



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 629.4:539.4(045)
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-10>

Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 106–114

Нормативная база обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожной техники по ресурсу несущих конструкций



Валерий КОССОВ



Дмитрий КНЯЗЕВ



Николай КРАСЮКОВ



Николай МАХУТОВ



Михаил ГАДЕНИН

*Валерий Семёнович Коссов*¹, *Дмитрий Александрович Князев*²,
*Николай Фёдорович Красюков*³, *Николай Андреевич Махутов*⁴, *Михаил Матвеевич Гаденин*⁵

^{1, 2, 3}АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия.

^{4, 5}Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия.

✉ ² knyazev-da@vnikti.com.

АННОТАЦИЯ

Перевод эксплуатации железнодорожной техники на договоры жизненного цикла и подтверждение соответствия её безопасности отраслевым техническим регламентам в условиях отсутствия законодательной базы по отзыву недоброкачественной продукции влекут за собой необходимость более тщательного анализа ресурсных показателей конструктивных составляющих подвижного состава и верхнего строения пути. Под таким углом зрения рассмотрены состояние имеющейся нормативной базы подтверждения критериев прочности и ресурса несущих элементов подвижного состава и пути, влияние регуляторной «гильотины» и общий переход от системы советских ГОСТов и норм прочности к современным подходам к сертификации и разделению таких понятий, как «стандарт» и «поддерживающий стандарт».

На примерах проводимых ранее работ по обеспечению безопасности эксплуатации рамы тележки ЭР200 и работ по переходу на отечественные кассетные подшипники в рамках импортозамещения, проводимых в настоящее

время для разных типов подвижного состава, показаны тенденции отхода от классических методов стендовых испытаний, внедрение ресурсного подхода с оценкой дефектности.

Основываясь на этих новых методах и подходах, возможно рассматривать более длительные периоды эксплуатации, обоснованно давать оценку продлению срока службы или назначать ресурсовосстанавливающую технологию, обеспечивая дальнейшую безопасную эксплуатацию. В рамках этих новых тенденций осуществляется переход к современным методам моделирования оценки безопасности продукции, внедряются такие понятия, как «виртуальный датчик» и «виртуальная система «поезд – путь»». Показано, что разумное сочетание натуральных эксплуатационных испытаний и виртуального цифрового моделирования позволяют в сжатые сроки дать достоверные оценки показателей ресурса и безопасности на стадиях проектирования и эксплуатации.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, прочность, нагруженность, ресурс, подвижной состав, натурные стендовые и эксплуатационные испытания, виртуальные цифровые модели и испытания, подтверждение безопасности.

Для цитирования: Коссов В. С., Князев Д. А., Красюков Н. Ф., Махутов Н. А., Гаденин М. М. Нормативная база обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожной техники по ресурсу несущих конструкций // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 106–114. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-10>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Перевод в Российской Федерации эксплуатации железнодорожной техники на договоры жизненного цикла и необходимость подтверждения соответствия её безопасности отраслевым техническим регламентам в условиях отсутствия законодательной базы по отзыву недоброкачественной продукции влекут за собой необходимость более тщательного анализа ресурсных показателей конструктивных составляющих подвижного состава и верхнего строения пути.

Разработка методологии комплексного расчётно-экспериментального обоснования надёжности ведётся в рамках соглашения между ОАО «РЖД» и РАН.

Важное значение имеют прикладные задачи на примере подвижного состава, которые решены учёными АО «ВНИКТИ», АО «ВНИИЖТ» совместно с ИМАШ РАН.

Ввиду отсутствия в Российской Федерации закона об отзыве недоброкачественной продукции уже на стадиях заключения договоров жизненного цикла возникает необходимость ресурсного анализа и в дальнейшем внесения полученных в ходе него оценок в договоры и процесс управления ресурсом эксплуатации объектов подвижного состава и железнодорожного транспорта на основе таких договоров. Все это связано с законом о техническом регулировании¹, из которого органически вытекают технические регламенты, ставящие конкретные задачи по безопасности. Появляется понятие «риск»,

¹ Федеральный закон «О техническом регулировании» № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 г. – 129 с. [Электронный ресурс]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/?ysclid=lnbusufwwa679963992. Доступ 24.05.2023.

оцениваемое через ресурс. В законе о стандартизации², к сожалению, перестали присутствовать нормы прочности³.

