



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.4:539.4(045)

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-9>

Развитие риск-ориентированных подходов к определению повреждаемости и ресурса объектов железнодорожного транспорта



Николай МАХУТОВ



Михаил ГАДЕНИН



Валерий КОССОВ



Дмитрий КНЯЗЕВ



Николай КРАСЮКОВ

Николай Андреевич Махутов¹, Михаил Матвеевич Гаденин², Валерий Семёнович Коссов³, Дмитрий Александрович Князев⁴, Николай Фёдорович Красюков⁵

^{1, 2} Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия.

^{3, 4, 5} АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия.

✉ ⁴ knyazev-da@vnikti.com.

АННОТАЦИЯ

Современные проблемы железнодорожного транспорта в нашей стране, такие как общее техническое состояние объектов, и связанные с этим вопросы безопасности их эксплуатации, импортозамещения оборудования и комплектующих, реализация программ инновационного развития порождают необходимость создания новой техники и технологий, построения схем перспективного развития транспорта на базе новых требований безопасности и стратегического планирования. Существующий уровень разработок не позволяет полностью исключить повреждения, отказы и аварии объектов железнодорожного транспорта, поставленных на производство в соответствии с действующей нормативной базой. Решение этих проблем возможно путем установления фактического состояния объекта с накопленными в эксплуатации циклическими, коррозионными, износными и другими повреждениями, определяющими наступление предельных состояний базовых элементов объекта

с учетом технологий восстановления ресурса на различных стадиях жизненного цикла в штатных (проектных) и аварийных условиях эксплуатации.

В статье затронуты проблемы, связанные с обеспечением безопасности функционирования железнодорожного транспорта, с целью обоснования на основе действующих нормативно-технических документов новых подходов к анализу повреждаемости, уязвимости объектов и оценке рисков аварий и катастроф. Развитие взаимодействия через систему новых постановок задач и нормативно-технических документов, а также более активное вовлечение, использование и развитие фундаментальных законов физики, химии, механики применительно к реально существующим процессам в окружающей среде позволяют реализовывать в технических объектах новые концепции, стратегии и разработки перспективных исследований с применением цифровых и интеллектуальных технологий.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, подвижной состав, локомотивный парк, безопасность, ресурс, надёжность, накопление повреждений, диагностика, опасные состояния, риски, аварии, катастрофы.

Для цитирования: Махутов Н. А., Гаденин М. М., Коссов В. С., Князев Д. А., Красюков Н. Ф. Развитие риск-ориентированных подходов к определению повреждаемости и ресурса объектов железнодорожного транспорта // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 4 (107). С. 80–87. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-9>.

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

Внедрение новой техники и технологий, современные темпы совершенствования железнодорожного транспорта делают актуальным построение схем его перспективного развития на базе новых требований безопасности и стратегического планирования.

Это касается всех взаимосвязанных аспектов его функционирования. Например, в части локомотивного парка железных дорог, помимо собственно подвижного состава, возникает необходимость определённого категорирования состояния объектов железнодорожного транспорта, его обеспечивающего (железнодорожные мосты, тоннели и другие искусственные сооружения), их количества и стадий эксплуатации. В этом категорировании важно выделить группу объектов длительной эксплуатации с накопленными в их конструкционных элементах повреждениями.

Важнейшей является инновационная составляющая, ориентация на использование новых решений, новой техники, новых технологий, что требует и новых подходов к определению их ресурса и надёжности.

Ещё одна задача связана с тем, что есть импортная техника, оборудование, которые используются на объектах железнодорожного транспорта, и требуется обеспечить функционирование импортных объектов на основе отечественных нормативно-технических документов.

Важно учитывать и другие факторы, в том числе глобальное изменение природной среды и климата.

Целью исследования является обоснование новых системных подходов к анализу повреждаемости, уязвимости объектов и оценке рисков аварий и катастроф.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Актуальность решения проблем ресурса и безопасности

Железнодорожный транспорт должен рассматриваться как составная часть общественной, государственной, природной, техногенной систем. Установление определённой последовательности в его развитии (целеполагание, прогнозирование, планирование, программирование) – это составляющая планирования достижения стратегических целей современного государственного развития.

