

УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

Абрамов Андрей Дмитриевич – д-р техн. наук, проф.

Заместитель главного редактора

Карасёв Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц.

Ответственный секретарь

Игумнов Алексей Андреевич – канд техн. наук

Члены редколлегии

Бехер Сергей Алексеевич, профессор, д-р техн. наук, СГУПС, г. Новосибирск

Дементьев Алексей Петрович, профессор, д-р экон. наук, СГУПС, г. Новосибирск

Ильиных Андрей Степанович, профессор, д-р техн. наук, СГУПС, г. Новосибирск

Ланис Алексей Леонидович, профессор, д-р техн. наук, СГУПС, г. Новосибирск

Бабиц Анатолий Васильевич, профессор, канд. техн. наук, СГУПС, г. Новосибирск

Яшинов Андрей Николаевич, доцент, д-р техн. наук, СГУПС, г. Новосибирск

Величко Дмитрий Валерьевич, доцент, канд. техн. наук, СГУПС, г. Новосибирск

Пятаев Максим Викторович, доцент, канд. экон. наук, СГУПС, г. Новосибирск

Тарасов Евгений Борисович, доцент, канд. техн. наук, СГУПС, г. Новосибирск

Сайт журнала:

<https://fpvt.ru/>

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77 - 81137 от 25.05.2021

ISSN электронной версии: 2712-9195

FOUNDER

Siberian State University of Railway Engineering

Editors and Editorial Board

Editor-in-Chief

Abramov Andrey Dmitrievich Doctor of Technical Sciences, Professor

Deputy Editor-in-Chief

Karasev Sergey Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Executive Secretary

Igumnov Alexey Andreevich – Candidate of Technical Sciences

Members of the Editorial Board

Becher Sergey Alekseevich, Professor, Doctor of Technical Sciences, STU, Novosibirsk

Alexey Petrovich Dementiev, Professor, Doctor of Economics, STU, Novosibirsk

Ilyinykh Andrey Stepanovich, Professor, Doctor of Technical Sciences, STU, Novosibirsk

Lanis Alexey Leonidovich, Professor, Doctor of Technical Sciences, STU, Novosibirsk

Babich Anatoly Vasilyevich, Professor, Candidate of Technical Sciences, STU, Novosibirsk

Yashnov Andrey Nikolaevich, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, STU,
Novosibirsk

Velichko Dmitry Valeryevich, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, STU,
Novosibirsk

Pyataev Maxim Viktorovich, Associate Professor, Candidate of Economic Sciences, STU,
Novosibirsk

Tarasov Evgeny Borisovich, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, STU,
Novosibirsk

The website:
<https://fpvt.ru/>

The journal was registered by the Federal Service for Supervision of Communications,
Information Technology and Mass Media in 2021
Electronic version ISSN: 2712-9195

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

- Д.А. Жуков, А.А., Игумнов А.А. Анализ конструкций реконфигурируемых колёсно-гусеничных движителей для малогабаритных самоходных платформ (обзор мирового опыта) 5-12
- М.А. Анкудинов, А.С. Ильиных Методика оптимизации рамной конструкции самоходной платформы 13-19
- Ю. А. Бердышева Моделирование изменения пассажиропотока при скоростном движении 20-28
- П.С. Бурдяк, Д.А. Кузнецов Определение параметров контейнерных площадок малой площади 29-39
- А. А. Игумнов, Т. В. Игумнова Разработка методики калибровки испытательного участка рельса с помощью тензометрии 40-45
- Т.С. Овчинникова, Ш.Н. Валиев Современные подходы к оценке и обеспечению надежности мостовых сооружений: анализ проблем и перспективы развития 46-51
- В. С. Костромин, М. С. Галай, В. И. Кочергин Совершенствование технологии плазменной резки металлов 52-56
- А. П. Грэфенштейн, В. С. Гарнец, А. Н. Корнеева Элементы срока доставки в международных контейнерных перевозках

Строительство и архитектура

- А.В. Паторняк Технологии информационного моделирования мостовых сооружений: интеграция методической и нормативной базы 68-76
- А. В. Бахарева, Д.А. Ланис, П.О. Ломов Экспериментальное определение поправочного коэффициента для прочности грунтоцемента, изготовленного в водонасыщенных грунтах 77-83
- Б.Б. Жаналиев, И.Г. Овчинников Современные подходы к моделированию коррозионной деградации железобетонных конструкций 84-88

CONTENTS

Transport

- D.A. Zhukov, Igumnov A.A. Analysis of reconfigurable wheel track propulsor designs for small scale self propelled platforms (a review of global experience) 5-12
- M.A. Ankudinov, A.S. Ilinykh Methodology for optimizing the frame structure of a self-propelled platform 13-19
- Yu. A. Berdysheva Modeling passenger flow changes during high-speed traffic 20-28
- P.S. Burdyak, D.A. Kuznetsov Determining the parameters of small-scale container sites 29-39
- A. A. Igumnov, T. V. Igumnova Development of a calibration method for a cyclic testing setup using strain gauges 40-45
- T.S. Ovchinnikova, S.N. Valiev Modern approaches to assessing and ensuring the reliability of bridge structures: analysis of problems and development prospects 46-51
- V. S. Kostromin, M. S. Galaj, V. I. Kochergin Improvement of plasma technology metal cutting 52-56
- A. P. Grefenshteyn, V. S. Garnets, A. N. Korneeva Elements of delivery time in international container transport

Construction and architecture

- A.V. Patornyak Bridge Information Modeling Technology: Integration of Methodological and Regulatory Standards 68-76
- A. V. Bakhareva, D.A. Lanis, P.O. Lomov Experimental Determination of a Correction Factor for the Strength of Soil-Cement Produced in Water-Saturated Ground Conditions 77-83
- B.B. Zhanaliyev, I.G. Ovchinnikov Modern approaches to modeling the corrosion degradation of reinforced concrete structures. 84-88

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ КОЛЁСНО-ГУСЕНИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ САМОХОДНЫХ ПЛАТФОРМ (ОБЗОР МИРОВОГО ОПЫТА)

Д.А. Жуков, А.А., Игумнов А.А.

Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Россия

Аннотация. В статье представлен обзор трёх современных конструктивных подходов к созданию реконфигурируемых колёсно-гусеничных движителей для малогабаритных самоходных транспортных платформ. Рассмотрены активно-управляемый преобразуемый движитель NEZA-I с самоадаптивным механизмом, реконфигурируемая система с линейными электроприводами и пассивно-адаптивный гусеничный движитель с поворотными рычагами. Для каждой конструкции описаны кинематическая схема, принципы трансформации движителя, методы параметрической оптимизации и экспериментальные результаты. Показано, что применение реконфигурируемых схем позволяет сочетать высокую проходимость на слабонесущих грунтах с энергоэффективностью на твёрдых покрытиях. Сформулированы основные направления дальнейшего совершенствования таких систем.

Ключевые слова: реконфигурируемый движитель, колёсно-гусеничная система, самоадаптация, пассивные поворотные рычаги, оптимизация шарнирных соединений, мобильная платформа.

