

На правах рукописи



Гасюк Александр Сергеевич

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВОВ ПО РЕСУРСУ
ИХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» на кафедре «Тяговый подвижной состав»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Оганьян Эдуард Сергеевич.

Официальные оппоненты: **Буйносов Александр Петрович,**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электрическая тяга»;

Антипин Дмитрий Яковлевич,
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет», кафедра «Подвижной состав железных дорог», учебно-научный институт транспорта, директор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Защита диссертации состоится 22 декабря 2022 года в 15 часов на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д.9, стр. 9 ауд. 2505

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ): www.mii.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Опыт эксплуатации ответственных конструкций показывает, что при достигнутом уровне научных разработок, технологических и конструкторских решений еще возможны повреждения, отказы и аварии железнодорожного подвижного состава.

Спроектированные, построенные и принятые в эксплуатацию объекты испытывают различные внешние (природные и физические) и внутренние (функциональные или технологические) воздействия. Несущие конструкции объектов деградируют, изнашиваются, стареют, вследствие чего их эксплуатационные качества ухудшаются и с течением времени они перестают отвечать своему назначению.

При этом важно подчеркнуть, что указанные дефекты часто происходят в тот отрезок времени, когда назначенный срок службы поврежденных или разрушенных объектов не был исчерпан, а иногда не превышал 10-20 %. Это указывает на то, что при традиционном назначении сроков службы по экономическим (по объему амортизационных отчислений) критериям не учитывались отмеченные факторы производства и эксплуатации.

В связи с одновременным увеличением интенсивности эксплуатации и весовых норм поездов, а также сложившаяся ситуация со старением парка тягового подвижного состава, требования безопасности делают актуальным научно обоснованное установление назначенного срока службы локомотивов, а также стала очевидной необходимость назначения сроков службы на основе расчетного и экспериментально подтвержденного ресурса безопасной эксплуатации объекта.

Под действием циклических нагрузок прочностные свойства металла деталей и конструкций экипажной части тягового подвижного состава (рам тележек, главных рам и кузовов, шкворней, деталей колесных пар и др.) деградируют, снижается их сопротивление усталости, повышаются предел текучести, хрупкость материала, что может привести к их разрушению.

В результате, для длительно эксплуатирующихся объектов железнодорожной техники возникает необходимость обоснования возможности их дальнейшей надежной эксплуатации. Это требует установления фактического технического состояния объектов с учетом накопленных в процессе эксплуатации циклических, временных, коррозионных повреждений и износа. Кроме этого

необходима оценка влияния основных конструктивных и технологических факторов, изменяющих свойства материала и определяющих наступление предельных состояний критических элементов базовых частей локомотива. На этой основе следует разработать методы оценки, восстановления и прогнозирования ресурса.

Степень разработанности темы исследования. Разработке методов исследований и решению проблем определения долговечности и ресурса в машиностроении посвящены труды многих ученых. Они нашли свое отражение в монографиях, учебниках и научных работах. Значительный вклад в развитие этой области внесли отечественные ученые: П.С. Анисимов, Д.Я. Антипин, С.В. Беспалько, А.П. Буйносов, Ю.П. Бороненко, Г.М. Волохов, Н.Н. Воронин, В.В. Кобищанов, В.А. Косарев, В.С. Коссов, В.Н. Котуранов, В.П. Ларионов, В.В. Лепов, Г.С. Михальченко, Г.И. Нестеренко, Е.Н. Никольский, Л.Н. Никольский, А.М. Орлова, Г.И. Петров, В.С. Плоткин, Д.Ю. Погорелов, Е.К. Почтенный, В.Л. Райхер, В.И. Сакало, А.Н. Савоськин, М.Н. Степнов, Л.А. Сосновский, В.Т. Трощенко, В.Н. Филиппов, В.Д. Хусидов, Ю.М. Черкашин, и многие другие.

В своей работе автор опирался на исследования, которые проводились в научно-исследовательских организациях и ВУЗах ВНИИЖТ, ИМАШ РАН, ВНИКТИ, МИИТ, ПГУПС, БИТМ и др. и труды отечественных ученых: В.В. Болотина, Л.Р. Ботвиной, Б.Б. Бунина, А.А. Буханцева, И.В. Гадолиной, А.В. Григорьева, А.С. Гусева, В.П. Когаева, В.В. Кочергина, П.И. Кудрявцева, С.Г. Лебединского, Н.А. Махутова, Б.А. Мейснера, Е.М. Морозова, Г.В. Москвитина, В.В. Москвичева, М.Н. Овечникова, Э.С. Оганьяна, В.Н. Огуенко, В.З. Партона, И.М. Петровой, А.Н. Романова, А.В. Саврухина, С.В. Серенсена, А.В. Сухова, А.В. Третьякова, А.П. Шлюшенкова, Р.М. Шнейдеровича, В.Б. Цкипуришвили.

Для решения поставленных задач автор использовал также научные основы, заложенные зарубежными исследователями, среди которых: Дж. Коллинз, С. Мэнсон, Ю. Мураками, Г. Нейбер, Р.Е. Петерсон, П. Пэрис, М.А. Майнер.

Проведенный обзор работ показал, что они в основном посвящены вопросам динамики и прочности подвижного состава, долговечности и надежности деталей машин и оборудования, поведению материалов и конструкций под действием постоянных, переменных и динамических нагрузок, работе в условиях

температурных и агрессивных сред, воздействия производственно-технологических и климатических факторов. В их развитие представляется целесообразным проведение исследований условий накопления повреждений, достижения предельных состояний и разрушения высоконагруженных конструктивных элементов в зависимости от характера силовых и временных воздействий и наработки при эксплуатации подвижного состава и локомотивов.

Цель и задачи. Целью работы является обеспечение безопасной эксплуатации локомотивов, на основе расчетно-экспериментальной оценки и прогнозирования ресурса их базовых частей.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи.

