

На правах рукописи

**ВАСИЛЬЕВ**  
Алексей Викторович



**ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ И  
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА  
ВАГОНОВ-ТРАНСПОРТЕРОВ**

Специальность 05.22.07 — Подвижной состав железных  
дорог, тяга поездов и электрификация

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
2005

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Федерального агентства железнодорожного транспорта» (ПГУПС ФАЖТ РФ) на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство».

Научный руководитель –  
доктор технических наук, доцент  
**Третьяков Александр Владимирович**

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор  
**Бачурин Николай Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент  
**Осипов Станислав Александрович**

Ведущее предприятие – Омский государственный университет путей сообщения.

Защита состоится «16» декабря 2005 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 218.008.05 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Федерального агентства железнодорожного транспорта Российской Федерации» по адресу: 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9, ауд. 5-407.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Петербургского государственного университета путей сообщения.

Автореферат разослан «16» ноября 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



**В.А. КРУЧЕК**

Подписано к печати 11.11.05г.

Печ.л. – 1,5

Печать - ризография. Бумага для множит. апп. Формат 60x84 1\16

Тираж 100 экз. Заказ № 1234

СР ПГУПС

190031, С-Петербург, Московский пр. 9

2006-4  
26125

2244222

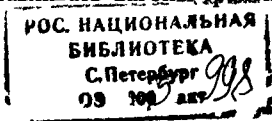
## Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Современный этап развития парка грузовых вагонов стран СНГ, Латвии, Литвы и Эстонии характеризуется медленным, но неуклонным ростом объёма перевозок. Однако позитивные тенденции, сдерживаются старением вагонного парка – многие вагоны уже вынужденно работают за пределами своего нормативного срока службы, а их пополнение ведётся недостаточными темпами. Это наглядно иллюстрируют статистические данные, приведённые в Федеральной целевой программе «Модернизация транспортной системы России (на 2002 – 2010 годы)».

Все тенденции, присущие вагонному парку в целом, можно отнести и к парку вагонов-транспортёров. В настоящее время (данные на конец 2004 года) в эксплуатационном парке ОАО «РЖД» находятся 1439 транспортёров различных типов, из которых 304 уже выработали свой назначенный ресурс. Часть из них базируются на специальных тележках, которые в настоящее время сняты с производства.

В 60-70 годы прошлого века при проектировании вагонов-транспортёров применялись упрощённые методы расчёта напряженно-деформированного состояния конструкций, что зачастую являлось причиной необоснованного завышения коэффициентов запаса прочности металлоконструкций транспортёров. Это, в свою очередь, приводило к созданию вагонов-транспортёров, обладающих хотя и не самыми лучшими технико-экономическими параметрами, но весьма надёжных и долговечных, то есть имеющих значительный остаточный ресурс.

Развитие методов расчёта, технического диагностирования и экспериментальных исследований, базирующихся на современных программно-технических средствах ЭВМ, а также накопление значительных объёмов статистической информации по испытаниям и эксплуатации, позволяют в настоящее время проектировать и изготавливать вагоны-транспортёры с



рациональными технико-экономическими параметрами. Остаточный ресурс новых конструкций даёт возможность эксплуатировать вагоны лишь до достижения ими строго обоснованного нормативного срока службы.

Существенное различие в объёмах остаточного ресурса вагонов разных лет постройки подтолкнуло автора диссертации к выдвижению гипотезы о возможности рационального использования избыточного остаточного ресурса вагонов-транспортёров старых лет постройки для продления срока их эксплуатации за пределами срока службы, установленного нормативно-технической документацией. Для подтверждения (или опровержения) этой гипотезы необходимо было разрешить проблему уточнённой оценки прочности и долговечности конструкции вагона-транспортёра, эксплуатировавшегося длительное время в условиях повышенной радиации и целого ряда других вредных факторов, учёт которых ранее не проводился.

Цель работы - оценка нагруженности и прогнозирование остаточного ресурса вагонов-транспортёров, позволяющие проводить целенаправленное управление этим ресурсом и осуществлять безопасную эксплуатацию вагонов за пределами их нормативного срока службы.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

1. Проведён обзор и анализ существующих типов вагонов-транспортёров и выполнена их классификация, учитывающая особенности конструкции, их статическое и динамическое нагружение в эксплуатации и повреждающие факторы, влияющие на остаточный ресурс транспортёров.
2. На основе расчётно-экспертно-статистического метода разработан и апробирован алгоритм проведения технического диагностирования вагонов-транспортёров с целью продления срока их службы.
3. Проведены исследования напряженно-деформированного состояния транспортёра ТК-8 при различных режимах нагружения и степени

коррозионного износа его отдельных конструктивных элементов с целью определения зон концентраций напряжений.

4. Изучены временные закономерности изменения физико-механических характеристик стали металлоконструкции вагона-транспортёра ТК-8, а также влияние радиации и других вредных факторов на изменение свойств металла, из которого изготовлен транспортер.

#### Практическая значимость работы.

Выполненная классификация повреждающих факторов позволила произвести выбор рациональной схемы определения остаточного ресурса в зависимости от условий эксплуатации транспортёра.

Разработанный алгоритм проведения технического диагностирования позволяет определять критические места в конструкции транспортеров, для которых необходимо проведение дополнительных объёмов неразрушающего контроля. Это даёт экономию средств за счёт уменьшения объёмов контроля существующими методами (ультразвуковой и капиллярный контроль). По результатам неразрушающего контроля и проведенных металлографических исследований, а также расчётов остаточного ресурса было сделано заключение о возможности дальнейшей эксплуатации транспортера ТК-8 сверх установленного нормативного срока службы.