ANALYSIS OF RECONFIGURABLE WHEEL TRACK PROPULSOR DESIGNS FOR SMALL-SCALE SELF-PROPELLED PLATFORMS (A REVIEW OF GLOBAL EXPERIENCE)

D.A. Zhukov, Igumnov A.A.

Siberian State University of Railway Transport, 191 Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia

Abstract. The paper presents an overview of three modern design approaches to reconfigurable wheel-track propulsors for small-scale self-propelled transport platforms. The actively controlled transformable propulsor NEZA-I with a self-adaptive mechanism, a reconfigurable system with linear electric actuators, and a passively adaptive tracked propulsor with swing arms are considered. For each design, the kinematic scheme, principles of propulsor transformation, parametric optimisation methods and experimental results are described. It is shown that reconfigurable layouts make it possible to combine high trafficability on weak soils with energy efficiency on hard surfaces. The main directions for further improvement of such systems are formulated.

Keywords: reconfigurable propulsor, wheel-track system, self-adaptation, passive swing arms, hinge joint optimisation, mobile platform.

Малогабаритные самоходные транспортные платформы всё чаще используются при выполнении работ в условиях ограниченного пространства, на слабонесущих грунтах и пересечённой местности - при ликвидации последствий стихийных бедствий, в разведывательных операциях, при мониторинге инфраструктуры. Ходовая часть таких платформ должна обеспечивать высокую

проходимость при минимальном удельном давлении на опорную поверхность и одновременно быть энергоэффективной при движении по твёрдым покрытиям. Традиционные колесные и гусеничные движители по отдельности не удовлетворяют этим противоречивым требованиям [1;2]. В связи с этим в мировой практике интенсивно развиваются реконфигурируемые колёсно-гусеничные системы, способные изменять свою геометрию и режим движения в зависимости от характеристик опорной поверхности.

Преобразуемый колёсно-гусеничный робот NEZA-I

Одной из наиболее проработанных конструкций является робот NEZA-I, предложенный Z. Li и соавторами [1]. Мобильный механизм состоит из двух симметричных трансформируемых колёсно-гусеничных модулей (Transformable Wheel-Track, TWT). Каждый модуль приводится в действие только одним серводвигателем и может эффективно перемещаться по пересечённой местности, автоматически изменяя конфигурацию гусеничного обвода без использования датчиков. Самоадаптация достигается за счёт непосредственного восприятия контактных усилий от окружающей среды.

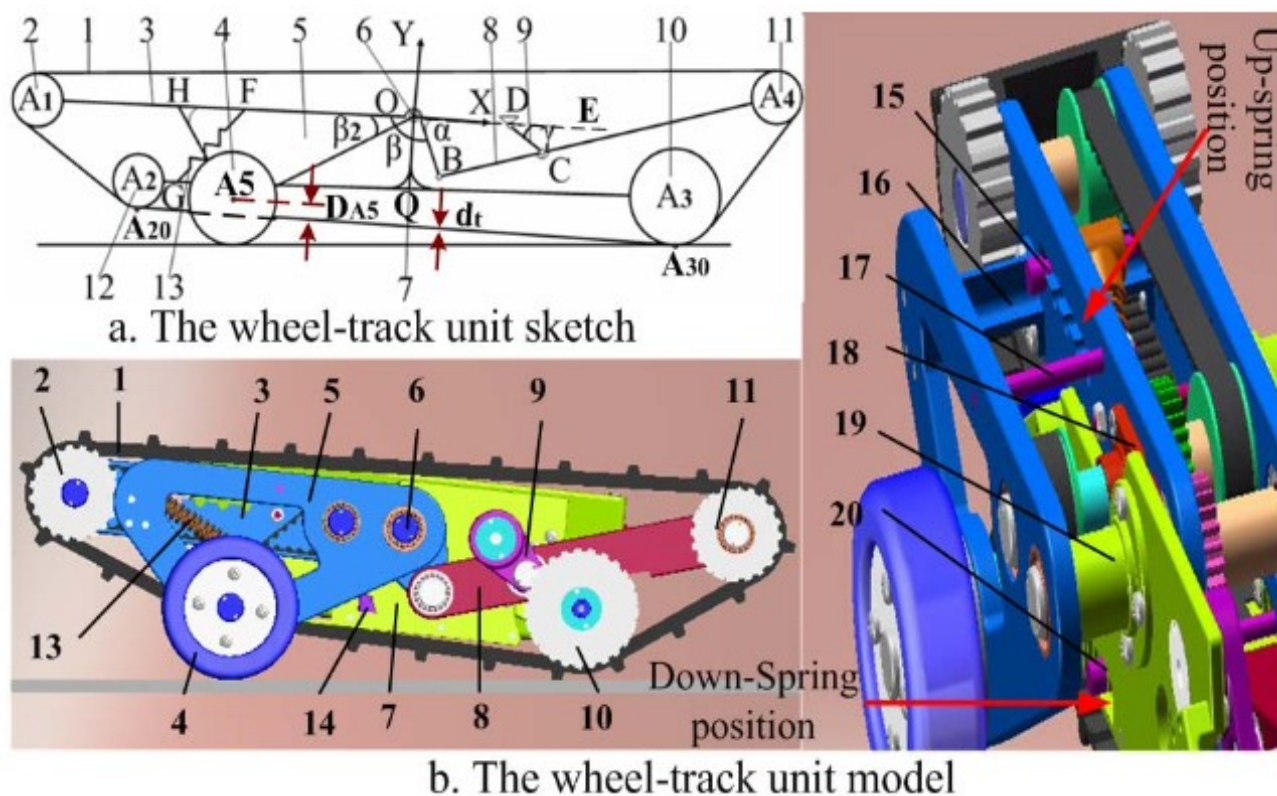


Рисунок 1 – Механизм трансформируемого колесно-гусеничного модуля

Конструкция TWT-модуля (рисунок 1) включает четырёхзвенный механизм, переднее и заднее регулировочные звенья, пружинный механизм и позиционный ограничитель. Функции пружины GF: удерживать ведущее колесо и гусеницу в контакте с грунтом в колёсном режиме; возвращать робот в колёсный режим после преодоления препятствия; служить амортизатором при внезапных ударах.