Исходя из этого, следует остановиться на вопросе построения схем перспективного развития транспорта на базе новых требований безопасности и стратегического планирования (на примере ОАО «РЖД», рис. 1 [1–3]). Здесь важно определить наличие знаний, реальных подходов и технологий, больших баз данных, аппаратных систем именно с точки зрения стратегического планирования.

На схеме (рис. 1) С-П-Т – это сочетание социальной, природной, техногенной сфер,

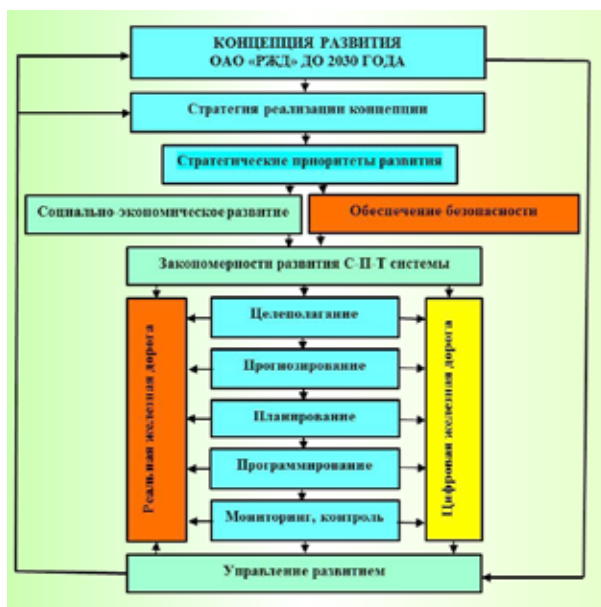


Рис. 1. Структурная схема перспектив развития железнодорожного транспорта, рассматриваемых в совокупности [1–3].



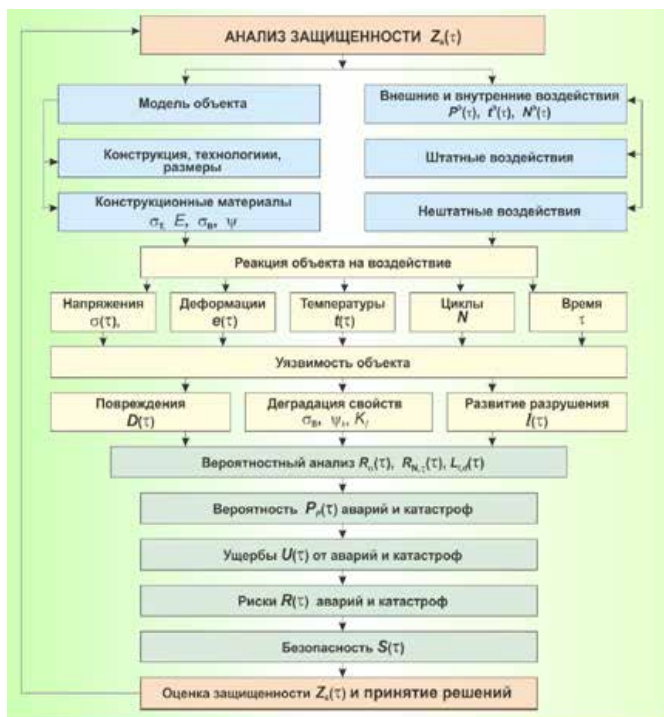


Рис. 2. Принципиальный алгоритм расчётно-экспериментального определения прочности, ресурса, безопасности и защищённости по критериям рисков [4], где σ_s – временное сопротивление материала; ψ – относительное сужение шейки стандартного образца материала; K_f – трещиностойкость; $L(L_{eff}, L_{cr})$ – живучесть на различных этапах времени эксплуатации; $R_d, R_{N,t}$ – и другие буквенные сочетания по данному и последующим рисункам функционально обозначают риски разрушения и истощения ресурса соответственно по механизмам повреждаемости (износ, коррозия и др.), их список не является исчерпывающим и служит для демонстрации принципиальных подходов.

определяемых показателями прочности, ресурса, безопасности, загруженности объектов. С одной стороны, эти показатели желательно повысить. С другой стороны, обязательно надо считаться с тем, что ни отказы, ни аварии, ни катастрофы не являются мгновенно (вдруг) возникающими (рис. 2). Тогда становится ясно, что основным является анализ реальной накапливаемой повреждаемости, деградации самих систем во время их эксплуатации [4]. Эти показатели являются фундаментальными.