В связи с этим ОАО «РЖД» была инициирована исследовательская работа, где АО «ВНИКТИ» на основе обобщения отраслевого опыта применения нормы прочности создаёт базу для появления нового документа – информационно-технического справочника, что предусмотрено законом о стандартизации (рис. 1)³.

Целью работы является обобщение результатов разработки методологии комплексного расчётно-экспериментального обоснования надёжности и формирования нормативно-правовой базы безопасной эксплуатации железнодорожной техники по ресурсу несущих конструкций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ресурс и безопасность должны подтверждаться на основе расчётов и испытаний с использованием апробированных методов (рис. 2). При этом необходимо уметь качественно, с оценкой вероятности, рассчитывать ресурс на стадии проектирования. Это должно закладываться при производстве, во всей технологической базе и в инструментари, поддерживаться на стадии эксплуатации всеми методами диагностики и обслуживания.

² Федеральный закон «О стандартизации в Российской Федерации» № 162-ФЗ от 29 июня 2015 г. – 74 с. [Электронный ресурс]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_181810/?ysclid=lnbuuhjtmn504679735. Доступ 24.05.2023.

³ Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – М.: МПС, 1998. – 145 с.

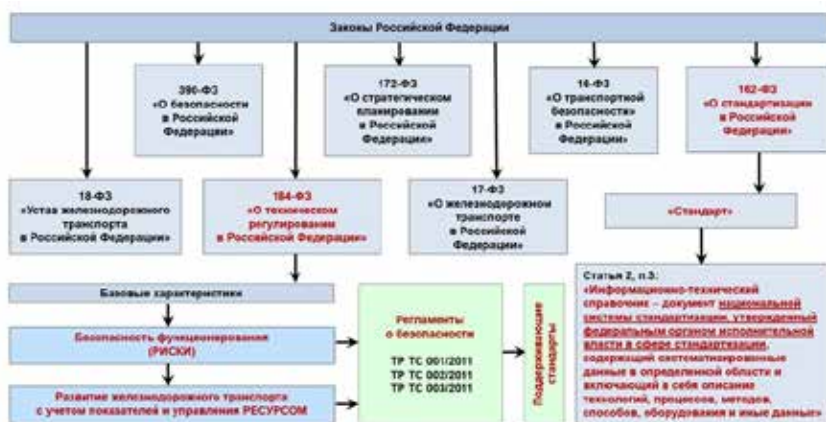


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязи законодательных и нормативных актов по безопасности на транспорте [здесь и далее схемы и диаграммы подготовлены с участием авторов].



Анализ состояния государственных стандартов, поддерживающих технические регламенты объектов технического регулирования (ОТР) железнодорожного транспорта, по наличию показателей надёжности и методов оценки ресурса объектов ОТР

Технический регламент таможенного союза	Поддерживающие стандарты		ОТР (количество)		
	Технические требования	Методы контроля			
ТР ТС 001/2011	173	167	Подвижной состав (17)	Составные части ПС (44)	–
ТР ТС 002/2011	98	116	Составные части инфраструктуры (20)	Элементы составных частей инфраструктуры (54)	Составные части высокоскоростного подвижного состава (67)
ТР ТС 003/2011	76	84	Составные части инфраструктуры (30)	Элементы составных частей инфраструктуры (64)	
Итого	347	367	67	162	67
	714		296		

В табл. 1 в рамках существующих подходов к сертификации и проведению приемочных испытаний выделены понятия «стандарт» и «поддерживающий стандарт». Поддерживающий стандарт несёт в себе сертификационные требования. Он реализуется через 710-е решение Межгосударственной комиссии Таможенного союза⁴. Всего создано около 900 стандартов, при этом по надёжности их всего 24, по прочности и ресурсу – 18, а по методикам их почти нет. Нормативная «гильотина» отсекала нормы прочности и многие ГОСТы, которые были в СССР. Отсюда необходимость возвращаться к этому, на что и нацелена совместная работа АО «ВНИКТИ» с ИМАШ РАН.

Основные стандарты по испытаниям, прочности и ресурсу железнодорожного транспорта:

1. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

2. ГОСТ Р 53076-2008. Рельсовый транспорт. Требования к прочности кузовов железнодорожного подвижного состава.

⁴ Решение Комиссии Таможенного союза «О принятии технических регламентов Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава», «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» и «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» № 710 от 15 июля 2011 г. 82 с. [Электронный ресурс]: <https://www.alta.ru/tamdoc/11sr0710/?ysclid=lncutwnj2j999365223>. Доступ 24.05.2023

3. ГОСТ 31373-2008. Колесные пары локомотивов и моторвагонного подвижного состава. Расчёты и испытания на прочность.