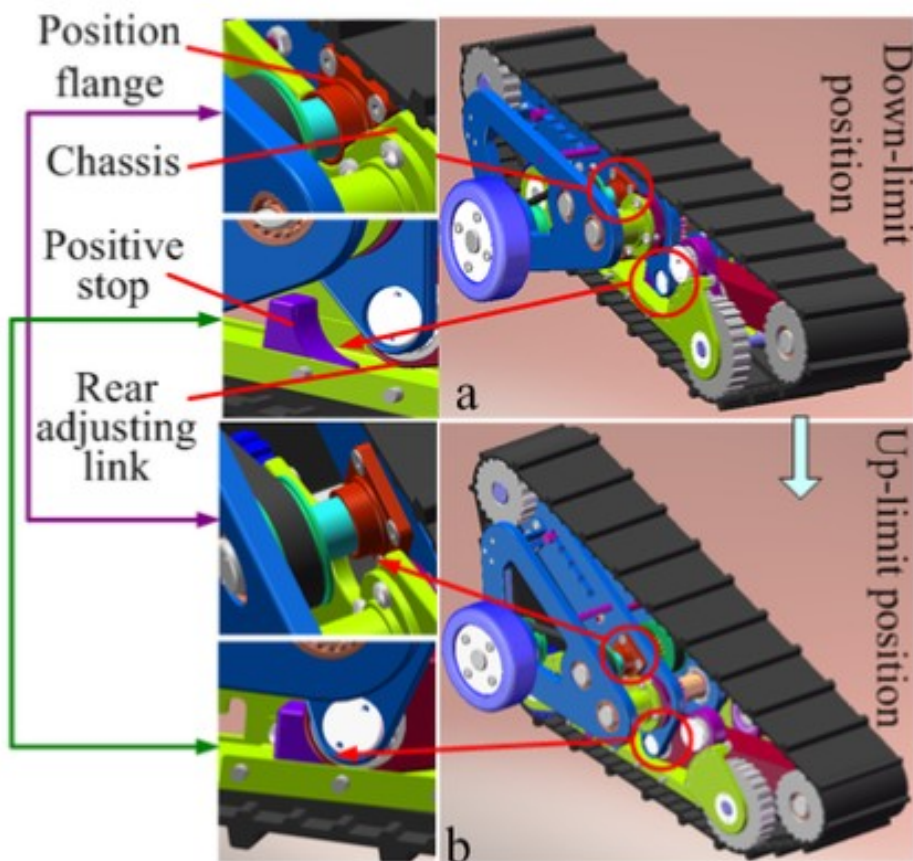


Рисунок 2 – Механизм ограничения положения

Механизм ограничения положения (рисунок 2) обеспечивает поворот переднего звена только в заданном диапазоне: в нижнем положении ($\alpha=60^\circ$) реализуется колёсный режим с минимальным углом атаки гусеницы; в верхнем положении ($\alpha=90^\circ$) – гусеничный режим с максимальным углом атаки.

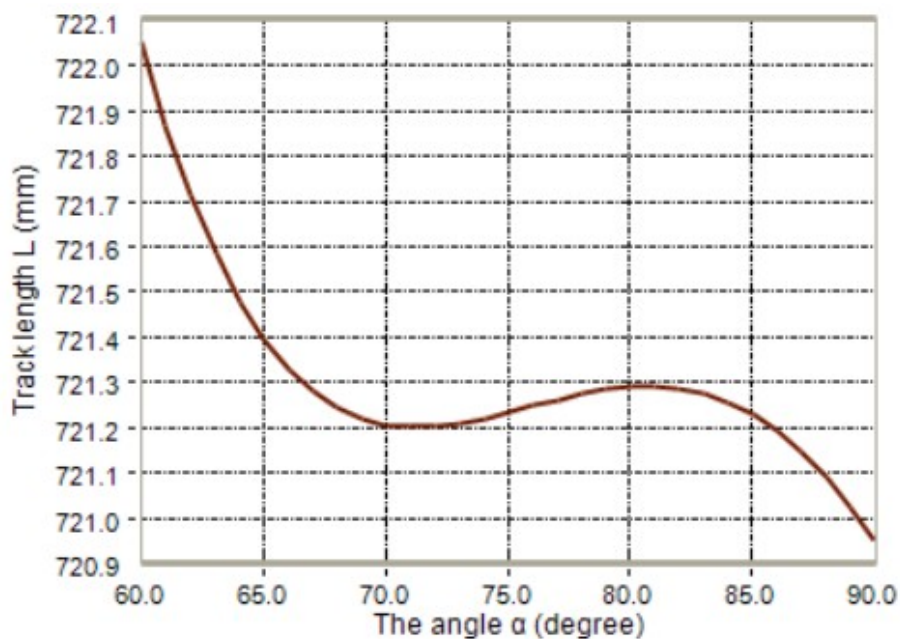


Рисунок 3 – График изменения длины гусеницы при изменении угла α

Анализ изменения длины гусеницы при изменении угла α показал, что максимальное варьирование длины составляет 1,1 мм при общей длине ~ 723 мм (относительное изменение 0,1 %), что позволяет обойтись без дополнительных натяжных устройств (рисунок 6).

Базовые эксперименты с прототипом NEZA-I подтвердили способность робота преодолевать вертикальные препятствия высотой до 120 мм, что вдвое превышает радиус ведущего колеса. Робот мгновенно переключается между колёсным и гусеничным режимами при изменении условий движения.

Реконфигурируемая колёсно-гусеничная система с линейными электроприводами

В работе J. Wang, C. Liu и соавторов [2] предложена мобильная платформа, реализующая принцип эквивалентной реконфигурации. Каждый движитель содержит передний и задний поворотные рычаги, звёздочку, вспомогательные колёса и приводной вал. Рычаги установлены на приводном валу на подшипниках и могут независимо вращаться; другой конец каждого рычага шарнирно соединён с линейным электроприводом (рисунок 4).

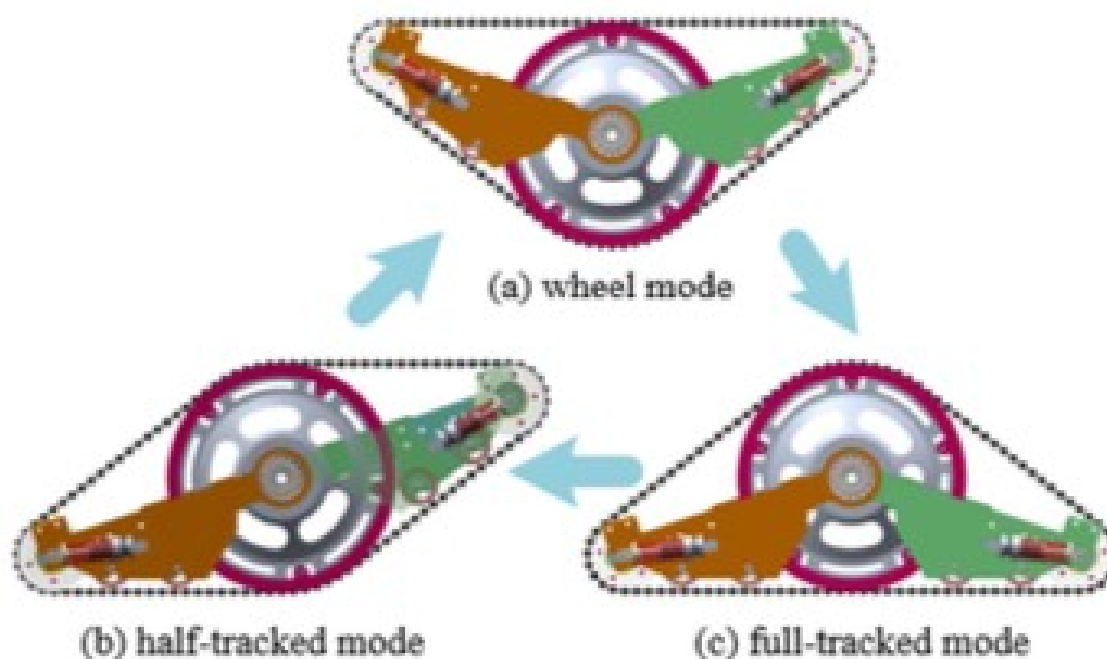


Рисунок 4 – Режимы реконфигурируемого движителя

При выдвигании или втягивании электропривода рычаги поворачиваются, обеспечивая три режима (рисунок 2):

- колёсный режим – оба рычага подняты, длина контакта с грунтом минимальна;
- полугусеничный режим – один рычаг поднят, другой опущен, достигаются максимальные углы въезда и съезда;

- гусеничный режим – оба рычага опущены, длина контакта максимальна.