Сама проблема повреждаемости выходит на первое место. Сейчас в государственном законодательстве ставится вопрос о том, что одним из важнейших становится этап деятельности, обусловленный новым требованием и предусматривающий обоснование ресурса, безопасности. Под словом «обоснование» понимается, что в ряде случаев невозможно полностью воспользоваться действующей нормативно-технической документацией. В случае отклонений, при возникновении новых обстоятельств и состояний действующая нормативно-техническая документация не позволяет правильно определять

решения. Поэтому данное требование в законодательстве, которое будет распространено в промышленной безопасности на обоснование ресурса и безопасности, станет очень важным.

Методология анализа повреждаемости и оценки риска

Некоторая критериальная основа анализа повреждаемости в штатных и нештатных условиях эксплуатации, повреждаемость, связанная со временем (τ) и числом циклов (N) нагружения, являются определяющими фундаментальными параметрами, на которых может строиться дальнейшее рассмотрение риска повреждаемости (рис. 3). Сюда будут входить и условия нагружения, условия в окружающей среде, деградация конструкций и материалов. Учёт всех этих факторов сводится к тому, что параметрами, определяющими состояние систем, становятся повреждаемость и уязвимость [5]. Переход на эти параметры в отношении и подвижного состава, и инфраструктуры чрезвычайно важен.

Сама повреждаемость как функция времени определяет риски (рис. 4). Непосред-

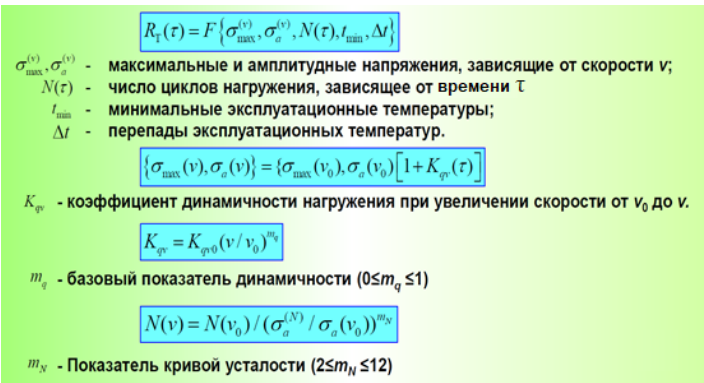


Рис. 3. Связный анализ техногенных и природных рисков при штатной эксплуатации [5].

ственные повреждения, переходящие в отказы, разрушения, аварии, катастрофы, подразумевают, что на каждом из этапов должны применяться свои методы анализа, диагностики, управления, технологии, ремонтно-восстановительных работ. Кривая повреждаемости становится при этом ключевой [6].

Если повреждаемость принимать в качестве основного параметра, то другие характеристики (прочность, ресурс, износостойкость, хладостойкость, надёжность, живучесть, риски, безопасность) оказываются функционалом от этого ключевого параметра (рис. 5) [7].

При принятии такого подхода и для длительно эксплуатируемых объектов, для импортных, сильно повреждённых и новых объектов должна быть выстроена система определяющих аналитических выражений, которые потом будут поддерживаться цифровыми и интеллектуальными технологиями. Необходимая исходная аналитическая база существует. Совместные исследования специалистов АО «ВНИКТИ» и Института проблем механики РАН, разработки АО «ВНИИЖТ», связанные с безопасными системами движения, выявили, что эта кинетическая

структура самих рабочих процессов, трансформируемая в кинетику и уровни, расчётные и аналитические кривые повреждаемости, становится наиболее важной (примеры общих принципов и критериев приведены на рис. 6) [8].

Задача определения ресурса объекта решается расчётно-экспериментальными методами исследования с оценкой физико-механических характеристик материала, напряжённно-деформированного состояния конструктивных элементов объекта, кинетики накопления повреждений в них. При этом определение запасов прочности и долговечности требует вероятностных подходов с построением гистограмм (блоков) распределения текущих значений амплитуд нагрузок (напряжений) при различных режимах работы объекта (например, при изменении скорости движения подвижного состава), вычисления их эквивалентных значений для всего диапазона воздействий с учётом их доли в эксплуатации.