Реализация результатов работы. Результаты работы были использованы при проведении комплекса работ по техническому диагностированию и продлению срока службы специализированного транспортера ТК-8, находящегося в собственности Ленинградской атомной электростанции (ЛАЭС). Результаты работы использованы при разработке методик технического диагностирования и продлении срока службы различных типов транспортеров. Отдельные положения и результаты работы применяются при проведении научных исследований, выполнении дипломных работ, бакалаврских и магистерских диссертаций на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» ПГУПС.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научно-технических конференциях: «Подвижной состав 21 века (идеи, требования, проекты) (ПГУПС, Санкт-Петербург, 2001, 2003, 2005 г.г.), «Шаг в будущее (Неделя науки)» (ПГУПС, Санкт-Петербург, 2001, 2003, 2005 г.г.). «Проблемы механики железнодорожного транспорта. Динамика, надежность и безопасность подвижного состава» (г. Днепропетровск, Украина, 2004 г.), на научных семинарах кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПГУПС (2001, 2004, 2005 г.г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 6 печатных работах, отдельные результаты теоретических и экспериментальных исследований приведены в двух научно-технических отчетах.

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, 5 глав, заключение и изложена на 142 страницах машинописного текста, в том числе 17 таблиц, 52 рисунка. Список используемых источников насчитывает 127 наименований.

### **Основное содержание диссертации**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель работы, ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен обзор и анализ исследований по определению остаточного ресурса конструкций вагонов, выполнен обзор работ в области теории и методов расчета вагонов, сформулированы задачи, выбраны методы и алгоритм исследований.

Большой вклад в развитие теорий и методов исследований вагонов внесли отечественные ученые: П.С. Анисимов, Н.С. Бачурин, Е.П. Блохин, А.А. Битюцкий, Ю.П. Бороненко, В.М. Бубнов, В.И. Варава, М.Ф. Вериги, С.В. Вершинский, Л.О. Грачева, Б.А. Деркач, В.Н. Данилов, В.Д. Данович, Ю.В. Демин, А.А. Камаев, В.А. Камаев, Л.А. Кальницкий, В.Г. Кеглин, М.Б. Кельрих, С.Н. Киселев, М.Л. Коротенко, В.Н. Котуранов, В.А. Лазарян, В.В. Лукин, Л.А. Манашкин, Л.Н. Никольский, Е.Н. Никольский, В.К.

Окишев, Г.И. Петров, А.П. Приходько, Ю.С. Ромен, А.В. Смольянинов, М.М. Соколов, В.Ф. Ушкалов, А.А. Хохлов, В.Д. Хусидов, В.Н. Филиппов, И.И. Челноков, Н.А. Чурков, Л.А. Шадур, Ю.М. Черкашин, А.Д. Кочнов, а также зарубежные ученые Г. Марье, Е. Шперлинг и др. Этими учеными решен ряд фундаментальных задач, позволяющих определять рациональные конструктивные схемы и параметры проектируемых узлов подвижного состава. На протяжении многих лет вопросами исследования прочности и надежности, анализа технического состояния вагонов в эксплуатации занимались научно-исследовательские и производственные организации: ВНИИЖТ, ГосНИИВ, МГУПС, ПГУПС, ДИИТ, УрГУПС, концерн «Азовмаш», Крюковский, Тверской, Кременчугский и Уральский вагоностроительные заводы, ПКБ ОАО «РЖД» и ряд других организаций.

Как показал обзор и анализ научно-технической информации, посвященной проблеме прогнозирования технического состояния конструкций, в том числе и железнодорожных вагонов-транспортёров, задача прогнозирования технического состояния вагона формулируется следующим образом: по наблюдению (расчету) процесса изменения показателей качества или отдельных параметров узлов вагона на определенном интервале времени прогнозируют их значения в некоторый будущий момент времени, и её решение обычно включает три этапа: получение информации о контролируемых параметрах и ее качественный и количественный анализ с целью определения закономерностей изменения этих параметров; выбор подхода к прогнозированию, способа и метода прогнозирования; выполнение вычислительных операций и получение результата прогноза.

Индивидуальный ресурс вагона-транспортёра является важной его технико-экономической характеристикой. Управление индивидуальным ресурсом не только позволяет предупреждать возможные отказы и непредвиденные достижения предельных состояний, но и более правильно планировать режимы эксплуатации, профилактические мероприятия и снаб-

жение запасными частями. Внедрение системы управления индивидуальным ресурсом вагонов-транспортёров основывается на новых подходах с широким использованием методов компьютерного моделирования, технической диагностики и экспертных систем, позволяющих получать обобщенную информацию и разрабатывать рациональные варианты принятия решений по определению остаточного ресурса транспортёров.

Анализ исследований по проблемам, связанным с выбором метода прогнозирования остаточного ресурса показал, что различными исследователями, вузами, научно-исследовательскими институтами и конструкторскими бюро такими, как ВНИИЖТ, МГУПС, ПГУПС, УралНИТИ, ВМА им. Кузнецова был рассмотрен большой класс задач, связанных с диагностированием конструкций: оценка остаточного ресурса конструкций по параметрам магнитной памяти (анизотропии) металла; исследование ресурса конструкций с помощью статических прочностных и динамических ударных испытаний; прогнозирование остаточного ресурса по параметрам малоцикловой и многоцикловой усталости.