Огибающая линия движителя при смене режимов остаётся неизменной, поэтому реконфигурация не требует изменения длины гусеницы. Для проектирования зубчатого ремня предложена методика, включающая расчёт углов обхвата, суммарной длины и проверку условия симметрии [2].

Особое внимание уделено оптимизации положения шарниров крепления линейного электропривода с целью минимизации потребного усилия. На основе геометрических и силовых ограничений и условий непересечения гусеницы с элементами привода сформулирована оптимизационная задача [2]. Применение метода нелинейного программирования с квадратичной аппроксимацией Лагранжа (NLPQL) позволило после 230 итераций получить оптимальные координаты шарниров. Ход электропривода составил 92 мм, минимальное расчётное усилие – 164,5 Н. Конечно-элементное моделирование дало значение усилия 183,8 Н, относительная погрешность – 13,5 %, что свидетельствует об адекватности модели. Экспериментально подтверждена возможность переключения режимов на движущемся роботе; полный цикл трансформации занимает менее 10 с.

Пассивно-адаптивный гусеничный робот с поворотными рычагами

R. Li и соавторы [3] предложили конструкцию адаптивного гусеничного робота, у которого поворотные рычаги (пассивные «крылья») не имеют собственных приводов, а реализуют адаптацию за счёт недоопределённости кинематической схемы.

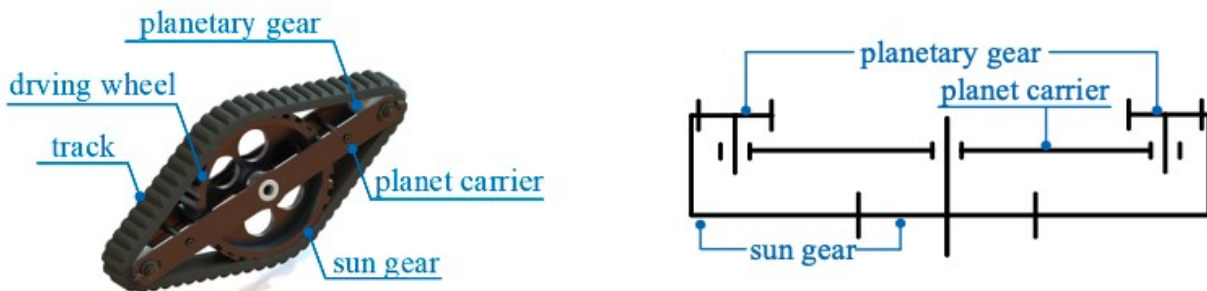
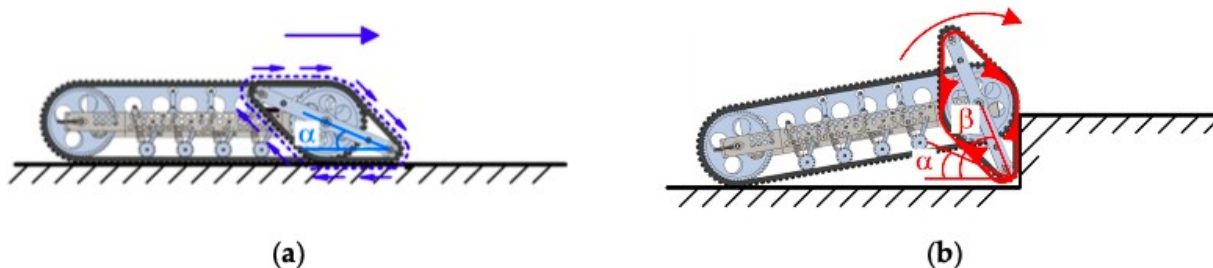


Рисунок 5 – Состав пассивного движителя и кинематическая схема привода

Поворотный рычаг представляет собой дифференциальный зубчатый механизм (рисунок 5): солнечная шестерня жёстко связана с ведущим валом, две планетарные шестерни и водило могут вращаться. Гусеница огибает все три колеса. Общее число степеней свободы робота – 6 (одна степень свободы у основной гусеницы и две степени у каждого из двух рычагов), однако благодаря кинематической связи эффективно управляемыми остаются только две степени свободы, что делает систему недоопределённой и обеспечивает пассивную адаптацию.

При движении по ровной поверхности рычаги находятся в «гусеничном режиме» – их гусеницы плотно прилегают к грунту (рисунок 6а). При встрече с вертикальной ступенькой передние концы рычагов упираются в препятствие, их

гусеницы останавливаются, и под действием силы тяги основной гусеницы вся система поворачивается как единое целое (рисунок 6б). Угол наклона водила увеличивается, корпус поднимается – реализуется режим «опрокидывания».



а – гусеничный режим; б – режим «опрокидывания»

Рисунок 6 – Режимы пассивного движителя

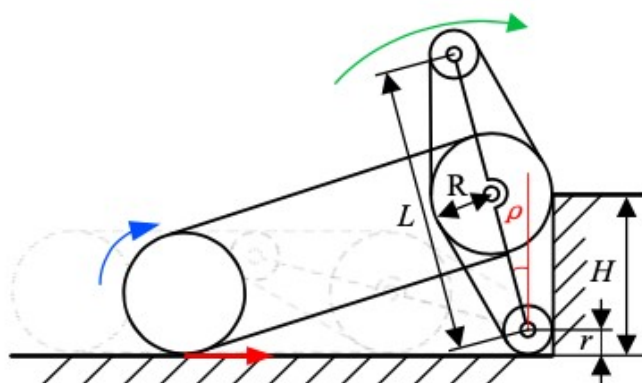


Рисунок 7 – Кинематический анализ

Кинематический анализ процесса преодоления одиночной ступени (рисунок 7) показал, что максимальная высота препятствия $H = r + (L/2) \cdot \cos \rho$, где r – радиус ведущего колеса, L – длина рычага, ρ – начальный угол наклона. Для изготовленного прототипа (масса 20 кг, размеры 780×600×200 мм) экспериментально подтверждено преодоление ступеней высотой до 250 мм.