Следовательно, актуальным сегодня является доведение существующих методов определения фактического ресурса объектов железнодорожного транспорта до возможности



Рис. 4. Последовательность анализа опасных состояний объектов и соответствующих им рисков: ОТР – объекты технического регулирования; ПОО – потенциально-опасные объекты; КВО – критически важные объекты; СТВО – стратегически важные объекты [6].



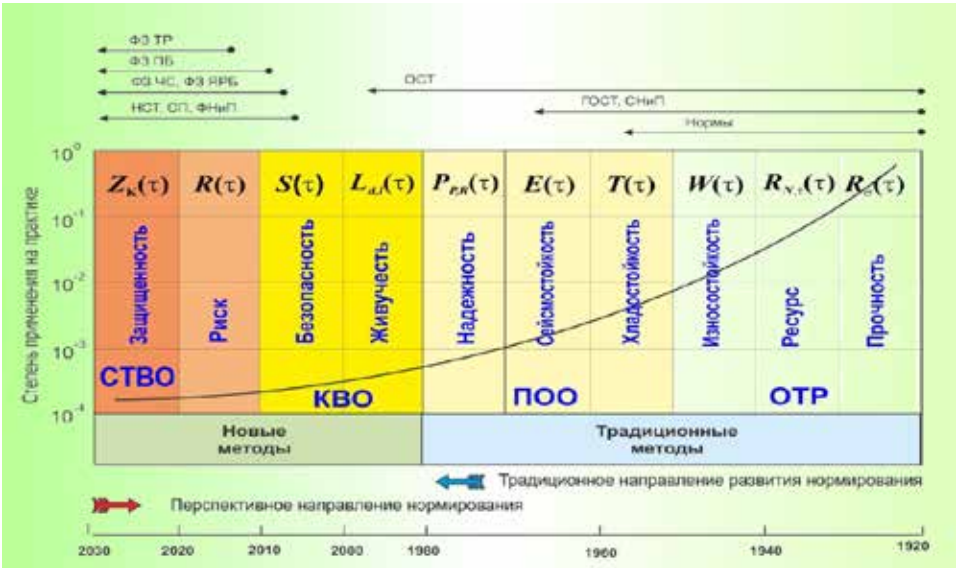


Рис. 5. Комплексные механизмы анализа и управления прочностью, ресурсом и безопасностью [7].

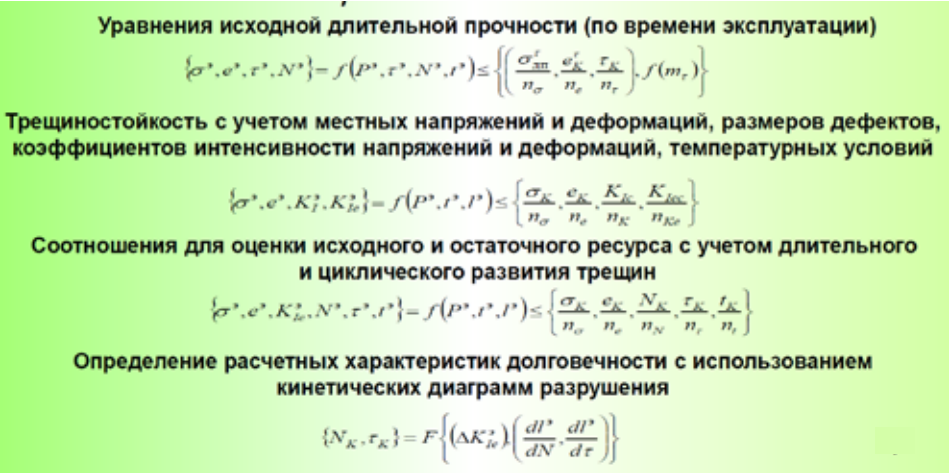


Рис. 6. Примеры применения общих принципов и критериев прочности, ресурса, риска и безопасности [8].