1 Исследование характеристик сопротивления много- и малоцикловой усталости типовых узлов конструкций локомотивов, в том числе после длительной эксплуатации.

2 Анализ фактического состояния и изменения механических свойств материала.

3 Исследование нагруженности несущих конструкций локомотива в натуральных условиях и на виртуальных моделях.

4 Формирование типовых спектров нагружения базовых частей локомотивов.

5 Расчетно-экспериментальная оценка и прогнозирование ресурса деталей с учетом временных факторов (процессы изменения нагрузок, деградация свойств материала) и условий эксплуатации (интенсивности и случайности воздействий).

Научная новизна работы заключается:

– в разработке методики оценки ресурса и его исчерпания на этапах жизненного цикла объекта по вероятностным параметрам его прочности и нагруженности;

– в установлении зависимости нормируемых показателей прочности от интенсивности эксплуатации локомотива;

– в разработке и применении типовых спектров нагруженности несущих конструкций локомотивов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Отказы несущих конструкций локомотивов могут угрожать нарушению безопасности и привести к большому экономическому ущербу. В современных условиях стала очевидной необходимость перехода от назначения сроков службы подвижного состава по объему амортизационных отчислений к определению его предельного состояния на основе рассчитанного, научно-обоснованного и экспериментально подтвержденного ресурса безопасной эксплуатации. Использование результатов выполненных исследований позволит сократить повреждаемость и расходы на ремонт, повысить безопасность эксплуатации локомотива на всех стадиях жизненного цикла, обеспечить снижение до приемлемого значения риска эксплуатации локомотива.

Методология и методы исследования. Предлагаемый подход для решения указанных проблем основан на принципе «безопасной эксплуатации объекта по его техническому состоянию».

Существенным для определения остаточного ресурса является исследование фактических номинальных и местных напряжений в элементах конструкций с применением современных программных комплексов и технических средств в условиях изменяющихся режимов нагружения.

Такие исследования, включающие натурную тензометрию и расчетно-экспериментальное определение механических напряжений, позволяют провести анализ нагруженности объекта, выявить наиболее уязвимые детали и критические элементы конструкций и установить возможные причины их повреждений.

Положения, выносимые на защиту

1 Методы проведения экспериментальных исследований в стендовых и эксплуатационных условиях и формирования типовых спектров нагружения базовых частей локомотивов.

2 Методики расчета долговечности и ресурса конструкций локомотива по допускаемой вероятности разрушения на основе скорректированной линейной гипотезы суммирования повреждений и аналитического решения уравнений кривой усталости.

3 Оценка долговечности и ресурса конструкций локомотива по деформационным критериям малоциклового усталости.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность научных положений и выводов обеспечивается корректным использованием численных и аналитических методов и подтверждена

совпадением результатов теоритических и экспериментальных исследований, а также опытом эксплуатации локомотивов.

Примененные в работе математические модели верифицировались на основе сопоставления с результатами натурных экспериментов, а достоверность результатов теоритических исследований обеспечивалась использованием апробированных актуализированных методик.

Основные положения диссертации докладывались на:

– Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (г. Москва, ИМАШ РАН, 2016);

– XIV Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2019);

– Международном конкурсе научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа (г. Санкт-Петербург, Министерство энергетики России, 2019);

– Международной научной конференции «Научные основы и технологии повышения ресурса и живучести подвижного состава железнодорожного транспорта» (г. Коломна, АО «ВНИКТИ», 2021);

– I Международной научно-практической конференции «Наука 1520 ВНИИЖТ: загляни за горизонт» (г. Москва, АО «ВНИИЖТ», 2021).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 149 наименований и двух приложений. Общий объем диссертации 162 страницы основного текста, включая 49 рисунков, 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведены методология и методы исследований, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности и апробации результатов.

В первом разделе изложены основные требования и принципы безопасности эксплуатации подвижного состава, критерии и показатели технического состояния локомотивов, методы обеспечения и повышения безопасности эксплуатации железнодорожной техники. Представлены основные задачи определения ресурса, а также приведен анализ повреждаемости элементов конструкций

локомотивов.

Современное развитие проблемы анализа параметров ресурса, сроков службы, условий достижений предельных состояний элементов конструкций, обуславливает необходимость совершенствования действующих традиционных подходов к обеспечению безопасной эксплуатации объектов. При этом требования к прочности, ресурсу и безопасности должны закладываться на стадии проектирования, отслеживаться на стадии изготовления и испытаний, поддерживаться в процессе эксплуатации.

Оценка технического состояния – комплекс экспериментальных и расчетных мероприятий по определению на данной стадии эксплуатации базовых характеристик основных механических свойств конструкционных материалов, напряженно-деформированных состояний, дефектности несущих элементов (деталей) объекта с учетом предыстории его проектирования, изготовления и эксплуатации.

Задача оценки и прогнозирования ресурса технических средств железнодорожного транспорта в последнее время приобрела особую актуальность. Это обусловлено как экономическими, так и организационными причинами, вызванными старением парка подвижного состава и стремлением предотвратить опасные разрушения, основываясь на нормируемых параметрах ресурса, безопасности и рисков по условиям прочности.

Решение проблемы повышения ресурса машин возможно на основе внедрения вероятностных методов расчета на прочность при переменных напряжениях, учитывающих случайный характер действующих нагрузок и вариацию характеристик сопротивления усталости материалов и деталей.

Научно-техническим обоснованием взаимосвязанных процессов прочности и ресурса безопасной эксплуатации объекта является анализ разрушающих напряжений, деформаций и долговечности критических зон объекта, основанный на расчетных, экспериментальных и эксплуатационных данных и определенный с заданной вероятностью неразрушения.

Для получения расчетной оценки работоспособности и ресурса конструкции учитывается система расчетных критериев, отражающая множественность механизмов деградации свойств конструкции в процессе изготовления и эксплуатации: прочности, устойчивости, долговечности, роста усталостных трещин.