4. ГОСТ 31846-2012. Специальный подвижной состав. Требования к прочности несущих конструкций и динамическим качествам.

5. ГОСТ Р 55495-2013. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам.

6. ГОСТ Р 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам.

7. ГОСТ Р 55514-2013 Локомотивы. Методика динамико-прочностных испытаний.

8. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам.

9. ГОСТ 33788-2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Метод испытаний на прочность и динамические качества.

10. ГОСТ 33272-2015. Безопасность машин и оборудования. Порядок установления и продления назначенных ресурсов, срока службы и срока хранения. Основные положения.

11. ГОСТ Р 57445-2017. Железнодорожные технические средства. Общие требования к методам определения ресурса.

12. ГОСТ Р 15700.10-2018. Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области.



Рис. 2. Исходные положения ТР ТС 001/2011.

Примечание: Технический регламент Таможенного союза 001/2011 «О безопасности на железнодорожном транспорте» (ТР ТС 001/2011). Принят решением ЕЭК № 710 от 15 июля 2011 г., 59 с. [Электронный ресурс]: [Любой из этих стандартов, если его сравнивать с ранее действовавшими нормами прочности³, намного короче. Нормы прочности – это документ объемом около 200 с. вместо 30–50 с., которые имеют стандарты. В них приводятся только основные критериальные соотношения, но вся методическая база отсутствует. Раньше структура промышленности была однородна, управлялась Совмином СССР, а сейчас, в связи с появлением конкуренции компаний, вопрос правил расчёта, сопоставления расчётов становится все более актуальным. Нужно, чтобы и работник завода-изготовителя, и ученый, и работник эксплуатации ОАО «РЖД» примерно по одним правилам рассматривали вопросы ресурса и его обеспечения.](https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/technicalregulationses?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_r00ABXdSAAZhY3Rpb24AAAABABJjaGFuZ2ZVta2luVmIzdzWFsbHkABXRoZWV1IAAAAAQAcG93LWJsYWVNrLXNob3ctcHRzYW5zLWxzZWVmWybWwAHX19FT0ZlXw**&portal:componentId=abfaa8e6-70cc-47aa-8946-0fd2b2df47b3. Досмун 24.05.2023.</p>
</div>
<div data-bbox=)

Так, в настоящее время закончены испытания пяти объектов буксовых подшипников кассетного типа, в том числе трех китайских производителей и двух отечественных производителей. Получены положительные результаты испытаний на базе, воспроизводящей 400 тыс. км пробега. Сейчас ведутся испытания кассетного подшипника на электровозах 2ЭС6 производства ООО «Уральские локомотивы», также проходят испытания подшипников кассетного типа грузовых вагонов уже практически полностью с российской комплектацией (кольца внутренние, наружные, крепёж, смазка). В 2023 году предстоят испытания кассетных подшипников для грузовых вагонов с нагрузкой 25 тс уже в полной российской комплектации, предстоят испытания подшипников для высокоскоростного отечественного подвижного состава на базе 600 тыс. км пробега, будут проводиться испытания подшипников скоростного электровоза ЭП20.

На основе выявленных тенденций будут выработаны методики, позволяющие анали-

зировать ресурс на всех стадиях жизненного цикла⁵.

На рис. 3 представлена история [1] развития науки о прочности конструкций машин, начиная с сопротивления материалов, развития моделей, теории упругости, до вопросов живучести, безопасности, рисков и оценки этих параметров.

В табл. 2 представлена оценка прочности и ресурса по допускаемым напряжениям, коэффициентам запаса. На стадиях проектирования, предварительной проработки конструкций, принятия габаритных решений, инженерного видения проекта такая оценка необходима [2].

Затем следует оценивать ресурс. Для этого необходимо построить кривую усталости с определением предела выносливости и оценкой повреждаемости [2] (рис. 4). Расчёт ресурса предполагает накопление повреждаемости по мере наработки детали и достижения разрушающего числа циклов. Далее можно перейти к оценке ресурса в годах эксплуатации. Но это только на этапе развития ресурсного подхода.