Впервые вопросы обоснования возможности продления сроков службы вагонов, в том числе транспортёров, и способов определения их остаточного ресурса были рассмотрены в работах Ю.П. Бороненко, М.Б. Кельриха, А.Д. Кочнова, В.Н. Цюренко. Также необходимо отметить вклад ученых Днепропетровского государственного технического университета железнодорожного транспорта: И.Г. Барбаса, Е.П. Блохина, А.М. Бондарева, В.Л. Горобца, В.И. Гронского, Н.В. Каленик - в разработку отдельных вопросов, связанных с ресурсом тягового подвижного состава.

Большое количество экспериментальных исследований посвящено определению остаточного ресурса конструкций, имеющихся в достаточном количестве, например, грузовых вагонов. Разработаны методики, позволяющие проецировать результат на крупные партии вагонов. Значи-



тельно менее изученной оказалась ситуация с вагонами-транспортёрами, в силу их единичности предъявления для продления и уникальности.

Подытоживая сделанный обзор, был сделан вывод о том, что весьма актуальной задачей является разработка методик диагностирования технического состояния и определения остаточного ресурса вагонов-транспортёров различных типов.

Исходя из цели диссертационной работы и проведенного выше обзора и анализа вопроса, в данной работе из общей проблемы прогнозирования остаточного ресурса конструкций вагонов были поставлены и решались следующие задачи:

1. Провести анализ состояния парка вагонов-транспортёров и выполнить их классификацию по конструктивным параметрам с точки зрения проведения работ по определению остаточного ресурса.
2. На основе анализа разрушающих факторов, действующих на металлоконструкцию транспортёра, выбрать варианты расчётных и экспериментальных исследований его остаточного ресурса.
3. Исследовать напряженно-деформированное состояние металлоконструкции вагона-транспортёра ТК-8 и оценить её запасы прочности с учётом механических свойств материала и реального эксплуатационного нагружения.
4. Разработать программу и методику определения остаточного ресурса специализированных вагонов-транспортёров для перевозки отработанного ядерного топлива.
5. Произвести расчёт остаточного ресурса металлоконструкции вагона-транспортёра ТК-8 на основе имитационного моделирования старения металла конструкций и воздействия ряда вредных эксплуатационных факторов.
6. Экспериментально апробировать разработанную методику при производстве работ на вагоне-транспортёре ТК-8, принадлежащем

Ленинградской атомной электростанции, с учетом дополнительных факторов, влияющих на остаточный ресурс.

Данная схема проведения исследований позволила разработать научно-методологическую базу проведения расчетов по имитации старения конструкции, выявить основные временные закономерности изменения напряженно-деформированного состояния вагонов-транспортёров, создать алгоритм проведения исследований по определению остаточного ресурса и оценить достоверность полученных результатов в ходе эксплуатации транспортёров за пределами их нормативного срока службы.

Решение поставленных в диссертации задач проводилось путем комбинации теоретических методов исследования, современных методов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований.

Вторая глава диссертации посвящена анализу парка и классификации существующих конструкций вагонов-транспортёров.

Анализ парка показал, что поступлений новых транспортёров в парк ОАО «РЖД» за последние пять лет не было. Увеличение парка происходило только за счет вновь обнаруженных единиц или передачи транспортёров с других дорог стран СНГ и Балтии, а старые транспортёры исключались из инвентарного парка по истечении нормативного срока службы. В связи с этими факторами как в России, так и в странах СНГ, Латвии, Литвы и Эстонии в целом сложилась неблагоприятная ситуация с обновлением парка транспортёров

Чтобы получить представление о типовом составе парка транспортёров с просроченным сроком службы, был проведен анализ парка транспортёров собственности ОАО «РЖД». Из него следует, что большую часть транспортёров (около 63%), исчерпавших нормативный срок службы, составляют транспортёры площадочного типа, а вместе со сцепными транспортёрами их доля составляет около 83% от общего числа вагонов-транспортёров.

Из-за конструктивных особенностей в ходовых частях транспортеров применяются тележки различных типов. В сочлененных и сцепных транспортерах большой осности, как правило, используются специальные (тендерные) тележки моделей 18-6053 (двухосная) и 18-6052 (четырёхосная). Для других транспортеров используются различные комбинации специальных тележек моделей 18-6053, 18-6052, "ВЗОР" с серийными – КВЗ-1М, 18-102, 18-101, 18-100.

В связи с тем, что тележки модели КВЗ-1М производства Крюковского вагоностроительного завода не выпускаются почти 30 лет, а замена их на трехосные тележки модели 18-102 производства УВЗ невозможна из-за разницы в длине базы (1500 мм у тележки мод. КВЗ-1М и 1750 мм у мод. 18-102) они могут быть отнесены к специальным. Поэтому был произведен анализ модельного ряда и используемых ходовых частей с целью определения процентного соотношения стандартных (типовых) и специальных (снятых с производства) тележек. Результаты анализа показывают, что серийными тележками, производимыми в настоящее время, оснащены около 90% всех транспортеров с просроченным сроком службы, находящихся в собственности ОАО «РЖД».

Из-за сложности конструкции и наличия дополнительных устройств наибольшие затруднения вызывает оценка остаточного ресурса сцепных и сочленённых транспортёров, а так же специализированных вагонов-транспортёров, спроектированных под перевозку определённого груза и эксплуатирующихся в особых условиях. Для этих вагонов-транспортёров при оценке и прогнозировании остаточного ресурса необходим индивидуальный подход, позволяющий учитывать особенности эксплуатации и историю нагружения металлоконструкции.

В настоящее время пятнадцать специализированных вагонов-транспортёров ядерного топливного комплекса Российской Федерации, используемых для перевозки специальных транспортных упаковочных ком-

плектов с отработанным ядерным топливом, выработали свой нормативный срок службы и требуют проведения технического диагностирования с целью определения остаточного ресурса и продления срока службы.