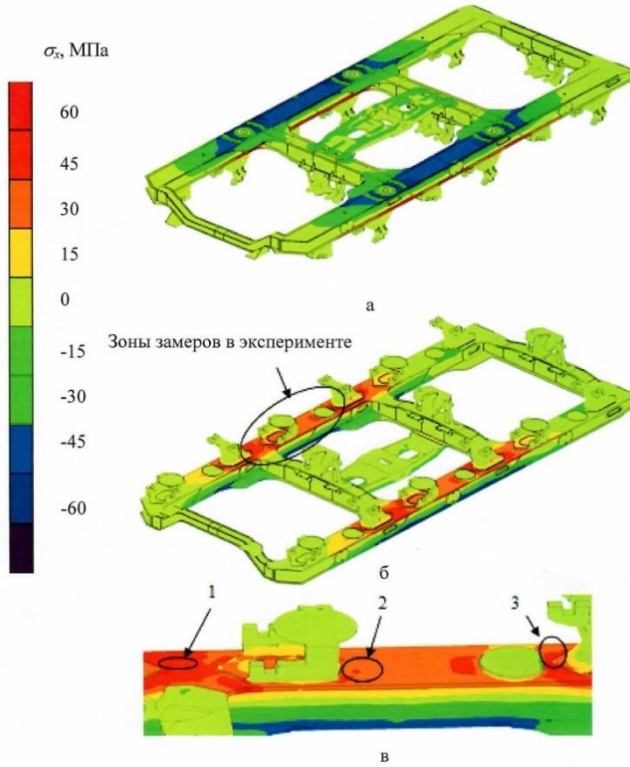
Конструкции железнодорожного подвижного состава, их критические элементы и другие ответственные детали во время эксплуатации подвергаются статическим, квазистатическим и динамическим нагрузкам, вызывающим упругие и упругопластические деформации в отдельных зонах и элементах деталей, работают в условиях тепловых воздействий и низких температур, износа и коррозии. При этом накопление повреждений в материале под воздействием указанных факторов не должно приводить к внезапным отказам и полной потере работоспособности объектов и их элементов.

Во втором разделе проводится анализ исследований характеристик много- и малоциклового усталости образцов и типовых узлов конструкций локомотивов и проведено компьютерное моделирование нагруженности несущих конструкций тепловоза.

Для обеспечения безопасности эксплуатации несущих конструкций локомотивов наиболее приемлемым представляется подход, согласно которому выход конструкции из строя происходит в результате постепенного накопления повреждений, остаточных деформаций, износа и т.п., которые, достигнув определенного значения, начинают препятствовать нормальной работе объекта. Это обуславливает разработку и внедрение вероятностных методов расчета на прочность при переменных напряжениях на основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований.

Для компьютерного моделирования нагруженности несущих конструкций был выбран экипаж тепловоза 2ТЭ25К, который представляет собой две трехосные тележки, аналогичные по конструкции тележкам тепловоза 2ТЭ116 (рисунок 1).

Показана удовлетворительная сходимость суммарных гистограмм распределения амплитуд напряжений в раме тележки, полученных при моделировании и в ходе натурных испытаний тепловоза (рисунок 2).



*а – вид на раму сверху; б – вид на раму снизу;
в – зоны (1-3) замеров напряжений в эксперименте*

**Рисунок 1 – Результаты расчета
напряженно-деформированного состояния рамы тележки**

Анализ частотных спектров различных форм колебаний секции тепловоза на рессорном подвешивании также показывает достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных частот основных видов колебаний тепловоза (таблица 1).

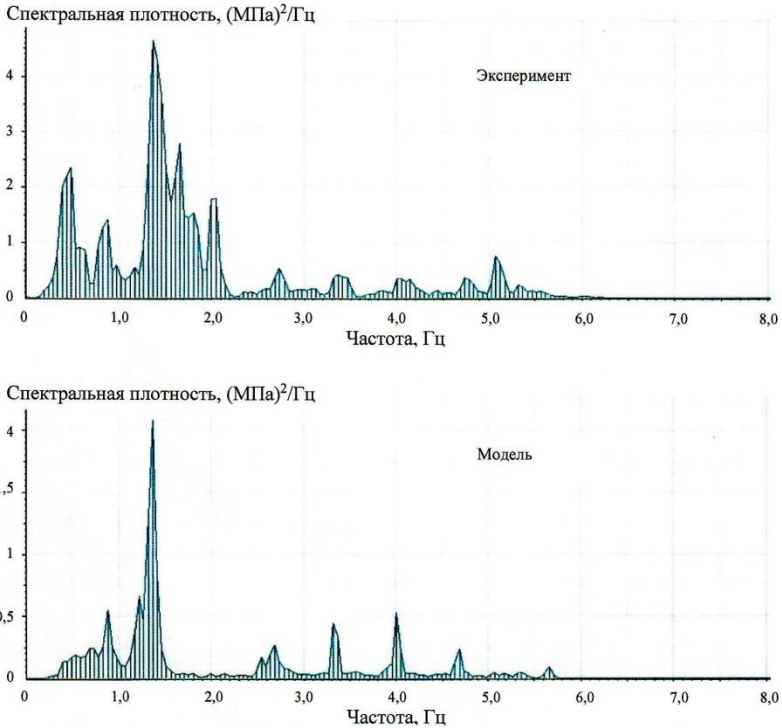


Рисунок 2 – Спектральные плотности распределения амплитуд напряжений в раме тележки тепловоза при эксперименте и моделировании

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные частоты собственных колебаний секции тепловоза на рессорном подвешивании

| Тип формы собственных колебаний | Расчет | Эксперимент |
|---------------------------------|-------------|-------------|
| | Частота, Гц | |
| Боковая качка | 1,1 | 0,7 |
| Подпрыгивание | 2,6 | 2,0 |
| Галопирование | 2,2 | 2,0 |

Полученный комплекс результатов позволил сделать вывод о возможности исследования динамико-прочностных процессов на виртуальных моделях.