Развитие подхода заключается в том, что нужно оценивать и дефектность. Крупного вагонного литья без дефектов не бывает. На рис. 5 показан пример модели механики разрушения с развитием трещиноподобного дефекта, даны соответствующие оценки. Здесь представлены элементы моделирования дефектов, исследования нагруженности, учёт наработок в области механики деформированного тела, механики разрушения с оценкой числа циклов, пробега и перевода в годы эксплуатации (табл. 3).

⁵ ГОСТ 57445-2017. Железнодорожные технические средства. Общие требования к методам определения ресурса. – М.: Стандартинформ, 2017. – 26 с. [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746291.pdf?ysclid=lnv2au9ff644715443>. Доступ 24.05.2023.



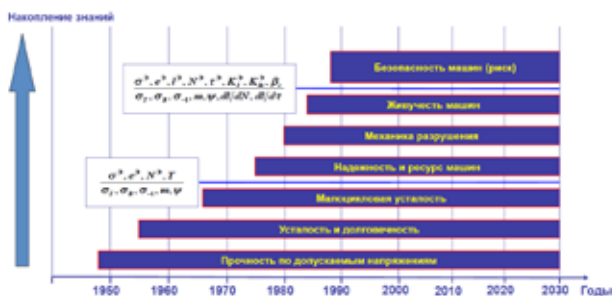


Рис. 3. Современное состояние и этапы развития научных дисциплин прочности, ресурса и безопасности.

Таблица 2

Условия прочности по действующим нормам

Тип подвижного состава	Оценка статической прочности по допускаемым напряжениям		Оценка сопротивления усталости по допускаемому коэффициенту запаса n
	I режим	III режим	
Локомотивы	$\sigma_s \leq [\sigma] = 0,90 \cdot \sigma_T$	$\sigma_s \leq [\sigma] = 0,55 \cdot \sigma_T$	$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \cdot \sigma_a + \psi \cdot \sigma_m} \geq 2$
Вагоны		$\sigma_s \leq [\sigma] = 0,60 \cdot \sigma_T$	$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \cdot \sigma_{a3}} \geq 1,4...1,8$

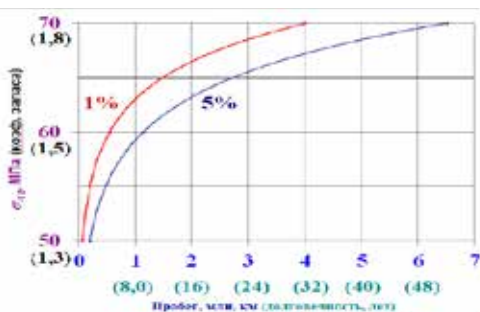


Рис. 4. Оценка ресурса боковой рамы грузового вагона на этапе проектирования: 1%, 5% – повреждаемости.

На рис. 6 показан комплекс работ, проведённых по раме тележки ЭР200 в период, когда остро стоял вопрос обеспечения безопасности эксплуатации электропоезда в течение 2–3 лет до введения в эксплуатацию поездов «Сапсан». Эта работа была успешно проведена АО «ВНИКТИ» совместно с АО «ВНИИЖТ» и ИМАШ РАН. Была сформирована гистограмма эксплуатационной нагруженности, проведён расчёт, выявлены наиболее нагруженные зоны, установлены концентраторы, определены уровни остаточных напряжений. Для изложенных условий была выполнена оценка числа поездок электропоезда ЭР200 в зависимости от величины остаточных напряжений (табл. 4). В последующем проводился постоянный осмотр этих рам тележек, их мониторинг, своевременное восстановление (ремонт) или изъятие.

Переходя на ресурсный подход, исследователи уже начинают отходить от классических подходов сопротивления материалов и кривых усталости с горизонтальной правой ветвью из-за того, что даже при наработках, сопоставимых с 40 годами эксплуатации и выше, подходы, основанные на неограниченной выносливости детали, не работают (рис. 7). Тогда правая ветвь графика усталости имеет наклон, входит в зону гигацикловой усталости. Для примера оценки были взяты поездки поезда «Сапсан», эксплуатируемые на маршруте Москва – Санкт-Петербург. Для этого поезда срок службы ТУ установлен в 15 млн км пробега или 30 лет эксплуатации. Полный цикл нагружения за указанный срок службы – это число оборотов колес (5x10⁹). Такой объём наработки, даже в стендовых условиях – это годы испытаний при имеющихся технических возможностях. За 65 лет в АО «ВНИКТИ» провели испытание всего порядка пяти образцов осей на базе 10⁸, которые позволили дать оценку углу наклона правой ветви кривой усталости [3]. И теперь, основываясь на этих разработках, можно говорить о длительных периодах эксплуатации и обоснованно давать оценку продлению срока службы или назначать ресурсовосстанавливающую технологию и обеспечивать дальнейшую безопасную эксплуатацию.