Исходя из этих предпосылок, в диссертации была разработана классификация транспортеров, с точки зрения проведения работ по определению остаточного ресурса и продления срока службы. Одним из критериев, по которому проводилась классификация, стала общность схемы обследования вагонов-транспортеров. По этому критерию транспортеры были разбиты на три группы, для каждой из которых была разработана методика технического диагностирования. Это транспортеры площадочного, колодецевого и платформенного типов; транспортеры сцепного типа; транспортеры сочлененного типа. Специфика эксплуатации транспортеров учитывалась с помощью характеристик, влияющих на объём технического диагностирования и на срок возможного продления. К таким характеристикам были отнесены интенсивность их использования и полигон эксплуатации.

На втором этапе работ была проведена классификация механических разрушений, возникающих в конструкции транспортёров, в зависимости от условий их эксплуатации.

Исходя из анализа условий эксплуатации, были выбраны те разрушающие факторы, которые оказывают наиболее существенное влияние на техническое состояние и остаточный ресурс исследуемого вагона-транспортера. Этими факторами являются: упругая деформация, вызванная действием внешних нагрузок; текучесть; хрупкое разрушение; усталость: коррозионная, многоцикловая, малоцикловая; коррозия: химическая, щелевая; разрушения при ударе: разрыв при ударе, деформирование при ударе; радиационное повреждение; коррозионный износ.

Третья глава диссертации посвящена оценке нагруженности и запаса прочности металлоконструкции вагона-транспортёра ТК-8, принадлежащего Ленинградской атомной электростанции.

Была создана конечно-элементная (КЭ) модель рамы транспортёра, как основной его несущей части, показанная на рис.1. КЭ модель рамы транспортёра имела следующие параметры - 10164 узла и 20596 элементов, из которых 8546 - объёмные и 12050 - пластинчатые.

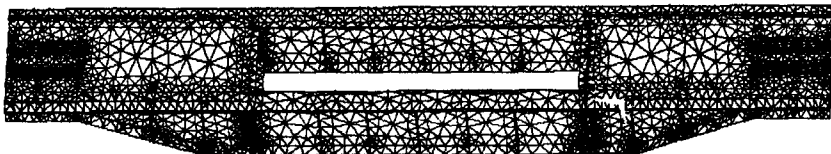


Рис.1 Конечно-элементная модель рамы транспортера.

На первом этапе теоретических исследований, в соответствии с действующими «Нормами для расчета и проектирования новых и модернизируемых железнодорожных транспортеров общего назначения колеи 1520 мм», были проведены расчёты для I и III нормативных расчётных режимов нагружения (удар, рывок, растяжение, сжатие) и специального режима погрузки-выгрузки. Величины продольных сил для I и III расчетных режимов принимались соответственно 2,5МН и 1,0МН. Результаты расчетов для режима «растяжение» приведены в табл. 1.

В результате расчетов было установлено, что максимальные напряжения возникают в нижнем листе концевой части вагона-транспортёра. При приложении растягивающих нагрузок и в режиме погрузки эти напряжения локализуются в районе пересечения промежуточной средней балки с продольными стойками и составляют: при I режиме нагружения – 197 МПа, при III режиме – 150 МПа и 187 МПа – при режиме погрузки-выгрузки. При приложении сжимающих нагрузок напряжения достигают максимальных величин в районе пятниковой плиты: 188 МПа – при I режиме и 147 МПа – при III режиме нагружения.

В боковых несущих балках максимальные напряжения возникают в зонах изменения высоты сечения двутавров. При приложении сжимающих нагрузок эти напряжения составляют: 169 МПа – для I расчётного режима

и 104 МПа – для III режима нагружения. Эти зоны металлоконструкции транспортёра являются наиболее опасными, так как в нижнем листе наблюдаются максимальные напряжения в конструкции, а в боковые балки являются основными несущими элементами транспортера.

Таблица 1

Максимальные эквивалентные напряжения в элементах транспортёра,  
полученные при I и III расчётных режимах

| Наименование элемента   | Максимальные эквивалентные напряжения, МПа |                     |       |                     |                     |       |
|---|--|---------------------|-------|---------------------|---------------------|-------|
|   | I режим                                    |                     |       | III режим           |                     |       |
|   | растяжение<br>2,5МН                        | растяжение<br>1,5МН | $n_s$ | растяжение<br>1,0МН | растяжение<br>0,8МН | $n_s$ |
| Полки боковой несущей балки (концевая часть)                        | 55   | 32                  | 1,72  | 18                  | 12                  | 1,50  |
| Полки боковой несущей балки (участок переменной высоты)             | 98   | 60                  | 1,63  | 51                  | 48                  | 1,06  |
| Полки боковой несущей балки (средняя часть)                         | 42   | 36                  | 1,17  | 46                  | 43                  | 1,07  |
| Вертикальный лист боковой несущей балки (концевая часть)            | 35   | 30                  | 1,17  | 40                  | 38                  | 1,05  |
| Вертикальный лист боковой несущей балки (участок переменной высоты) | 36   | 30                  | 1,20  | 37                  | 32                  | 1,16  |
| Вертикальный лист боковой несущей балки (средняя часть)             | 52   | 51                  | 1,02  | 53                  | 51                  | 1,04  |
| Промежуточная балка средняя (ближняя к колодцу)                     | 133  | 125                 | 1,06  | 129                 | 120                 | 1,08  |
| Район крепления пятниковой плиты (нижний лист)                      | 139  | 91                  | 1,53  | 108                 | 98                  | 1,10  |
| Поперечные колодезные балки   | 21   | 20                  | 1,05  | 27                  | 25                  | 1,08  |
| Продольные промежуточные балки                                      | 105  | 92                  | 1,14  | 101                 | 88                  | 1,15  |
| Верхний лист  | 68   | 57                  | 1,19  | 53                  | 50                  | 1,06  |
| Нижний лист   | 197  | 173                 | 1,14  | 150                 | 135                 | 1,11  |
| Шкворневая балка  | 89   | 76                  | 1,17  | 92                  | 85                  | 1,08  |
| Промежуточная балка крайняя   | 47   | 42                  | 1,12  | 40                  | 33                  | 1,21  |