В третьем разделе сформированы типовые спектры нагружения базовых частей локомотивов.

При расчете ресурса для учета эксплуатационных напряжений

различного уровня необходимо иметь суммарный режим нагружения (блок или спектр нагрузок), наиболее полно отражающий зависимость напряжений в элементах конструкции от скорости движения локомотива, их повторяемость, параметры рассеивания.

Поставленная задача была решена путем проведения натуральных ходовых динамико-прочностных испытаний тепловозов магистрального (серии 2ТЭ25К) и наиболее массового маневрового (серии ТЭМ2) типов.

После обработки сформированных массивов данных были построены суммарные гистограммы амплитуд динамических напряжений в выбранных точках конструкции, определялись их моментные характеристики, при этом учитывалось среднестатистическое распределение эксплуатационных скоростей движения локомотивов.

Полученные суммарные распределения достаточно хорошо аппроксимируются суперпозицией 3-х законов:

$$\text{Нормального } p_N = \frac{1}{S_N \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\sigma_a - m_N)^2}{2 S_N^2}}, \quad (1)$$

$$\text{Релея } p_R = \frac{\pi}{2 m_\sigma^2} \cdot \sigma_a \cdot e^{-\frac{\pi}{4 m_\sigma^2} \cdot \sigma_a^2}, \quad (2)$$

$$\text{Эрланга } p_\varepsilon = \frac{4}{m_\sigma^2} \cdot \sigma_a \cdot e^{-\frac{2}{m_\sigma} \sigma_a}, \quad (3)$$

в виде:

$$p_\sigma = C_N C_N^Y p_N + C_R C_R^Y p_R + C_\varepsilon C_\varepsilon^Y p_\varepsilon, \quad (4)$$

где C_N , C_R , C_ε – коэффициенты суперпозиции, C_N^Y , C_R^Y , C_ε^Y – коэффициенты усечения распределений.

Полученные результаты близко совпали с данными выполненных ранее исследований эксплуатационной нагруженности рам тележек тепловоза 2ТЭ116 при движении по путям большой протяженности (более 9000 км), которые также описываются указанными законами.

В таблице 2 для сравнения приведены величины математического ожидания (m_σ), дисперсии (D_σ) и среднего квадратического отклонения (S_σ), а также максимальной амплитуды (σ_{max}) экспериментальных распределений напряжений в аналогичных точках рам тележек локомотивов 2ТЭ25К и 2ТЭ116.

Таблица 2 – Характеристики экспериментальных распределений напряжений в рамах тележек

| Тепловоз | Характеристики распределений | | | |
|----------|------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| | m_σ , МПа | D_σ , МПа | S_σ , МПа | σ_{max} , МПа |
| 2ТЭ25К | 4.30 | 3,61 | 1.90 | 16,50 |
| 2ТЭ116 | 4.30 | 3,80 | 1.95 | 17,50 |

Как видно из таблицы, результаты испытаний тепловозов 2ТЭ25К и 2ТЭ116, имеющих однотипные экипажные части, практически совпадают.

В четвертом разделе предложены методики расчета долговечности и ресурса несущих конструкций локомотива:

- по допускаемой вероятности разрушения;
- на основе аналитического решения уравнения кривой усталости.

С целью выбора направления и разработки методики расчета ресурса несущих конструкций локомотива выполнен комплекс работ по исследованию эксплуатационной нагруженности экипажной части локомотивов, проведены стендовые испытания их натуральных узлов, в том числе при программном нагружении, с целью определения и уточнения характеристик сопротивления усталости. Накопленные в результате этих работ материалы подтверждают применимость, наряду с методами в детерминированной постановке, вероятностных и статистических методов оценки усталостной прочности, которые более полно учитывают случайный характер нагрузок, возникающих при движении локомотива по рельсовому пути, эксплуатационные режимы его работы, статистическую природу пределов выносливости конструкций, законы накопления усталостных повреждений, ограниченный срок службы деталей и другие факторы. В основе таких методов, применяющихся в машиностроении для расчета долговечности деталей в многоцикловой области – линейная гипотеза накопления повреждений в материале при напряжениях ниже и выше предела выносливости.

Методика расчета долговечности по допускаемой вероятности разрушения

Линейное накопление повреждений означает, что если деталь нагружается напряжениями σ_{ai} , на уровне или превышающими предел выносливости детали $\sigma_{-1\theta}$ ($\sigma_{ai} \geq \sigma_{-1\theta}$), с количеством циклов n_i , а разрушение детали при такой амплитуде напряжения согласно кривой усталости наступает при количестве циклов N_i , то в

результате этого в ней накапливается доля усталостного повреждения $\frac{n_i}{N_i}$.

В реальной эксплуатации конструкции локомотивов воспринимают нагрузки разного характера и уровня, вызывающие в них напряжения в широком диапазоне амплитуд. Для расчетов на долговечность необходимо учитывать весь спектр (блок) этих напряжений. Такой блок представлен в таблице 3, где уровни эксплуатационных напряжений заданы в виде ступенчатой последовательности амплитуд (σ_{ai}) с числом n_i и законом их распределения в относительных величинах $\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}}$, где $\sigma_{a\max}$ – максимальная амплитуда напряжения в суммарном блоке напряжений в детали.