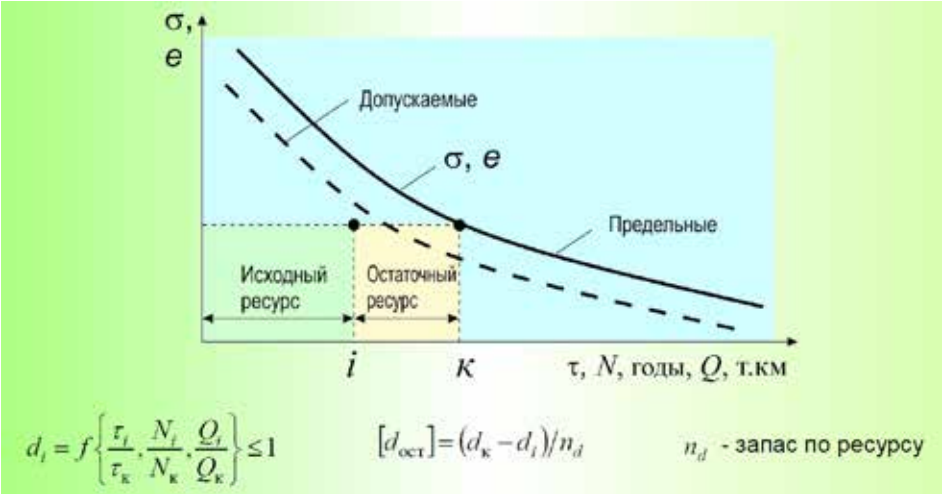


Рис. 7. Обоснование остаточного ресурса [8].

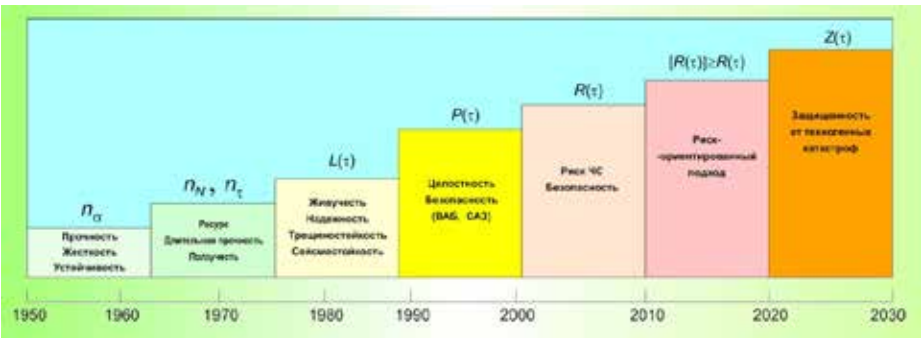


Рис. 8. Последовательность формирования и развития риск-ориентированного подхода к КВО и СТВО [8].

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ												
Методы	Дефекты			Температура			Напряжения			Механ. свойства		
	Размер	Форма	Место	Величина	Цикл.	Время	Величина	Циклы	Время	Прочность	Пластич.	Трещин.
	<i>l</i>	<i>a l</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>τ_ц</i>	<i>τ</i>	<i>σ_в</i>	<i>N</i>	<i>τ</i>	<i>σ_т, σ_в</i>	<i>δ, ψ</i>	<i>K_{IC}</i>
УЗД	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
МПД	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Виз. контроль	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Рентген	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Виброметрия	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Акуст. контр.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Акуст. эмис.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Голография	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Термовидение	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Томография	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Натурн. тенз.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ												
$N_p = f(\sigma_a, t, \tau, l, \Phi)$ - Натурная тензометрия												
$T = f(\sigma_a, N, \tau, l)$ - Термовидение												
$AE = f(\sigma_a, e_p, K_{IC}, l)$ - Акустическая эмиссия												
$G = f(\sigma_a, t, N, \tau)$ - Голография												

Рис. 9. Возможности методов диагностики для анализа параметров состояния объектов (расчётные соотношения приведены в качестве примеров и подлежат отдельному рассмотрению) [9].

их представления в нормативной базе. Это станет научно-техническим инструментом обоснования срока безопасной эксплуатации объекта с требуемой надёжностью.

Тогда решения, которые будут приниматься по любому из действующих объектов, будут сводиться к тому, что существуют такие параметры, как время, число циклов, годы, тонно-километры, исходный и остаточный ресурс, ресурс накопленный и предельный, которые подлежат теоретическому анализу. Поэтому кривая, представленная на рис. 7 (на котором также проиллюстрированы некоторые ключевые расчётные формулы), может быть реализована и использована во всех основных нормативно-технических документах, базирующихся на уровне повреждаемости, ресурсе, безопасности, отказоустойчивости, стойкости против аварий и катастроф [8].