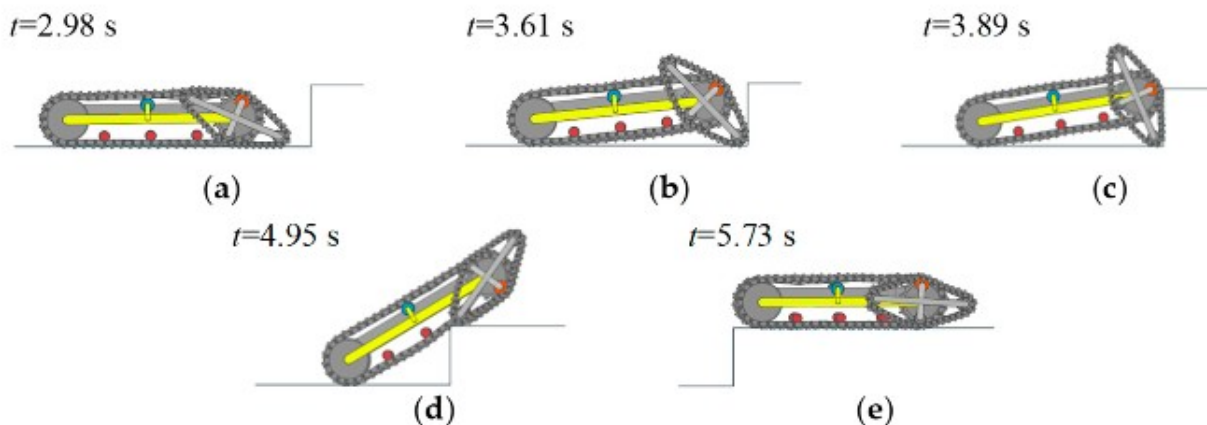


Рисунок 8 – Симуляция преодоления препятствия

Время от момента касания препятствия до полного подъёма на ступень составляет около 0,2 с, что хорошо совпадает с численным моделированием на основе уравнений Лагранжа (рисунок 8). Измерения мощности в реальных условиях (непрерывные ступени, брусчатка, газон, песок) подтвердили высокую адаптивность робота [3].

Заключение

На основе анализа трёх зарубежных конструкций реконфигурируемых колёсно-гусеничных движителей могут быть сделаны следующие выводы:

1. Возможны два основных подхода: активное переключение режимов с помощью дополнительных приводов (NEZA-I, система с линейными электроприводами) и пассивная адаптация за счёт недоопределённости кинематической схемы (робот с пассивными поворотными рычагами). Оба подхода позволяют изменять длину опорной поверхности и углы атаки гусеницы без изменения длины гусеничного полотна.

2. Экспериментально доказано, что реконфигурируемые системы способны преодолевать вертикальные препятствия высотой до двух радиусов ведущего колеса (NEZA-I – 120 мм, робот с пассивными рычагами – 250 мм при радиусе 150 мм). При этом переключение между режимами происходит либо мгновенно (NEZA-I), либо в течение нескольких секунд (система с линейными приводами – менее 10 с), что допустимо для реальных условий эксплуатации.

3. Для активно-управляемых систем применение методов нелинейного программирования (NLPQL) позволяет минимизировать требуемое усилие электропривода и определить рациональное расположение шарниров. Конечно-элементное моделирование даёт погрешность не более 13,5 % по сравнению с физическим экспериментом, что подтверждает пригодность разработанных математических моделей.

4. Для дальнейшего повышения адаптивности целесообразно комбинировать активное и пассивное управление, а также интегрировать датчики опорной поверхности (лидары, системы технического зрения) для предиктивной реконфигурации. Использование полимерных композитных материалов позволяет снизить массу ходовой части без потери прочности.

Результаты проведённого обзора могут служить основой для выбора рациональной конструктивной схемы реконфигурируемого движителя при проектировании малогабаритных самоходных платформ, предназначенных для работы в сложных дорожно-климатических условиях.

Библиографический список

1. Li Z., Ma S., Li B., Wang M., Wang Y. Design and Basic Experiments of a Transformable Wheel-Track Robot with Self-adaptive Mobile Mechanism // 2010

IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – Taipei, 2010. – P. 1333–1338. – DOI: 10.1109/IROS.2010.5654198.

2. Wang J., Liu C., Wei W., Yan Q. Design and Optimization of a Reconfigurable Wheel-Tracked Mobile Robot // 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – 2024. – DOI: 10.3233/ATDE231101.

3. Li R., Zhang X., Hu S., Wu J., Feng Y., Yao Y. Design and Analysis of an Adaptive Obstacle-Overcoming Tracked Robot with Passive Swing Arms // Machines. – 2022. – Vol. 10, No 5. – Art. 316. – DOI: 10.3390/machines10050316.

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РАМНОЙ КОНСТРУКЦИИ САМОХОДНОЙ ПЛАТФОРМЫ

М.А. Анкудинов¹, А.С. Ильиных¹

1. Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Россия

Аннотация: В статье рассмотрена самоходная платформа на дистанционном управлении и возможные условия её эксплуатации. Целью является определение зависимости параметра проходимости машины от смещения конструктивного элемента рамной конструкции и разработка методики оптимизации рамной конструкции.

Ключевые слова: рамная конструкция, самоходная машина, параметры эксплуатации, геометрические параметры.

METHODOLOGY FOR OPTIMIZING THE FRAME STRUCTURE OF A SELF-PROPELLED PLATFORM

M.A. Ankudinov¹, A.S. Ilinykh¹

1. Siberian transport university, 191 Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049, Russia

Abstract: The article discusses a remote-controlled self-propelled platform and possible operating conditions. The purpose is to determine the dependence of the machine's maneuverability parameter on the displacement of the structural element of the frame structure.

Key words: frame structure, self-propelled machine, operation parameters, geometric parameters.

Самоходные универсальные платформы активно эксплуатируют в различных отраслях, таких как промышленные и складские помещения для транспортировки груза, помощь коммунальным службам и даже спасение пострадавших людей. Главной и весомой задачей стоит сохранение жизни и здоровья человека, который эксплуатирует машины и выполняет какие-либо поставленные задачи. Внешний вид самоходной платформы на дистанционном управлении см. рис. 1.

Отличительным параметром от остальных существующих самоходных платформ является отсутствие жёсткой связи между боковыми частями рамной конструкции. Связана рамная конструкция в единое целое лишь одной осью, относительно которой две части рамы могут перемещаться относительно друг друга по радиальной траектории. Рамная конструкция см. рис. 2 состоит из двух полурам, изготовленных из труб квадратного сечения. На рамной конструкции размещена платформа с целью транспортировки грузов или пострадавших. С целью предотвращения опрокидывания платформы, на которой перемещается груз, в передней части устанавливают ограничительные элементы, в виде квадратного профиля.