АО «ВНИКТИ» совместно с ИМАШ РАН разработан вышеуказанный проблемно-ориентированный ГОСТ⁵, который задаёт

Зависимость ресурса от различных дефектов в литых элементах

Перечень исследуемых факторов	Ресурс		
	Число циклов	Пробег	Лет (при 120 тыс. км/год)
Пониженная пластичность литой стали 20ГЛ: – относительное удлинение 7...16 % вместо 18 %; – относительное сужение 8...19 % вместо 25 %	2,70x10 ⁹	3118	26
Отсутствие термообработки при заварке литейных дефектов в радиусе R55	279x10 ⁶	322	2,7
Наличие внутренних дефектов литья (газовая пора, трещина) в зоне R55	13,8x10 ⁶	153	1,3

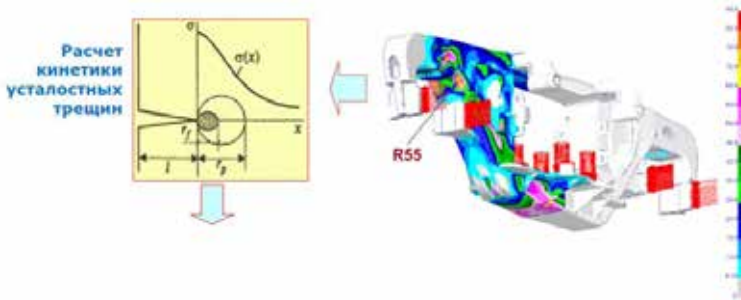


Рис. 5. Исследование ресурса литой боковой рамы тележки грузового вагона.

Величины максимальных остаточных напряжений

Зона кронштейна тягового двигателя			Зона буксового кронштейна		
Остаточные напряжения, МПа	Ресурс		Остаточные напряжения, МПа	Ресурс	
	Число поездок	Лет		Число поездок	Лет
240	320	3,1	240	308	3,0
200	460	4,4	200	420	4,0
150	852	8,0	150	544	5,0

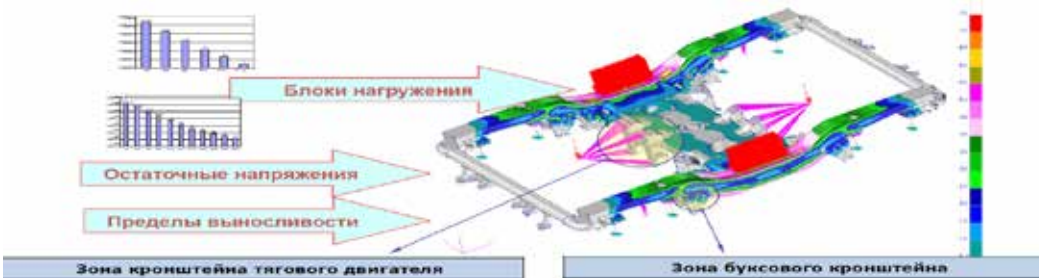


Рис. 6. Оценка остаточного ресурса рам тележек ЭР200 для участка движения Санкт-Петербург – Москва.

основные направления работ и определяет требования к расчёту ресурса. В нем указано, прежде всего, важен вопрос об определении несущих и силовых систем (рис. 8). Ресурс обусловлен всеми особенностями эксплуатации, то есть необходимо решение технико-экономической задачи: одни объекты должны обеспечить абсолютный ресурс и могут безопасно эксплуатироваться, а другие должны быть своевременно изъяты, отремонтированы или утилизированы. Но в любом случае объект должен работать надёжно между плановыми ремонтами.