Таблица 3 – Блок нагружения в виде ступенчатой последовательности амплитуд напряжений σ_{ai} с числом n_i и их распределение в относительных величинах

| σ_{ai} , МПа | n_i , МПа | $A_i = \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}}$ | $t_i = \frac{n_i}{N_\Sigma}$ | $A_i^m \cdot t_i$ |
|---------------------|---------------------------------|--|------------------------------|-------------------|
| σ_{a1} | n_1 | A_i | t_i | $A_1^m \cdot t_1$ |
| σ_{a2} | n_2 | A_i | t_i | $A_2^m \cdot t_2$ |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| $\sigma_{a\max}$ | n_k | 1,0000 | t_k | $A_k^m \cdot t_k$ |
| Σ | $\Sigma n_i, (N_\Sigma^\delta)$ | - | 1,0 | - |

Согласно линейной гипотезе, предложенной А. Пальмгренем и М.А. Майнером и развитой применительно к расчетам деталей машин А.И. Петрусевичем, С.В. Серенсенем, Д.Н. Решетовым, и др., разрушение должно происходить тогда, когда сумма накопленных долей усталостных повреждений достигает 1, т.е.

$$\sum_{\sigma_{ai} \geq \sigma_{-1\partial}} \frac{n_i}{N_i} = 1. \quad (5)$$

В.П. Когаевым на основании обработки большого количества экспериментальных данных была предложена скорректированная линейная гипотеза, заключающаяся в том, что разрушение наступает и в том случае если эта сумма (5) равна не 1, а величине a_p , которая может находиться в пределах $0,5 \leq a_p \leq 2,0$.

$$\sum_{\sigma_{ai} \geq \sigma_{-1\partial}} \frac{n_i}{N_i} = a_p. \quad (6)$$

С введением $t_i = n_i/N_\Sigma$ и коэффициента n_p условие разрушения (6) для кривой усталости, имеющей наклонный и горизонтальный участки, приводится к виду:

$$\frac{N_\Sigma}{N_0} = \frac{a_p}{n_p^{m_1} \cdot \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}} \geq \frac{1}{n_p}} \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}}\right)^{m_1} \cdot t_i}, \quad (7)$$

где $n_p = \frac{\sigma_{a \max}^{\text{пр}}}{\sigma_{-1\partial}}$ – безразмерный параметр, называемый коэффициентом перегрузки; $\sigma_{a \max}^{\text{пр}}$ – максимальное напряжение в предельном блоке нагружения, который подобен действующему, т.е. сохраняет те же соотношения между ступенями нагружения и вызывает разрушение детали при числе циклов N_Σ .

Уравнение (7) представляет собой уравнение так называемой вторичной кривой усталости в относительных координатах $n_p, \frac{N_\Sigma}{N_0}$ (рисунок 3), которая соответствует первичной кривой, но число циклов в ней измеряется не числом циклов приложения напряжений постоянной амплитуды, а суммарным числом циклов, включающим напряжения всех уровней, входящих в предельный блок нагружения.

В случае, если кривая усталости детали аппроксимируется двумя наклонными ветвями (первая при m_1 до базы 10^7 циклов, вторая при m_2 до 10^9 циклов, которые конструкция испытывает при длительной эксплуатации), то условие разрушения принимает вид:

$$\frac{N_\Sigma}{N_0} = \frac{a_p}{n_p^{m_1} \cdot \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}} \geq \frac{1}{n_p}} \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}}\right)^{m_1} \cdot t_i + n_p^{m_2} \cdot \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}} < \frac{1}{n_p}} \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}}\right)^{m_2} \cdot t_i}. \quad (8)$$

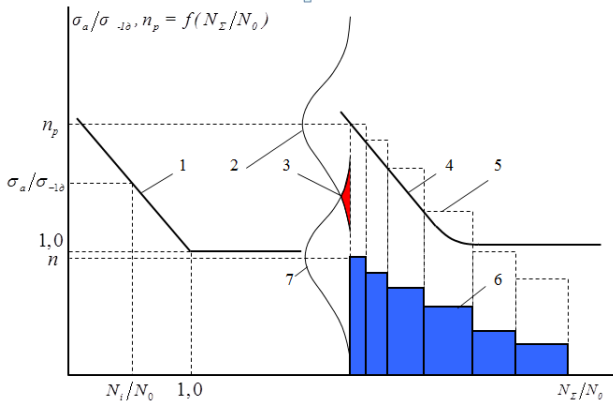
Соотношения (7) и (8) позволяют определить лишь медианное значение долговечности, т.е. значение соответствующее 50 %-ой вероятности неразрушения.

Для определения долговечности, соответствующей P %-ой вероятности неразрушения, используется формула

$$U_p = \frac{1 - \tilde{n}}{\sqrt{\tilde{n}^2 \vartheta_{-1}^2 + \vartheta_a^2}}, \quad (9)$$

где U_p – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности неразрушения P , %, \tilde{n} – относительный коэффициент запаса, равный

$$\tilde{n} = \frac{n_p}{n} = \frac{\sigma_{a \max}^{\text{пр}}}{\sigma_{a \max}}, \quad (10)$$



1 – первичная кривая усталости; 2 – закон рассеяния предела выносливости детали; 3 – зона амплитуд, вызывающих относительное повреждение детали; 4 – вторичная кривая усталости, соответствующая действующему блоку нагружения; 5 – предельный блок нагружения, пропорциональный действующему и соответствующий заданному числу циклов; 6 – действующий блок нагружения; 7 – закон рассеяния действующего блока нагружения

Рисунок 3 – Первичная и вторичная кривые усталости В
относительных логарифмических координатах

где $n = \frac{\sigma_a \max}{\sigma_{-1\theta}}$ – действительный коэффициент нагруженности детали, $\vartheta_{-1}, \vartheta_a$ – коэффициенты вариации нормально распределенных величин предела выносливости детали $\sigma_{-1\theta}$ и максимального напряжения $\sigma_a \max$ в действующем блоке нагружения.