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что прочность транспортёра для всех расчетных нормативных режимов нагружения удовлетворяет требованиям «Норм...».

На втором этапе работы было исследовано влияние различных вариантов симметричного и несимметричного распределения силы тяжести груза на напряженно-деформированное состояние конструкции транспортера ТК-8. На рис. 2 приведена зависимость изменения максимальных эк-

вивалентных напряжений от величины продольного смещения перевозимого груза от центра транспортного средства.

Третий этап выполненных расчётов характеризовался соответствием силовых и кинематических граничных условий реальным режимам эксплуатации вагона-транспортёра на подъездных путях Ленинградской атомной электростанции, которые существенно отличались от нормативно установленных режимов нагружения.

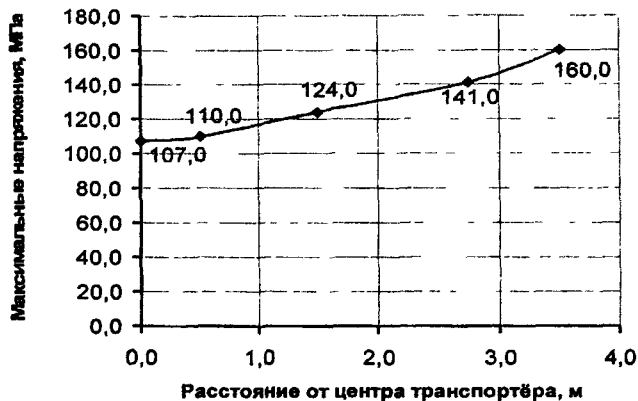


Рис.2 Зависимость максимальных эквивалентных напряжений от несимметричности расположения груза

Для оценки влияния условий реальной эксплуатации был произведён расчёт напряженно-деформированного состояния вагона-транспортёра ТК-8 для наиболее опасных случаев нагружения конструкции, выявленных ранее, с откорректированными расчётными нагрузками. Такими случаями являются варианты «растяжение» для I и III режимов, в которых получены напряжения, максимально приближенные к допускаемым.

Так как транспортёр ТК-8 эксплуатируется в сцепе с локомотивом со скоростями движения не более 10 км/ч, то в соответствии с «Нормами ...», для I режима была принята растягивающая продольная нагрузка  $N = 1,5$  МН, а для III – 0,8 МН. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Сопоставление результатов расчета при нормативном нагружении и при реальных эксплуатационных нагрузках позволило установить увеличение коэффициентов запаса прочности практически для всех зон металлоконструкции транспортера, максимальное значение коэффициента запаса составило 1,72 – для полок боковой несущей балки.

В четвертой главе производился выбор критериев оценки остаточного ресурса вагонов-транспортёров с учётом особенностей их эксплуатации. Для прогнозирования остаточного ресурса вагонов-транспортёров был разработан обобщённый алгоритм оценки остаточного ресурса вагонов-транспортёров.

В соответствии с ним проводится визуальный контроль (наружный осмотр) рамы транспортёра и толщинометрия основных несущих элементов конструкции транспортёра. На этом же этапе выполняется контроль сварных швов и наиболее нагруженных зон металлоконструкции транспортёра методами, основанными на магнитной памяти (анизотропии) металла, после этого проводится дефектоскопия стандартными методами (ультразвуковая дефектоскопия и капиллярный контроль). Эта работа выполняется посредством измерительных приборов с целью выявления зон и степени утонения элементов, а также обнаружения мест концентрации напряжений в металлоконструкции транспортёра. Последним этапом экспериментальных работ согласно алгоритму, является проведение металлографических исследований.

Исходя из проведённого анализа разрушений, возникающих в конструкции транспортёров, для прогнозирования вновь назначаемого срока службы, в данной работе использовались: обобщённый показатель расхода индивидуального ресурса транспортёра и специализированные критерии, учитывающие действие на элементы базовых частей транспортёра коррозии, изменения механических характеристик металла, много – и малоцикловой усталости, возможности хрупкого разрушения. Дополнительно было



рассмотрено влияние длительного воздействия радиации на механические свойства металла конструкции.

Прогнозирование остаточного индивидуального ресурса транспортного средства по специализированным критериям выполнялось следующим образом. Остаточный ресурс базового элемента транспортного средства  $T_k$ , подвергающегося действию коррозии, определялся по зависимости:

$$T_k = \frac{S_\phi - S_p}{a}, \quad (1)$$

где  $S_\phi$  - фактическая минимальная толщина стенки элемента, мм;

$S_p$  - расчётная толщина стенки элемента, мм;

$a$  - скорость равномерной коррозии, мм/год.