Во всех сложных расчётных программах есть понятие «виртуальный датчик». Помещая его в любую интересующую зону, а это, прежде всего, зона концентраций напряжений, наиболее нагруженная зона, на стадии виртуального моделирования получаем виртуальную нагруженность. Эту нагруженность можно перевести в блоки напряжений, и, сопоставляя их с кривыми усталости материалов или объектов, деталей, оценивать ресурс с необходимой точностью. Достаточная точность с необходимой вероятностью неразрушения обеспечивается сопоставлением численных виртуальных экс-



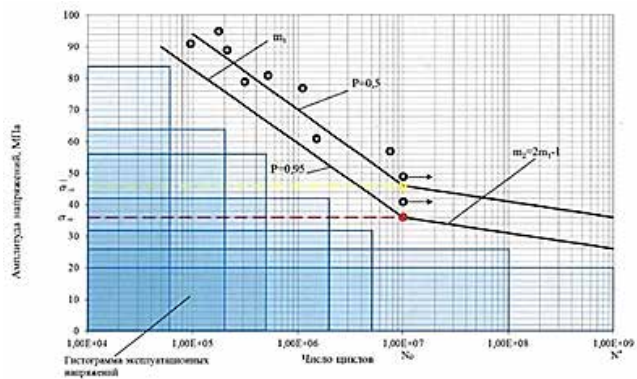


Рис. 7. Пример расчета ресурса боковины рамы тележки: m_1 и m_2 – показатели угла наклона кривой усталости; P – вероятность разрушения; N_0 , N^* – базы испытаний; σ – пределы выносливости детали.

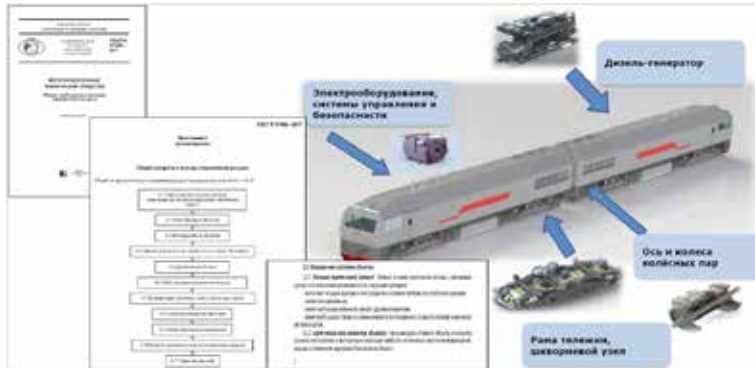


Рис. 8. Базовые элементы, определяющие ресурс и безопасность эксплуатации локомотива.

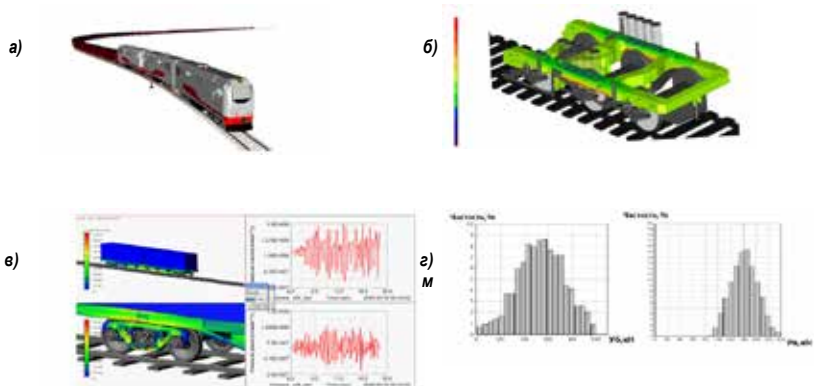


Рис. 9. Схематичный пример реализации подхода с использованием цифровых моделей для определения эксплуатационной нагруженности: а – твердотельная модель движущегося поезда; б – упругая КЭ-модель тележки локомотива; в – упругая КЭ-модель грузового вагона; г – распределение боковых (Y) и вертикальных (P) сил от колес на рельсы.

периментов с накопленными опытными данными по результатам проведённых стендовых и поездных испытаний.

При моделировании наряду с твердотельными составными частями подвижного состава создаются конечно-элементные упругие модели исследуемых конструкций (кузовов, рам, деталей, тягового привода и др.), достаточно полно отражающие силовой поток несущей системы или передачу силы тяги.

На рис. 9 показан общий вид сформированных для расчётов блоков нагрузок и их развертки [4], полученных в модельных и натурных экспериментах. Взаимодействие «поезд – путь» в сочетании с воздействием реально замеренных на участке эксплуатации, например Восточном полигоне, неровностей, отклонений, рихтовок пути, повреждений колес позволяет получить реальную нагруженность и достичь необходимой вероятности оценки ресурсных показателей.