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Опираясь на все заделы, которые есть и в нормативно-технической базе, и, переходя на риск-ориентированные подходы, что требует сейчас законодательство, следует противостоять негативным явлениям и рискам не в процессе эксплуатации, а перемещать эту «борьбу» на стадию проектирования [8]. Эта идеология для новых объектов и будущего развития станет определяющей.

Системы диагностирования должны быть подстроены под то, чтобы реальные технические состояния с учётом повреждаемости были определены большой группой параметров, выходящих за традиционные нормы диагностики и контроля. На рис. 9 показано, какой параметр каким методом можно получать, и приведены некоторые расчётные соотношения [9]. При условии реализации такого подхода такие параметры приобретут решаю-



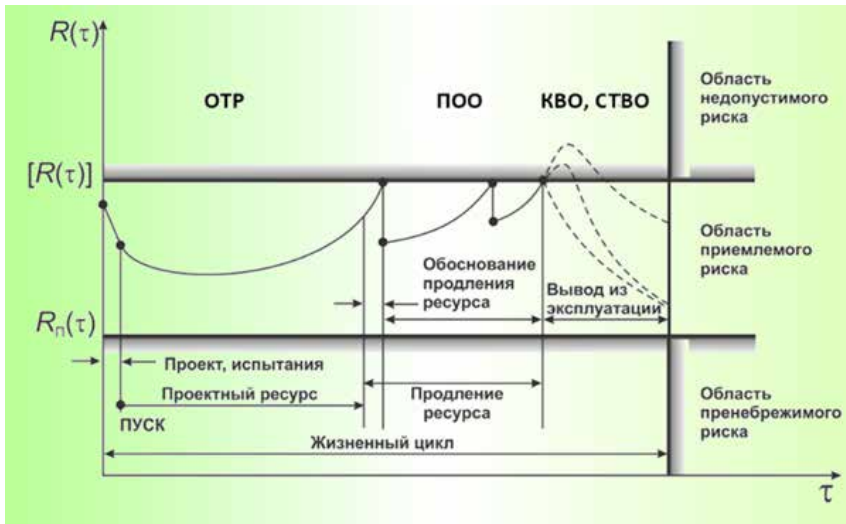


Рис. 10. Управление рисками для различных стадий жизненного цикла объектов [10].



Рис. 11. Концепция перспективных исследований и разработок с применением цифровых и интеллектуальных технологий [11–15].

щее значение. Бортовые счётчики ресурса, которые будут учитывать накапливаемую повреждаемость в элементах, компонентах, узлах, локомотивах, вагонах станут не только фиксирующими текущее состояние и создающими обширную статистику больших данных, но и прогностическими моделями, основанными на физических, механических, химических реально протекающих процессах в машинах, конструкциях и системах управления.

Тогда управление самим состоянием, управление рисками, ресурсами по уровню повреждаемости и рисков становится не предписанным периодически ремонтным освидетельствованием и ведением работ, а научно обоснованным мероприятием (рис. 10) [10].

В контексте комплексного рассмотрения заявленных в исследовании задач целесооб-

разен учёт современных зарубежных научных работ и опыта, анализ которых в силу обширности проблематики не является предметом данной статьи и требует отдельного рассмотрения.

С учётом изложенного и применительно к деятельности железнодорожного транспорта возрастает актуальность научного сопровождения эксплуатационной деятельности. В частности, должно получить новое развитие взаимодействие, которое сложилось между ОАО «РЖД» и РАН (рис. 11). Оно должно быть реализовано через систему новых постановок задач и нормативно-технических документов, а также концепций и стратегий [11–15].