Величина расчётного срока эксплуатации в годах  $T_k$  по критерию многоциклового усталости определялась по зависимости:

$$T_k = \frac{(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]})^m \cdot N_0}{N_{c1} \sum_j (\sigma_{aj}^I)^m \cdot P_j^I + N_{c2} \sum_k (\sigma_{ak}^{II})^m \cdot P_k^{II} + N_{c3} \sum_n (\sigma_{an}^{III})^m \cdot P_n^{III}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{a,N}$  - предел выносливости по амплитуде для контрольной зоны транспортного средства при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов  $N_0$ ;

$[n]$  - допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости;

$m$  - показатель степени в уравнении кривой усталости;

$T_k$  - расчётный срок эксплуатации в годах;

$N_0$  - базовое число циклов;

$N_{c1,2,3}$  - число циклов динамических напряжений, действующих на вагон соответственно через автосцепку, от колебаний на рессорах, эксплуатационных (погрузки- выгрузки) и др.;

$\sigma_{a,i}$  ( $i=j,k,n$ ) - расчётная величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведённая к

базовому числу циклов  $N_0$ , эквивалентная по повреждающему действию реальному режиму эксплуатационных случайных напряжений за расчётный срок эксплуатации;

$\sigma_{aj}^I$  - амплитуды динамических напряжений в  $j$  диапазонах ударных продольных сил;

$\sigma_{ak}^{II}$  - амплитуды динамических напряжений от колебаний на рессорном подвешивании (в  $k$  диапазонах);

$\sigma_{an}^{III}$  - амплитуды динамических напряжений от циклов погрузки-выгрузки (в  $n$  диапазонах);

$P_{j,k,n}^i$  (где  $i=I,II,III$ ) - частота возникновения амплитуд при соответствующих нагрузках.

Из условия малоциклового усталости расчётный срок эксплуатации

$T_k$  определялся по зависимости:

$$T_k = \frac{1}{\sum_i \frac{N_i}{[N]_i}} \quad (3)$$

где  $N_i$  - число циклов  $i$ -го нагружения за 1 год эксплуатации;

$[N]_i$  - допускаемое число циклов  $i$ -го нагружения.

Оценка остаточного срока службы транспортёра по изменению пластичности проводилась по зависимости:

$$\psi = \frac{\sigma_T}{\sigma_B} = \frac{\sigma_T + ct + et^2}{\sigma_B + at + bt^2} + k_1 + k_2, \quad (4)$$

где  $\sigma_B$  и  $\sigma_T$  - соответственно пределы прочности и текучести материала;

$a, b, c, e$  - параметры, отражающие процесс старения, определяются на основе имеющихся экспериментальных данных путем их аппроксимации и в соответствии с критерием подобия процессов деформирования и разрушения металлов од-

ной группы и постоянно уточняются при получении новых данных;

$k_1$  и  $k_2$  - поправочные коэффициенты условий эксплуатации, отражающие влияние температуры и возникающих в конструкции напряжений.

Оценка остаточного ресурса по параметрам снижения ударной вязкости металла  $a_n$  в результате старения производилась по зависимости:

$$a_n = \begin{cases} \gamma t^2 + \eta t + a_{n0}, & 0 \leq t < 5 \\ \mu \exp(-(\lambda + \beta t^3)), & t \geq 5, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\gamma$ ,  $\eta$ ,  $\mu$ ,  $t$ ,  $\lambda$ ,  $\beta$  - параметры, отражающие процесс старения относительно исходного значения ударной вязкости  $a_{n0}$ , эти параметры определяются на основе имеющихся экспериментальных данных путем их аппроксимации и в соответствии с критерием подобия процессов деформирования и разрушения металлов одной группы и постоянно уточняются при получении новых данных.

В пятой главе произведена оценка остаточного ресурса и продление срока службы вагона-транспортёра ТК-8 Ленинградской атомной электростанции.

По алгоритму, описанному автором в 4 главе, для расчёта остаточного ресурса транспортёра по критериям допустимого коррозионного износа необходимо определить среднюю скорость коррозии его металлоконструкций по зависимости:

$$a = \frac{S_\phi(t_1) - S_\phi(t_2)}{(t_2 - t_1)K_1K_2}, \quad (6)$$

где  $S_\phi(t_1), S_\phi(t_2)$  - фактическая толщина стенки элемента при первом и втором обследованиях соответственно, мм;

- $t_1, t_2$  - время от момента начала эксплуатации до момента первого и второго обследования соответственно, лет;
- $K_1$  - коэффициент, учитывающий отличие средней ожидаемой скорости коррозии от гарантированной скорости коррозии с доверительной вероятностью  $\gamma = 0,7+0,95$ ;
- $K_2$  - коэффициент, учитывающий погрешность определения скорости коррозии по линейному закону, от скорости коррозии, рассчитанной по нелинейным законам.

В ходе технического диагностирования был проведен визуальный контроль и толщинометрия рамы вагона-транспортёра ТК-8. Визуальный контроль показал отсутствие очагов коррозии. При отсутствии ретроспективной информации о техническом состоянии рамы транспортёра средняя скорость возможной коррозии принималась в соответствии с «Нормами...» – 0,2 мм/год. Затем был произведен расчёт напряжённо-деформированного состояния рамы транспортёра ТК-8 для наиболее опасных режимов нагружения, приведенных в главе. 3. Расчёт велся с учётом возможного продления срока службы транспортёра на 5 лет, поэтому суммарный коррозионный износ за этот срок был принят равным 1мм.

По результатам расчётов был сделан вывод о том, что прочность транспортёра с расчетным утонением элементов металлоконструкции, удовлетворяет требованиям «Норм...» при всех выбранных режимах нагружения. Следовательно, остаточный ресурс рамы транспортёра ТК-8 по критерию допустимого коррозионного износа составляет не менее 5 лет.