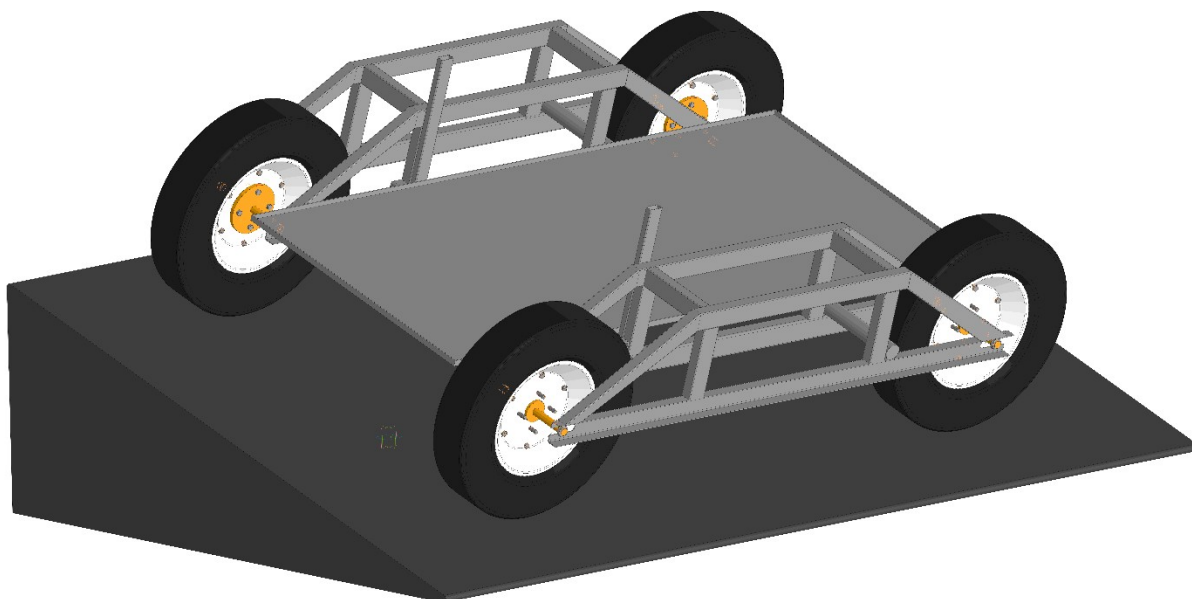


Рис. 1. – Самоходная платформа

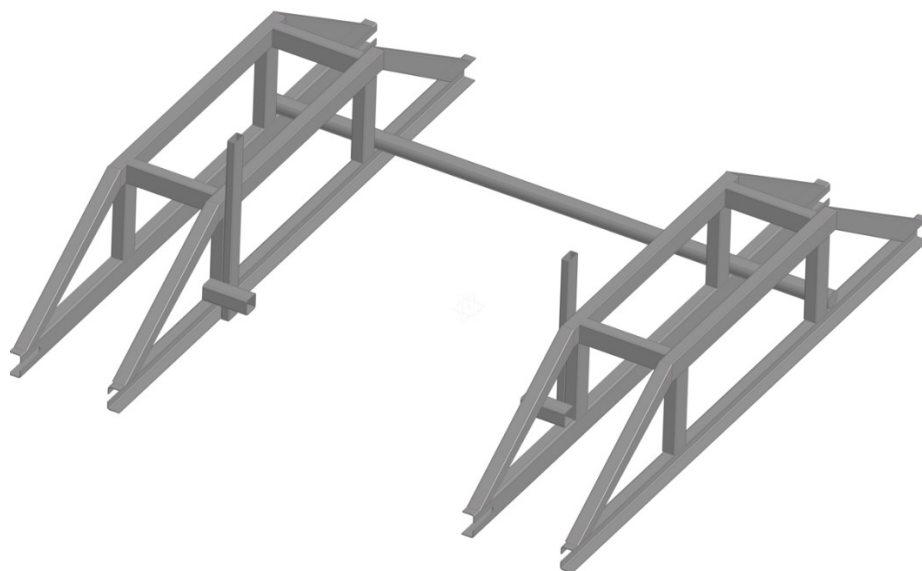


Рис.2. – Рамная конструкция транспортного средства

В условиях интенсивного развития транспортной инфраструктуры и расширения спектра эксплуатационных задач, актуальной является проблема обеспечения проектирования универсальных транспортных средств. Их оценка осуществляется множеством критериев, в том числе экономические, функциональные, технологические и другие.

Существующая система оценочных факторов не позволяет сформировать объективную характеристику оценки транспортного средства. Кроме того, сравнительный анализ различных исполнений машин ограничен, из-за разнородности параметров, что не позволяет достичь высокой точности при определении оптимального технического решения.

Для упрощения параметрического моделирования на этапе проектирования целесообразным будет выделить один наиболее значимый

параметр оценивания. В рамках работы, сравниваемым параметром определена проходимость.

Проходимостью называется способность перемещаться по автомобильным подготовленным дорогам и естественным поверхностям земли без предварительной подготовки и вспомогательных средств.

На основании вышеизложенного были поставлены следующие задачи работы:

1. Анализ геометрических параметров рассматриваемой самоходной платформы на дистанционном управлении;
2. Определение изменяемых и влияющих параметров на проходимость рассматриваемой машины;
3. Определение влияния конструктивного элемента, изменение которого может изменить оцениваемый параметр;
4. Разработка методики по оптимизации параметров проходимости относительно условий и задач эксплуатации.

В ходе анализа параметров проходимости, можно сделать вывод, что проходимость напрямую зависит от следующих параметров:

- Геометрические параметры (профильная проходимость) характеризуют способность транспортного средства передвигаться по дорогам с различным рельефом и типом покрытий, а также преодолевать различные препятствия дороги, в том числе подъёмы, спуски, ямы и прочие неровности.

Основные геометрические параметры проходимости: дорожный просвет, угол въезда, угол съезда, продольный угол опрокидывания, поперечный угол опрокидывания, продольный радиус проходимости, поперечный радиус проходимости и ширина колеи.

- Из геометрического параметра колеи следуют параметры ходовой части, которые определяют взаимодействие машины с опорной поверхностью. Параметрами ходовой части являются: Наружный диаметр шины, ширина профиля шины, диаметр профиля, форма профиля шины, конструкция протектора, давление воздуха в шинах, количество осей, величина нормальной нагрузки на колесо.

Дорожный просвет измеряется от опорной поверхности, до самой низкой точки, транспортного средства. В случае с самоходной платформой, самой низкой точкой будет являться нижняя часть квадратного профиля рамной конструкции, которая располагается на расстоянии 250мм от опорной поверхности.

Отсутствующие передний и задний свесы позволяют не учитывать этот критерий при расчётах. Размер, который имеет место быть при условии анализа проходимости транспортного средства – радиус колеса, именно он является максимально отдалённой точкой от оси колеса, а также габаритом транспортного средства. Продольный радиус проходимости составляет 0,88м. Все вышеуказанные параметры изображены на рисунке 3.