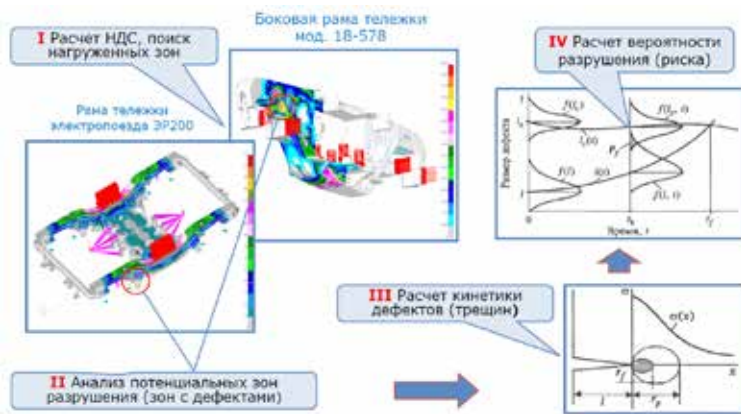


Рис. 10. Обобщенная схема риск-анализа несущих элементов подвижного состава.

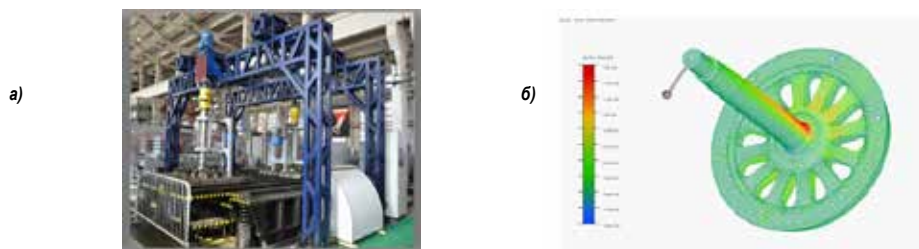


Рис. 11. Стенд для испытаний осей и колес на усталость циклически изменяющимся круговым изгибом: а) общий вид натурального стенда; б) виртуальный аналог стенда для испытаний «колесо – ось».

Таблица 5

Сравнение нормативных документов по базе испытаний

Требования стандартов в Европе		Требования стандартов в России	
База испытаний	Нормативные документы	База испытаний	Нормативные документы
Подтверждение предела выносливости осей на базе 10^7	DIN EN 13260	Подтверждение предела выносливости осей на базе 10^7	ГОСТ 33783 ГОСТ 11018 ГОСТ 4835
Подтверждение предела выносливости колес на базе 10^7	DIN EN 13262	Подтверждение предела выносливости колес на базе 10^7	

На рис. 10 рассматриваются два объекта: боковина тележки грузового вагона и рама тележки электропоезда ЭР200. Этот подход сейчас активно реализуется в АО «ВНИКТИ» с использованием приведённых выше моделей с интегрированием их в цифровую технологию.

В 2023 году и далее АО «ВНИКТИ» полагает целесообразным сосредоточиться на выявлении глубинной взаимосвязи конечно-элементного (КЭ), реально механистического подхода и статистических моделей, включая нейронные сети. Сами по себе механические модели являются источником базы больших данных, но их нужно сопоставлять и корректировать в соответствии с данными эксплуатации [5].

На рис. 11 показан пример испытания осей и колёс как возможность разрабатывать виртуальные стенды и испытания [6, С. 61–65].

В табл. 5 приведены оценки количества циклов до разрушения, сопоставление полученных результатов с нормативной базой.

ВЫВОДЫ

Основываясь на изложенном, можно сделать вывод о том, что виртуальные испытания железнодорожной техники путём численного моделирования (разработки и исследования адекватных цифровых моделей) имеют важное значение для безопасности движения, позволяя достигать целей [7, С. 69–72; 8, С. 27–29]:

- оценки ходовых и динамических качеств, прочности, ресурса и безопасности подвижного состава (ПС);
- исследования характеристик и работоспособности пути;
- исследования взаимодействия ПС, пути, их нагруженности.





Кроме того, виртуальные испытания помогают решить задачи:

- исследования НДС конструкций крупногабаритных и сложнагруженных объектов;
- исследования концентрации напряжений (в том числе с использованием виртуальных датчиков) в элементах конструкций, сварных и литых деталей;
- моделирования экстремальных и аварийных условий и видов нагружения объекта;
- моделирования совместных и отдельных компонентов и видов воздействий сложнонагруженных объектов (механических, тепловых и др.).