Значения коэффициентов вариации определяются на основании анализа результатов испытаний натуральных деталей по формулам:

$$\vartheta_{-1} = \frac{S_{\sigma_{-1\theta}}}{\bar{\sigma}_{-1\theta}}, \quad \vartheta_a = \frac{S_{\sigma_a \max}}{\bar{\sigma}_a \max}, \quad (11)$$

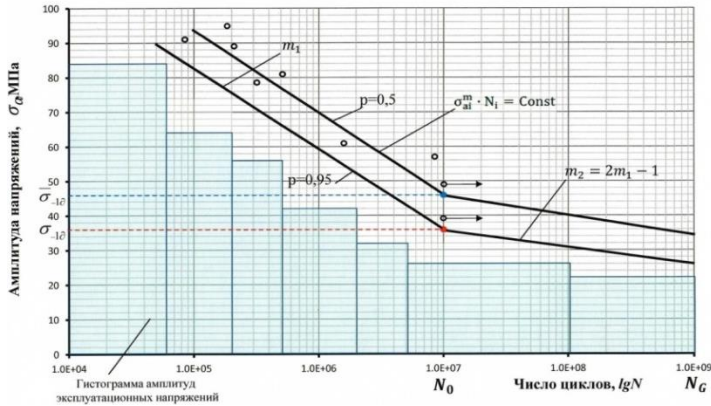
где $S_{\sigma_{-1\theta}}, S_{\sigma_a \max}$ – среднеквадратические отклонения соответствующих параметров; $\bar{\sigma}_{-1\theta}, \bar{\sigma}_a \max$ – математические ожидания (средние значения) этих параметров.

Задаваясь вероятностью неразрушения детали (P) по выражениям (7-10), определяется долговечность N_Σ (или ресурс), соответствующая этой вероятности.

Методика расчета ресурса на основе аналитического решения уравнения кривой усталости

Для деталей, подверженных многоциклового нагружению в

гигацикловой ($N_G \gg N_0$) области (например, рама тележки, детали колесной пары), накопление усталостных повреждений в материале детали характеризует кривая усталости, представляемая двумя наклонными ветвями (рисунок 4). Они описываются уравнениями вида $\sigma_{ai}^m \cdot N_i = const$ на основании гипотезы линейного суммирования повреждений.



Характеристика нагруженности детали:

m_1, m_2 – показатели угла наклона кривой усталости;

N_0, N_G – базы испытаний; $\bar{\sigma}_{-1\delta}, \sigma_{-1\delta}$ – пределы выносливости детали при вероятности неразрушения $P=0,50$ и $P=0,95$ соответственно

Рисунок 4 – Кривая усталости

Из уравнения второй наклонной ветви кривой усталости

$$\sigma_{-1\delta}^{m_2} \cdot N_0 = \sigma_{aэ}^{m_2} \cdot N_p \quad (12)$$

находим $N_p = \left(\frac{\sigma_{-1\delta}}{\sigma_{aэ}}\right)^{m_2} \cdot N_0 = n_{\sigma}^{m_2} \cdot N_0$,

где m_2 – показатель наклона кривой усталости (если известно m_1 , то $m_2 = 2m_1 - 1$), N_p – число циклов нагружения детали до предельного состояния по исчерпанию сопротивления усталости (разрушения), $\sigma_{-1\delta}$ – предел выносливости детали для заданной вероятности неразрушения (P) $\sigma_{-1\delta} = \bar{\sigma}_{-1\delta}(1 - U_p \cdot \vartheta_{-1})$, $\bar{\sigma}_{-1\delta}$ – среднее, при $P=0,5$, значение предела выносливости, $\sigma_{aэ}$ – амплитуда (эквивалентная) динамических напряжений в элементе рассматриваемой конструкции от эксплуатационных нагрузок. Она определяется в результате статистической обработки схематизированных случайных процессов с построением гистограмм текущих значений амплитуд динамических напряжений (σ_{ai}) при

различных скоростях движения с учетом их доли (P_{Vi}) в эксплуатации локомотива по формуле:

$$\sigma_{aэ} = \sqrt{\frac{m \cdot N_{\Sigma}}{N_0} \sum (P_{Vi} \cdot \sigma_{ai}^m \cdot P_{\sigma i})}, \quad (13)$$

где m – показатель наклона кривой усталости (для сварных конструкций $m_1 = 4 \dots 6$), $N_{\Sigma} = f_{\Sigma} \cdot \frac{365 \cdot 10^3}{\bar{V}} \cdot \bar{L} \cdot \tau_{cc}^p$ – суммарное число циклов динамических напряжений за расчетный срок службы τ_{cc}^p в годах, $f_{\Sigma} = \sum f_i \cdot P_{Vi}$ – эффективная частота процесса нагружения (находится в зависимости от доли каждого уровня частоты f_i) на каждой скорости движения локомотива, \bar{L} , км/сут – среднесуточный пробег локомотива, \bar{V} , м/с – расчетная средняя техническая скорость движения локомотива, $P_{\sigma i}$ – вероятность появления амплитуды напряжения i -го уровня.

Далее определяем безопасное (допускаемое) число циклов нагружения детали (эксплуатационный ресурс по числу циклов) $[N] = \frac{N_p}{n_N}$, срок безопасной эксплуатации локомотива (от даты постройки или после заданного срока его эксплуатации) где n_N – запас по долговечности.

Из формулы (13) следует, что при увеличении N_{Σ} повышается уровень $\sigma_{aэ}$, что приводит к уменьшению (исчерпанию) коэффициента запаса сопротивления усталости n_{σ} (рисунок 5).

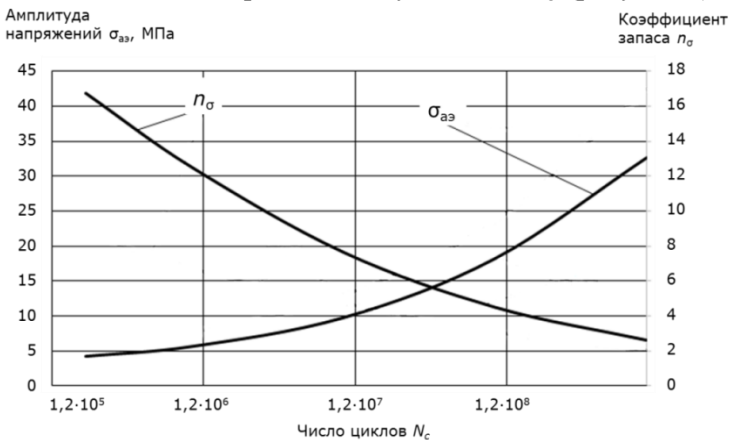


Рисунок 5 – Зависимость между коэффициентом запаса сопротивления усталости и величиной эквивалентных динамических напряжений

Тогда, при годовом пробеге N_1 , ресурс составит $[\tau_3] = \frac{[N]}{N_1}$, лет.