Оценка многоцикловой усталостной прочности производилась, согласно «Нормам...», по коэффициенту запаса сопротивления усталости по зависимости:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,3}} \geq [n], \quad (7)$$

где  $\sigma_{a,N}$  - предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения, при базовом числе циклов  $N=10^7$ ;

$\sigma_{a,z}$  - величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базовому числу циклов  $N_0$ , эквивалентная повреждающему воздействию реальному режиму эксплуатационных напряжений за расчетный срок службы;

$[n]$  – минимально допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости за выбранный срок службы.

Результаты расчета, с учётом коррозионного воздействия, коэффициента снижения предела выносливости  $(\bar{k}_\sigma)_{k\text{ кор}}$ , эквивалентных амплитуд напряжений  $\Sigma\sigma_{a,z}$  и коэффициента запаса сопротивления усталости  $n$  приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета эквивалентных амплитуд напряжений  $\Sigma\sigma_{a,z}$  и коэффициента запаса сопротивления усталости с учётом коррозии

| Зона                              | Вертикальный лист боковой несущей балки (участок переменной высоты) | Продольные промежуточные балки под пятниковой плитой | Шкворневая балка |
|-----------------------------------|---|--|------------------|
| $(\bar{k}_\sigma)_{k\text{ кор}}$ | 3,0   | 4,5  | 4,5              |
| $\Sigma\sigma_{a,z}$ , МПа        | 29,48   | 8,92   | 9,79             |
| $\sigma_{a,N}$ , МПа              | 61,94   | 41,29  | 41,29            |
| $n$                               | 2,10  | 4,63   | 4,22             |

При оценке многоциклового усталостной прочности согласно «Норм...» минимально допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости для случая использования статистически надежных данных по  $\sigma_{a,N}$  при  $p=0,95$  и приближенных по  $\sigma_{a,z}$ , определенных расчетным путем, принимается равным 1,5.

Таким образом установлено, что условие прочности  $n \geq [n]$  выполняется для всех трёх описанных зон рамы транспортера.

Оценка усталостной прочности по критерию малоциклового усталости производилась по коэффициенту запаса сопротивления усталости по зависимости:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_a^*}{\sigma_a^{*0}} = \frac{110}{39,5} = 2,78 \geq [n]$$

где  $\sigma_a^*$  - предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения;

$\sigma_a^{*0}$  - величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базовому числу циклов  $N$ , эквивалентная повреждающему воздействию реальному режиму эксплуатационных напряжений за расчетный срок службы;

Установлено, что условие прочности  $n_{\sigma} \geq [n]$  выполняется для всех зон.

Расчеты по оценке сопротивления малоциклового усталости для цикла погрузки-выгрузки показали, что коэффициенты запаса сопротивления усталости наиболее напряженных зон транспортёра больше минимально допустимого коэффициента запаса сопротивления усталости, равного 2,0. Таким образом было установлено, что прочность транспортёра обеспечена на расчетный срок службы 48 лет (до числа циклов «погрузки-выгрузки»  $N=8000$ ).

Исследование химического состава стали рамы вагона-контейнера ТК-8 проводились методом фотоэлектрического спектрального анализа по ГОСТ 18895-97. Был получен следующий элементный состав металла по массовой доле в %: С (углерод) – 0,15; Si (кремний) – 0,15; Mn (марганец) -

0,49; P (фосфор) - 0,03; S (сера) – 0,028; Cr (хром) – 0,1; Ni (никель) – 0,1; Cu (медь) – 0,1. Анализ результатов испытаний показал, что по содержанию базовых раскислителей (Si и Mn) исследуемая сталь может быть отнесена к стали мартеновской полуспокойной плавки «пс». Малое содержание фосфора в сравнении с ГОСТ 380-60 может указывать как на ЛД – процесс, так и на основной процесс (томазовский конвертер). Поэтому был сделан вывод о том, что исследованная сталь является сталью обыкновенного качества и близкой к марке стали Ст. 3пс.

Результаты исследования прочностных свойств образцов стали, вырезанных из ребра жесткости вагона-транспортера, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов на разрыв

| № обр          | P разр., кН | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_T$ , МПа | $\delta_5$ , % | $\psi$ , % | $\sigma_T/\sigma_b$ |
|----------------|-------------|------------------|------------------|----------------|------------|---------------------|
| 1              | 13,5        | 478,7            | 244,3            | 33             | 66         | 0,565               |
| 2              | 13,1        | 461,1            | 235,4            | 40             | 64         |                     |
| 3              | 13,2        | 462,2            | 237,4            | 40             | 60         |                     |
| 4              | 13,1        | 461              | 235,4            | 43             | 64         |                     |
| среднее        | 13,2        | 461,1            | 235,4            | 39             | 63,5       |                     |
| ГОСТ 380-60 1) |             | 380-470          | 240              | $\geq 25$      | $> 55$     | 0,605               |
| ГОСТ 380-71 1) |             | 380-490          | 250              | $\geq 26$      | -          |                     |
| ГОСТ 535-88 2) |             | 380-490          | 250              | $\geq 26$      | -          |                     |
| ГОСТ 6713-53   |             | 380              | 230              | $\geq 28$      | $> 50$     |                     |

Результаты проведённых металлографических исследований металла рамы транспортера ТК-8 позволили констатировать следующее: исследуемая сталь относится к сталям углеродистым обыкновенного качества класса прочности 380/230 МПа; ближайшей маркой является сталь марки Ст.3. пс; высокое значение ударной вязкости – 206 Дж/см<sup>2</sup> обусловлено высокими значениями  $\sigma_b$  и  $\sigma_T$ ; сталь относится к категории хорошо свариваемых сталей, углеродный эквивалент  $C_{экв} = 0,24 < [C_{экв} = 0,29]$ ;

Одним из дополнительных факторов, оказывающих вредное воздействие на металлоконструкции транспортёра ТК-8, являлось радиационное облучение. Задачей исследования было определение способности материала транспортёра сохранять неизменными свои механические характе-

ристики при воздействии доз радиации, действующих на элементы металлоконструкции вагона-транспортёра.