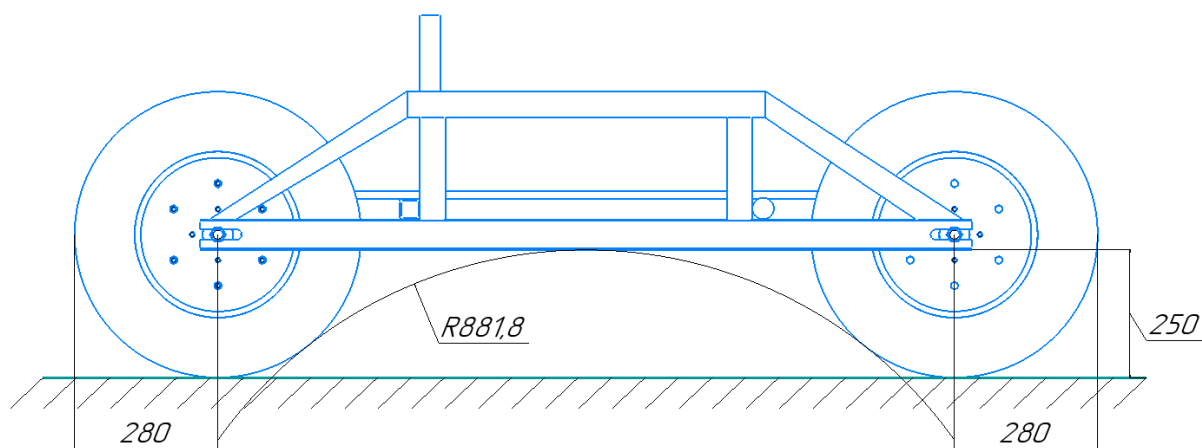


Рис. 3. – Геометрические параметры проходимости ТС

Одним из значительных способов изменить параметры проходимости на рассматриваемой машине, это перемещение в пределах рамной конструкции связывающей оси

Анализируя все существующие параметры проходимости, можно выделить лишь четыре интересующих параметра:

- 1) Мощность, затрачиваемая на преодоление препятствия;
- 2) Продольный угол опрокидывания;
- 3) Тяговое свойство по сцеплению;
- 4) Динамический фактор по сцеплению.

Остальные параметры требуют либо изменения силовых агрегатов, либо не имеют отношение к рассматриваемой рамной конструкции.

В расчётах учитывалось распределение массы на платформе в трёх рассматриваемых случаях, а именно с задним (первоначальным исполнением), средним и передним расположением связывающей оси.

Рассчитав силу тяжести транспортного средства и определив отношение расположения связывающей оси относительно задних колёс по формуле 1.

$$G_i = G_a - \left(\frac{x}{3} \cdot G_a \right) \quad (1)$$

где G_a - сила тяжести транспортного средства, x – 0,8; 1,5; 2,37 для заднего, среднего и переднего расположений оси соответственно.

После чего по формуле 2 определяется мощность, затрачиваемая на преодоление препятствия:

$$P_i = \frac{G_a \cdot \sin \alpha \cdot v}{3600} \quad (2)$$

где, α – угол продольного уклона, град.; V – скорость транспортного средства км/ч.

Следующим фактором является угол продольного опрокидывания, который рассчитывается по формуле 3.

$$\alpha_{оп} = \arctan \left(\frac{b}{h_g} \right) \quad (3)$$

где, b – координата точки центра масс относительно заднего колеса; h_g – высота расположения точки центра масс.

Далее производится расчёт тягового свойства по сцеплению. Для этого необходимо соблюсти условие движения ведущего колеса без буксования по формуле 4.

$$X_k = G_k(\varphi + f) \quad (4)$$

где G_k – весовая нагрузка на колесо; φ – коэффициент сцепления; f – коэффициент сопротивления качению.

Определить весовую нагрузку на колесо по формуле 5.

$$G_k = \frac{G_{на ось}}{2} \quad (5)$$

где, $G_{на ось}$ – весовая нагрузка на одну из осей транспортного средства.

Если коэффициент сопротивления качению мал, то приближенно можно принять по формуле 6:

$$X_k = G_k \cdot \varphi \quad (6)$$

По формуле 7 определяем тяговое свойство по сцеплению:

$$P_\varphi = G_k \cdot \varphi \quad (7)$$

Для определения динамического фактора по сцеплению необходимо воспользоваться формулой 8.

$$D_{сц} = \frac{G_n \cdot \varphi}{G} \quad (8)$$

где G_n – вес на ведущих колёсах

После всех вычислений необходимо свести данные в один график и получить зависимости параметров проходимости от расположения связывающей оси. По результатам построения графика будет определено приблизительное расположение связывающей оси, либо рекомендуемый диапазон связывающей оси, если будет точка пересечения параметров на графике.

Основываясь на описанном алгоритме, был произведён расчёт для самоходной платформы массой 109 кг и грузом 300 кг. Результат расчёта см. рис. 4.

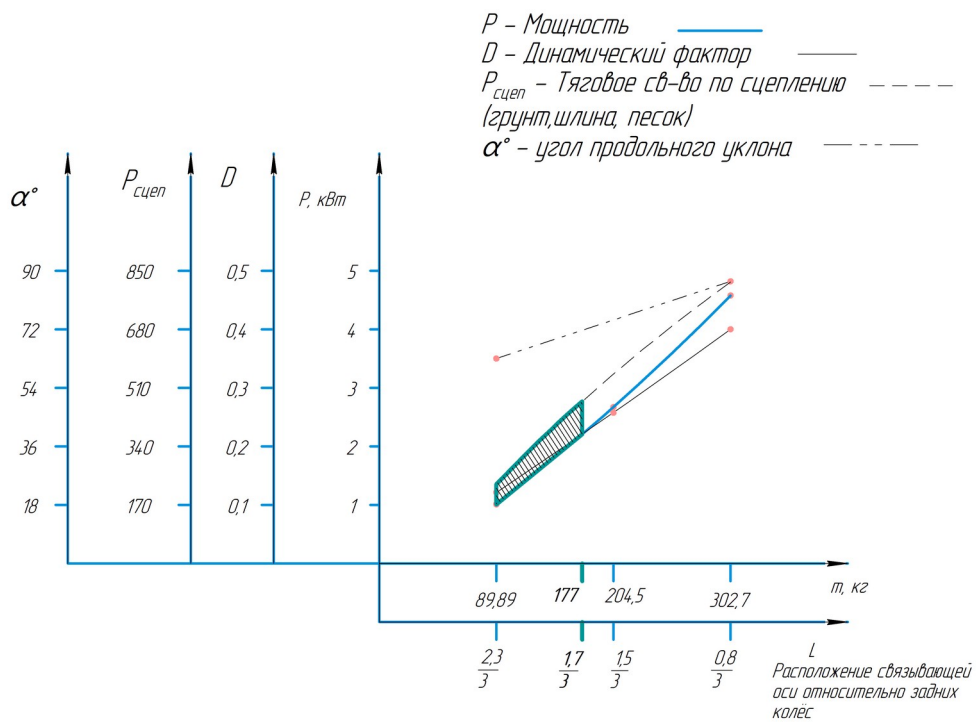


Рис. 4. – Зависимость рассматриваемых параметров от перемещения связывающей оси

После апробации была составлена блок-схема алгоритма расчёта см. рис. 5.



Рис. 5. – Алгоритм расчёта рамной конструкции ТС

Вывод: в ходе работы были изучены параметры проходимости и выявлены их взаимосвязи. Была определена зависимость наиболее значимых параметров проходимости от расположения конструктивного элемента, что может помочь прогнозировать изменение одного параметра от изменения другого. Помимо зависимости определён перечень параметров, оказывающих существенное влияние на критерий проходимости. Основным результатом исследования стал разработанный алгоритм расчёта рамной конструкции транспортного средства, который позволяет рационально разместить связывающую ось в пределах рамной конструкции транспортного средства в пределах между передними и задними колёсами. Разработанный алгоритм может быть применён при проектировании самоходных платформ для различных условий эксплуатации.