Методы использования программных средств:

- выбор и обоснование моделей в зависимости от постановки задачи (статика, кинематика, динамика) и области решения;
- создание конечно-элементных 3D-моделей исследуемых объектов;
- доводка КЭ-моделей с учетом конструктивных особенностей объекта (стержни, пластины, оболочки и пр.);
- выбор и обоснование КЭ-сетки;
- подтверждение соответствия модели поставленной задаче и исследование границ применимости решения;
- верификация и валидация модели и результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1 Оганьян Э. С., Волохов Г. М. Расчёты и испытания на прочность несущих конструкций локомотивов. – М.: УМЦ по образованию на ж. д. транспорте, 2013. – 326 с. ISBN: 978-5-89035-618-5.

2 Махутов Н. А., Гапанович В. А., Коссов В. С., Оганьян Э. С., Красюков Н. Ф., Волохов Г. М. Методы определения ресурса и циклической прочности конструкций экипажной части локомотивов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2016. – № 10. – С. 3–12. [Элект-

ронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27180774&ysclid=lnbggnup2j283492649>. Доступ 17.04.2023.

3. Волохов Г. М., Огуенко В. В., Тимаков М. В. Линейная аппроксимация кривой усталости натуральных осей колёсных пар подвижного состава в гигацикловом диапазоне // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты // Тезисы докладов VIII Междунар. научно-техн. конференции (Санкт-Петербург, 3–7 июля 2013 г.). – СПб.: ПГУПС, 2013. – С. 38–41. [Электронный ресурс]: <https://drive.google.com/file/d/13Q9KхаPJpqqYS90tkclunpyeSGEh4uQ1/view> [полный текст материалов конференции]. Доступ 17.04.2023.

4. Волохов Г. М., Князев Д. А., Тимаков М. В. Использование генерированного блока нагрузок колёсной пары высокоскоростного подвижного состава при расчёте живучести оси // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты. Материалы XII Междунар. научно-практической конф. (Санкт-Петербург, 5–9 июля 2017 г.). – СПб.: ПГУПС, 2017. – 190 с. – С. 128–130. ISBN 978-5-7641-0908-4. [Электронный ресурс]: <https://drive.google.com/file/d/1xL6Jl2sKUTOLcL0G04YKxY6kLR3bHD4E/view> [полный текст материалов конференции]. Доступ 17.04.2023.

5. Оганьян Э. С., Волохов Г. М., Гасюк А. С., Фазлиахметов Д. М., Муравлёв Е. В. Безопасная эксплуатация локомотивов по ресурсу их базовых частей // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 6. – С. 54–57. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58.

6. Волохов Г. М., Князев Д. А., Тимаков М. В. Моделирование роста трещины на полой оси моторной колёсной пары высокоскоростного подвижного состава // Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век. Сб. материалов V Междунар. научно-техн. конф., посвящённой 180-летию железных дорог России (Санкт-Петербург, 14–16 ноября 2017 г.). – СПб.: ПГУПС, 2017. – 455 с. – С. 61–65. ISBN: 978-5-7641-1098-1.

7. Оганьян Э. С., Волохов Г. М., Гаджиметов Г. И. К вопросу о порядке обновления парка и продления сроков службы эксплуатирующихся локомотивов в свете требований ТР ТС 001/2011 // Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век. Сб. материалов V Междунар. научно-технической конф., посвящённой 180-летию железных дорог России (Санкт-Петербург, 14–16 ноября 2017 г.). – СПб.: ПГУПС, 2017. – 455 с. – С. 69–72. ISBN: 978-5-7641-1098-1.

8. Волохов Г. М., Овечников М. Н., Князев Д. А., Тимаков М. В. Моделирование роста трещины в осях железнодорожного подвижного состава // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ. IV научно-технический семинар (Брянск, 3–4 апреля 2018 г.). – Брянск: Изд-во БГТУ, 2018. – 78 с. – С. 27–29. ISBN: 978-5-906967-87-9. ●

Информация об авторах:

Коссов Валерий Семенович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия, vskossov@icloud.com.

Князев Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, заместитель заведующего отделом АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия, knyazev-da@vnikti.com.

Красюков Николай Федорович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия, timaakov-mv@vnikti.com.

Махутов Николай Андреевич – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), Москва, Россия, kei51@mail.ru.

Гаденин Михаил Матвеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), Москва, Россия, safety@imash.ru.

Статья поступила в редакцию 06.03.2023, одобрена после рецензирования 25.05.2023, принята к публикации 19.06.2023.