Объединённому учёному совету ОАО «РЖД», научным организациям и специалистам отрасли железнодорожного транс-

порта при этом целесообразно сосредоточиться на том, что фундаментальные законы физики, химии, механики реально существующих процессов в окружающей среде для технических объектов должны быть более активно вовлечены в использование и развитие. Внедрение интеллектуальных и цифровых технологий должно обеспечивать не просто фиксацию каких-то реально складывающихся позиций, но и учитывать реальные закономерности деформирования, повреждения, разрушения и деградации. Это направление становится определяющим.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности железнодорожного транспорта / Под ред. Н. А. Махутова. – М.: МГОФ «Знание», 2020. – 720 с. ISBN 978-5-87633-189-2.
2. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная безопасность подвижного состава железнодорожного транспорта / Под ред. Н. А. Махутова. – М.: МГОФ «Знание», 2020. – 488 с. ISBN 978-5-87633-193-9.
3. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная безопасность инфраструктуры железнодорожного транспорта / Под ред. Н. А. Махутова. – М.: МГОФ «Знание», 2021. – 876 с. ISBN 978-5-87633-198-4.
4. Махутов Н. А., Коссов В. С., Гаденин М. М., Оганьян Э. С. Расчётно-экспериментальная оценка прочности, ресурса и живучести элементов вагонных тележек // Ренессанс железных дорог: фундаментальные научные исследования и прорывные инновации / Под ред. Б. М. Лапидуса. – Ногинск: Аналитика Родис, 2015. – С. 113–125. ISBN 978-5-905277-63-4.
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность железнодорожного транспорта в условиях Сибири и Севера / Под ред. Н. А. Махутова. – М.: МГОФ «Знание», 2014. – 856 с. ISBN 978-5-87633-127-4.
6. Махутов Н. А., Резников Д. О., Оганьян Э. С., Коссов В. С., Волохов Г. М., Овечников М. Н., Протопопов А. Л. Методы определения ресурса нерезервируемых несущих

элементов подвижного состава и пути // Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО «РЖД». – 2017. – № 3. – С. 19–39. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30113989>. Доступ 13.01.2023.

7. Григорьев А. В., Лепов В. В. Надёжность и ресурс технических систем в экстремальных условиях эксплуатации Арктики и Субарктики // Железнодорожный транспорт. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. – 112 с. ISBN 978-5-7692-1623-7.

8. Система методик по расчётно-экспериментальному определению и нормированию ресурса и сроков службы технических средств железнодорожного транспорта. Критически важные объекты железнодорожной техники и инфраструктуры. Номенклатура, категории, предельные состояния. – Коломна: ВНИКТИ – ИМАШ РАН, 2020. – 108 с.

9. Погодин-Алексеев Г. И. Динамическая прочность и хрупкость металлов. – М.: Машиностроение, 1966. – 244 с. [Электронный ресурс]: https://openbooks.itmo.ru/lib_book/25456/25456.pdf. Доступ 13.01.2023.

10. Волохов Г. М., Коссов В. С. Оценка допустимых величин риска перевозки грузов различной категории опасности на железнодорожном транспорте // Тяжёлое машиностроение. – 2010. – № 1. – С. 28–30. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13064940>. Доступ 13.01.2023.

11. Махутов Н. А., Резников Д. О., Коссов В. С., Оганьян Э. С., Волохов Г. М., Овечников М. Н., Протопопов А. Л. Методы определения ресурса нерезервируемых несущих элементов подвижного состава и пути // Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО «РЖД». – 2017. – № 3. – С. 19–39. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30113989>. Доступ 13.01.2023.

12. Махутов Н. А., Лыглаев А. В., Большаков А. М. Хладостойкость (метод инженерной оценки) / Под ред. М. П. Лебедева, Ю. Г. Матвиенко. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 195 с. ISBN 978-5-7692-1202-4.

13. Хладостойкость материалов и элементов конструкций: результаты и перспективы / Отв. ред. В. В. Филиппов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 290 с. ISBN 5-02-032442-6.

14. Махутов Н. А., Филин В. М., Волохов Г. М., Гордеев С. В. Проблемы бионетики, бионики и кибернетики // Экономические стратегии. – 2017. – № 3. – С. 6–15. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30469902>. Доступ 13.01.2023.

15. Голубева М. В., Сыч О. В., Хлусова Е. М. Исследование структуры и свойств сварных соединений из высокопрочной хладостойкой стали марки 09ХГН2МД, полученных электродуговой и лазерной сваркой // Тяжёлое машиностроение. – 2018. – № 7–8. – С. 23–32. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36300501> [платный доступ]. ●

Информация об авторах:

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.

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, timakov-mv@vnikti.com.

Статья поступила в редакцию 04.04.2023, одобрена после рецензирования 17.11.2023, принята к публикации 20.11.2023.

