-36.

93. Фишбейн, Ф.И. Методы оценки надёжности по результатам испытаний / Ф. И. Фишбейн. – М.: Знание. –1973. – 97 с.

94. Черкашин, Ю.М. Оценка остаточного ресурса ходовых частей подвижного состава после длительного периода эксплуатации / Ю.М. Черкашин, Т.П. Северинова, С.Е. Петраков, В.Н. Меркурьев // Вестник ВНИИЖТ. – 2000. – №7. – С. 30-35.

95. Lopez, J.R. Техническое обслуживание высокоскоростных поездов в Испании. / J.R. Lopez, M. Hofmann // Железные дороги мира. – 2011. – №1. – р. 12-15.

Таблица А.1 – Носители первичной информации

№ п/п	Форма учёта	Содержание документа
1	ВУ-1	Акт о технической приёмке нового грузового вагона
2	ВУ-2	Книга учёта новых вагонов
3	ВУ-4М	Технический паспорт грузового вагона
4	ВУ-10М	Акт на исключение из инвентаря грузового вагона
5	ВУ-11	Книга учёта вагонов, исключённых из инвентарного парка
6	ВУ-22	Дефектная ведомость вагона
7	ВУ-23М	Уведомление на ремонт грузового вагона
8	ВУ-25М	Акт о повреждении вагона
9	ВУ-26	Сопроводительный листок на пересылку вагона в ремонт
10	ВУ-36М	Уведомление о приёмке вагона из ремонта
11	ВУ-41	Акт-рекламация на вагоны, не выдержавшие гарантийного срока после ремонта
12	ВУ-12	Акт о перенумеровании грузового вагона
13	ВУ-13	Ведомость на передачу заводом новых вагонов железнодорожной станции
14	ВУ-14	Книга предъявления вагонов грузового парка к техническому обслуживанию
15	ВУ-15	Книга натурального осмотра вагонов на пунктах технической передачи
16	ВУ-16	Книга учёта вагонов парка, повреждённых и отремонтированных промышленными предприятиями
17	ВУ-17	Книга номерного учёта цистерн, обработанных на промывочно-пропарочных станциях
18	ВУ-18	Книга натурального осмотра цистерн на путях станции и подачи их под налив или обработку
19	ВУ-19 ВУ-20	Акт о годности цистерн для ремонта
20	ВУ-20а	Акт о годности цистерн под налив
21	ВУ-31	Книга пономерного учёта наличия и ремонта неисправных вагонов грузового парка
22	ВУ-47	Книга учёта ремонта воздухораспределителей
23	ВУ-48	Акт о выполнении работ по модернизации вагона

24	ВУ-50	Пересылочная ведомость на отправку колёсных пар из ремонта
25	ВУ-51	Натурный колёсный листок
26	ВУ-53	Журнал ремонта и оборота колёсных пар
27	ВУ-68	Книга учёта ремонта и ревизии тормозов вагона
28	ВУ-70	Акт передачи-приёмки на баланс вагона
29	ВУ-71	Приёма-сдаточная ведомость на передачу грузовых вагонов для ремонта на завод
30	ВУ-89	Акт на исключение из инвентаря колёсных пар вагонов
31	ВУ-90	Журнал монтажа букс с роликовыми подшипниками
32	ВУ-92	Журнал промежуточной ревизии букс с роликовыми подшипниками
33	ВУ-99	Книга учёта работы пункта комплексной подготовки вагонов
34	ВУ-100	Журнал учёта показаний аппаратуры для бесконтактного обнаружения перегретых букс в поезде (ПОНАБ)