На транспортёр действовало остаточное гамма-излучение при погрузо-разгрузочных работах. Как показали проведенные в работе металлографические исследования, механические свойства стали существенно не изменились и находятся в диапазоне значений стали марки Ст.3 сп. При этом показатели предела выносливости  $\sigma_b$  и ударной вязкости KCV даже несколько выше нормативных значений.

Таким образом было установлено, что малые дозы радиации, характерные для эксплуатации вагона-транспортёра ТК-8, не оказывают заметного влияния на механические свойства металла рамы транспортёра и протекание коррозионных процессов.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации выполнен комплекс исследований по оценке нагруженности и прогнозированию остаточного ресурса вагонов-транспортёров. По выполненной работе было сделано следующее заключение:

1. На основании проведенного обзора парка вагонов-транспортёров стран СНГ, Латвии, Литвы и Эстонии и анализа их технического состояния выполнена классификация, учитывающая факторы, регламентирующие порядок продления срока службы вагонов и классификация разрушений, возникающих в транспортёрах, установлены их характер, причины и места появления.
2. Создана конечно-элементная модель вагона-транспортёра ТК-8, позволившая на ее основе проводить уточненную оценку напряженно-деформированного состояния металлоконструкции вагона при задании различных кинематических и силовых граничных условий и моделировать воздействие на вагон-транспортёр различных факторов, возникающих в реальных эксплуатационных условиях.



3. Создан обобщенный алгоритм технического диагностирования вагонов-транспортёров существующих типов и разработаны программа и методика диагностирования транспортёров колодецевого типа, используемых для перевозки отработанного ядерного топлива.
4. На основании расчетно-экспертно-статистического метода управления индивидуальным ресурсом вагонов была разработана методика прогнозирования остаточного ресурса вагонов транспортёров, учитывающая коррозионную деградацию, много- и малоцикловую усталость, влияние радиационного облучения и ряда других факторов на металлоконструкции вагона.
5. Проведена расчетная оценка остаточного ресурса вагона-транспортёра ТК-8 и установлено, что расчетный срок службы вагона составляет не менее 48 лет, что даёт возможность продления нормативного срока его эксплуатации на 10 лет.
6. Проведенные металлографические исследования рамы транспортёра ТК-8 выявили отсутствие заметных изменений физико-механических характеристик металла вследствие воздействия эксплуатационных нагрузок и радиации. Металл рамы обладает большим запасом пластических и прочностных свойств ( $\sigma_s = 461,1$  МПа,  $\sigma_T = 235,4$  МПа), при высоком значении ударной вязкости ( $KCV = 206$  Дж/см<sup>2</sup>).
7. Разработан регламент внутрисканционной перевозки отработанного ядерного топлива в вагоне-контейнере на базе транспортёра ТК-8, который определяет ограничение скорости перевозки до 5 км/ч, устанавливает контроль температуры корпуса контейнера при перевозке в зимнее время и запрещает перевозки при температуре корпуса ниже 0°C, что исключает возможность хрупкого повреждения корпуса контейнера при потенциально возможных нарушениях условий нормальной эксплуатации, а также предусматривает проведение периодических освидетельствований транспортёра.

8. Положительные результаты выполненных исследований и их апробация при проведении работ по оценке остаточного ресурса вагона-транспортёра ТК-8 подтверждены 5-летней эксплуатацией этого транспортёра за пределами нормативного срока службы.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Васильев А.В. Исследование прочности вагона-транспортёра ТК-8 с учётом коррозионных повреждений // Тез. докл. IV Научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века (идеи, требования, проекты)». – СПб.: ПГУПС, 2005. стр. 43.
2. Васильев А.В. Исследование технического состояния и моделирование конструкции транспортёра ТК-8 // Вопросы надёжности подвижного состава: Материалы семинара аспирантов механического факультета СПб., ПГУПС. 2003.
3. Васильев А.В. Регулирование срока службы вагонов транспортёров с помощью расчётно-экспертно-статистического метода управления индивидуальным ресурсом // Шаг в будущее (Неделя науки – 2004): Межвуз. сб. научн. трудов/ Под ред. В.В. Сапожникова, А.В. Смирнова. – СПб.: ПГУПС, 2004. стр. 11.
4. Третьяков А.В., Белгородцев А.В., Васильев А.В., Кравченко Ю.П., Пигарев Р.М. Диагностирование технического состояния и расчёт транспортёров // Тезисы докладов II Научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века (идеи, требования, проекты)». – СПб.: ПГУПС, 2001. стр. 123.
5. Третьяков А.В., Васильев А.В. Рациональное использование грузовых вагонов // Железнодорожный транспорт 2004. - № 5. – с. 66-67.
6. Третьяков А.В., Васильев А.В. Управление темпом расходования индивидуального ресурса вагона – транспортёра.– Днепропетровск: ДИИТ, 2004. с.21-23.

2  
4  
6

8

10

№ 2 4 9 4 1

РНБ Русский фонд

2006-4

26125