Предлагаемые методы могут использоваться для расчета ресурса деталей на стадии проектирования и в процессе эксплуатации для оценки остаточного ресурса и установления продленного срока службы.

Важным фактором накопления повреждений в конструкциях грузовых вагонов являются ударные нагрузки, поэтому в вагоностроении, для определения срока службы, применяется формула:

$$T_k = \frac{\left(\frac{\sigma_{aN}}{[n]}\right)^{m_1} \cdot N_0}{N_{c1} \sum_j (\sigma_{aj})^{m_1 \cdot P_{\sigma j}} + N_{c2} \sum_i (\sigma_{ai})^{m_1 \cdot P_{\sigma i}}}, \quad (14)$$

где N_{c1} – количество циклов амплитуд динамических напряжений (σ_{aj}), приведенных к эквивалентному симметричному циклу исходя из повреждающего действия нормативного распределения продольных сил за один год эксплуатации; N_{c2} – количество циклов амплитуд напряжений (σ_{ai}) от динамических воздействий при движении вагона за один год эксплуатации; σ_{aN} – предел выносливости исследуемого элемента конструкции; $[n]$ – допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости исследуемого элемента конструкции.

Пятый раздел посвящен практике применения методик расчета долговечности и ресурса, приведенных в третьем разделе, на примере экипажной части локомотива. При этом учитывалась возможность появления упругопластических деформаций в отдельных высоконагруженных элементах конструкций локомотивов (шкворневой узел, концевые части главной рамы).

Приведенные оценки ресурса рам тележек (47-51 год) хорошо согласуются с данными по наработкам основных типов эксплуатирующихся тепловозов серий 2М62, 2ТЭ116, 2ТЭ10 без повреждений более 40 лет. Следовательно, указанные методики могут применяться для решения задач оценки ресурса и прогнозирования технического состояния несущих конструкций экипажной части локомотивов при установлении назначенных сроков службы на этапе проектирования и в процессе эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 По результатам проведенного анализа требований и установленных нормативно-техническими документами методик исследований прочности ответственных деталей и составных частей подвижного состава предложены виды, объемы и способы проведения экспериментальных исследований для определения характеристик нагруженности и усталости базовых конструкций локомотивов с целью оценки их ресурса с учетом характера накопления повреждений, деградации свойств материала.

2 С целью уточнения коэффициента запаса сопротивления усталости:

– разработана методика определения эквивалентных напряжений в элементах конструкций на основе модификации стандартизованных моделей накопления повреждений, адекватно отражающая их фактическую нагруженность в эксплуатации;

– на основе вероятностного анализа динамико-прочностных процессов в элементах конструкций предложен способ определения количества повреждающих амплитуд напряжений в опытных реализациях по результатам натурных испытаний объектов.

3 Для расчета ресурса по накопленным экспериментальным и эксплуатационным данным с использованием современных средств сбора, обработки и хранения информации сформированы типовые спектры эксплуатационного нагружения базовых частей основных серий локомотивов.

4 Применяемые в машиностроении методы расчета долговечности деталей адаптированы для оценки ресурса конструкций локомотивов с определением параметров, более полно описывающих и адекватно отражающих повреждающие факторы, их случайный характер, предельные состояния рассматриваемых объектов. В частности, для несущих сварных конструкций локомотивов установлены: параметры повреждаемости (a_p), показатели кривой усталости (m_1 и m_2), уровни упругопластических деформаций ($\Delta\varepsilon_p$).

5 Нормативный коэффициент запаса сопротивления усталости 2,0 обеспечивает безотказную работу несущих конструкций магистральных локомотивов в течение назначенных сроков службы (25-35 лет) с вероятностью неразрушения 99,99 % (риск 10^{-4}). Однако он не в полной мере учитывает случайный характер нагрузок, действие которых способствует накоплению повреждений в материале детали, не оценивает и не дает возможность прогнозировать ее ресурс.

В дополнение к детерминированной оценке предложены методики вероятностного расчета долговечности на основе скорректированной гипотезы линейного суммирования повреждений и на основе аналитического решения уравнения кривой усталости, представленной двумя наклонными ветвями с исследованием напряженно-деформированного состояния конструкций, разработкой конечноэлементных моделей на базе современных программных средств и формированием спектров эксплуатационных нагрузок.

6 Проведен комплекс натурных стендовых статических от действия продольных сил растяжения сжатия и на усталость элементов экипажной части тепловозов и ходовых динамико-прочностных и на соударения испытаний тепловозов. Приведены примеры практического применения результатов выполненных исследований для оценки и прогнозирования технического состояния локомотивов по ресурсу несущих конструкций с целью обеспечения длительной безопасной эксплуатации.

7 На основе анализа статистических характеристик эксплуатационной нагруженности несущих конструкций локомотива показано существенное влияние на запас сопротивления усталости и его исчерпание интенсивности эксплуатации, амплитуд циклических (динамических) напряжений и частоты их изменения.

В частности определено: при увеличении среднесуточного пробега локомотива в 2 раза (с 400 до 800 км/сут.) соответственно сокращается допускаемая наработка (срок безопасной эксплуатации) со снижением коэффициента запаса сопротивления усталости базовой конструкции почти на 20 % (с 2,0 до 1,67).

8 Оценки ресурса несущих конструкций локомотивов, выполненные по разработанным методикам, хорошо согласуются с эксплуатационными данными по наработкам базовых частей основных типов тепловозов (серий ТЭМ2, 2М62, 2ТЭ116, 2ТЭ10М), эксплуатирующихся без повреждений в течение 40 и более лет. Следовательно, предложенные методики могут применяться для решения задач оценки ресурса и прогнозирования технического состояния несущих конструкций экипажной части локомотивов при установлении назначенных сроков службы новых и их продлении при модернизации и после длительной эксплуатации.

9 Рекомендуются использовать выполненные разработки для решения задач увеличения ресурса и межремонтных сроков эксплуатации железнодорожной техники с перспективой дальнейших

исследований свойств и деградационных процессов в материалах с получением результатов для объектов, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера.

**Список работ, опубликованных автором
по теме диссертации**

а) в рецензируемых научных изданиях:

1 Коссов, В.С. Методические аспекты исчерпания ресурса несущих конструкций локомотивов / В.С. Коссов, Э.С. Оганьян, Г.М. Волохов, А.С. Гасюк, Е.М. Беневоленская // Тяжелое машиностроение. – 2016.

– № 10. – С. 29–31.

2 Оганьян, Э.С. Расчетно-экспериментальная оценка ресурса базовых частей локомотивов для обеспечения их безопасной эксплуатации / Э.С. Оганьян, Г.М. Волохов, А.С. Гасюк, Д.М. Фазлиахметов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 2. – С. 39–43.

3 Оганьян, Э.С. Обеспечение безопасной эксплуатации подвижного состава на основе стратегии управления ресурсом на этапах жизненного цикла / Э.С. Оганьян, В.С. Коссов, Г.М. Волохов, М.Н. Овечников, А.С. Гасюк // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 12. – С. 36–40.

4 Гасюк, А.С. Расчетно-экспериментальные методы оценки ресурса базовых частей подвижного состава / А.С. Гасюк, Э.С. Оганьян // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019.

– № 2. – С. 74–80.

5 Оганьян, Э.С. Прогнозирование ресурса несущих конструкций локомотивов по условиям эксплуатации / Э.С. Оганьян, Г.М. Волохов, А.С. Гасюк // Известия Транссиба. – 2019. – № 2. – С. 47–54.

6 Оганьян, Э.С. Моделирование нагруженности и ресурса корпуса автосцепки численно-аналитическими методами / Э.С. Оганьян, В.С. Коссов, М.Н. Овечников, Г.М. Волохов, А.С. Гасюк // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2020. – № 5. – С. 52–56.

б) патенты:

7 Патент № 2740127 Российская Федерация, МПК C021D 7/04 (2006.01), B24B 39/00 (2006.01). Способ упрочнения накатыванием радиусной поверхности шкворня локомотива и устройство для его осуществления: № 2020121002: заявл. 18.06.2020: опубл. 11.01.2021 /

Чунин С.В., Фазлиахметов Д.М., Муравлев Е.В., Оганьян Э.С., Гасюк А.С., Щербаков В.В., Лобачев О.А., Скляр А.В., Павленко М.М.; заявитель АО «ВНИКТИ». – 4 с.: ил.

в) других изданиях и материалах конференций:

8 Махутов, Н.А. Методы определения ресурса конструкции локомотивов / Н.А. Махутов, В.С. Коссов, Э.С. Оганьян, Г.М. Волохов, А.С. Гасюк, Н.Ф. Красюков, А.Л. Протопопов // Труды международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (М., 26–28 окт. 2016 г.). – С. 76–81.

9 Оганьян, Э.С. Безопасная эксплуатация локомотивов по ресурсу их базовых частей / Э.С. Оганьян, Г.М. Волохов, А.С. Гасюк, Д.М. Фазлиахметов, Е.В. Муравлев // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 6. – С. 54–58.

10 Гасюк, А.С. Исследование нагруженности и прогнозирование ресурса базовых частей подвижного состава (тезисы) / А.С. Гасюк, Э.С. Оганьян // Материалы XIV международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты», г. Санкт-Петербург, 9–13 июля 2019 г. – С. 146–148.

11 Волохов, Г.М. Научно-техническое обоснование и прогнозирование безопасной эксплуатации по ресурсу несущих конструкций и ответственных деталей железнодорожных машин и оборудования в условиях Крайнего Севера и Арктики / Э.С. Оганьян, М.Н. Овечников, В.Н. Огуенко, А.С. Гасюк [и др.] // Сб. работ лауреатов междунар. конкурса науч., научно-техн. и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа. – М.: Министерство энергетики Российской Федерации; ООО «Технологии развития». – 2019. – С. 131–133.

12 Волохов, Г.М. Модернизация маневровых тепловозов с продлением срока службы / Г.М. Волохов, Э.С. Оганьян, Г.И. Гаджиметов, А.С. Гасюк, А.В. Папировский // Локомотив. – 2019. – № 4. – С. 32–34.

13 Oganyan, E.S. The Metal Fatigue Failure Model under a Low- and High-Cycle Loading and Using the Temperature Effect / E.S. Oganyan, G.M. Volokhov, A.S. Gasyuk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Iss. 459. – № 2 – 6 p.

14 Oganyan, E.S. Loading simulation and lifetime evaluation of automatic coupler in extreme environment / E.S. Oganyan, V.S. Kossov,

M.N. Ovechnikov, G.M. Volokhov, V.A. Bykov, A.V. Spirov, A.S. Gasyuk // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 20. P. 42–47.

15 Oganyan, E.S. The Modeling Burden and Resource of an Automatic Coupler Body by Techniques of Numerical Analysis / E.S. Oganyan, V.S. Kossov, M.N. Ovechnikov, G.M. Volokhov, A.S. Gasyuk // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49. № 5. P. 408-411.

Гасюк Александр Сергеевич

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВОВ ПО РЕСУРСУ ИХ
НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Подписано в печать
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 80 экз. Заказ

Формат бумаги 60×84/16

127994, Москва, ул. Образцова, д.9, стр. 9