Библиографический список

1. Теория автомобиля: учебник / В.Н. Кравец; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – 2-е изд., переработ. – Нижний Новгород, 2013. – 413 с.
2. Лаврентьев В.Б. В помощь строителям БАМ. Вождение автомобилей высокой проходимости. М. : Транспорт, 1974.
3. Устойчивость специальных транспортных средств: учеб. пособие /А.М. Петренко; МАДИ.- М., 2013. – 41 с
4. Эксплуатационные свойства автомобилей: Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Конструкция и элементы расчета автомобилей» для студентов специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.И. Козликин, Б.А. Семенихин, А.А. Толкушев. Курск, 2021. 68 с.
5. Беляев В. М. Автомобили: Испытания: учебное пособие для вузов /В. М. Беляев, М. С. Высоцкий, Л. Х. Гилелес. – Минск: Высшая школа, 1991. – 187 с.
6. Теория эксплуатационных свойств автомобилей / В.М. Фомин. РУДН. Москва 2008.
7. Проходимость автомобилей. Агейкин Я.С. – М.: Машиностроение, 1981; 232с.
8. Критерии оценки качества транспортно-технологических машин НГТУ им Р.Е. Алексеева. №4(115) / В.В. Беляков, А.М. Беляев, П.О. Береснев.
9. Влияние конструктивных особенностей и параметров ходовой части на проходимость транспортного средства / Калеушев М.В., Волков Е.А.
10. ГОСТ Р 52302-2004 Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА ПРИ СКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ

Ю. А. Бердышева

Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Россия

Аннотация: в статье предлагается подход к количественной оценке изменения пассажиропотока при введении скоростного движения с использованием математического моделирования. Оценка транспортных потоков и экономическая эффективность скоростного движения выполнена с использованием гравитационной модели и авторского подхода, при котором оценка стоимости времени осуществляется в виде стоимости рабочего времени пассажира. Авторский подход демонстрирует ориентировочный эффект от введения скоростного движения на участке Омск-Новосибирск, который дает основание считать проекты развития скоростных дорог в Сибирском регионе экономически обоснованными.

Ключевые слова: скоростное движение, пассажиропоток, гравитационная модель, оценка транспортных потоков.

MODELING PASSENGER FLOW CHANGES DURING HIGH-SPEED TRAFFIC

Yu. A. Berdysheva

Siberian Transport University, Dusi Kovalchuk St., 191, Novosibirsk, 630049, Russia

Abstract: This article proposes an approach to quantitatively assessing passenger flow changes following the introduction of high-speed rail using mathematical modeling. Traffic flows and the economic efficiency of high-speed rail are assessed using a gravity model and the author's approach, which quantifies the cost of time as the value of passenger working time. The author's approach demonstrates the estimated effect of introducing high-speed rail on the Omsk-Novosibirsk section, which provides grounds for considering high-speed rail development projects in the Siberian region economically viable.

Keywords: high-speed rail, passenger flow, gravity model, traffic flow assessment.

Оценка транспортных потоков и экономическая эффективность скоростного движения в условиях развития железнодорожного транспорта на основе современных технологий осуществляется всевозможными способами [1]. Модели и методы теории массового обслуживания представляются приоритетными в данном направлении исследования [2].

Время, которое тратит пассажир на перемещение от места нахождения до конечного пункта, является преимущественным фактором в процессе скоростного железнодорожного движения [3].

Базовыми характеристиками при решении использования предпочтительного пассажиру вида транспорта выступают минимальные временные значения пути и денежных затрат на него [4].

Базовый метод расчета пассажиропотока между железнодорожными посадочными станциями представлен использованием гравитационной модели, функционирование которой выражается зависимостью силы тяготения станций

друг к другу в зависимости от их размеров и расстояния между ними (формула 1) [5]:

$$\lambda_{i,j} = G_t \frac{m_i m_j}{t_{i,j}^2}, \quad (1)$$

где $\lambda_{i,j}$ – интенсивность пассажиропотока;

m_i, m_j – население, проживающее в i -м и j -м пунктах соответственно;

$t_{i,j}$ – время передвижения между i -м и j -м пунктами;

G_t – некоторая константа (аналог гравитационной постоянной в механике).

Принимая во внимание численность жителей и суммарного пассажиропотока (Λ) между станциями железной дороги, оценку пассажиропотока между станциями можно рассчитать по формуле (1), где константа G_t определяется выражением (формула 2) [6]:

$$G_t = \Lambda \left(\sum_i \sum_{j \neq i} \frac{m_i m_j}{t_{i,j}^2} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Важно помнить, что изменение времени пути оказывает существенное влияние на изменение пассажиропотока между станциями.

Чтобы выбрать вид транспорта, пассажир, в первую очередь, смотрит на время пути и стоимость билета. Очевидно, что время передвижения на стандартном поезде t_{Π} больше, чем на скоростном (экспрессе) $t_{\mathcal{E}}$, а на самолете скорость еще выше, поэтому время передвижения самое маленькое $t_{\mathcal{C}}$. С другой стороны, затраты на тарифы, наоборот, возрастают: $C_{\Pi} < C_{\mathcal{E}} < C_{\mathcal{C}}$.

Таким образом, чем выше стоимость времени у пассажира, тем чаще он будет использовать скоростные виды сообщения.

Скоростные поезда выберут люди, у которых стоимость времени в пути (пассажиро-часа) C_{sp} лежит в следующих пределах (формула 3) [7]:

$$\frac{C_{\mathcal{E}} - C_{\Pi}}{t_{\mathcal{E}} - t_{\Pi}} < C_{sp} < \frac{C_{\mathcal{C}} - C_{\mathcal{E}}}{t_{\mathcal{E}} - t_{\mathcal{C}}}. \quad (3)$$

Тогда доля пассажиров, выбирающих скоростные поезда ($\delta_{\mathcal{E}}$), составит (формула 4):

$$\delta_{\mathcal{E}} = F \left(\frac{C_{\mathcal{C}} - C_{\mathcal{E}}}{t_{\mathcal{E}} - t_{\mathcal{C}}} \right) - F \left(\frac{C_{\mathcal{E}} - C_{\Pi}}{t_{\Pi} - t_{\mathcal{E}}} \right), \quad (4)$$

где $F(x)$ – функция распределения стоимости времени в пути населения.

При этом пассажиры с низким уровнем дохода попадают в премедитатное исключение (формула 5):

$$P_d = F\left(\frac{C_c - C_{\text{э}}}{t_{\text{э}} - t_c}\right) \cdot 100\% \quad (5)$$

Таким образом, оценка социально-экономических эффектов от введения скоростного движения представлена одним из подходов, при котором оценка стоимости времени осуществляется в виде стоимости рабочего времени пассажира [8].

Понятие «премедитатное исключение», введенное автором, представляет собой численный критерий оценки качества услуги или сервиса и его влияния на их объем, заключающееся в ограничении доступа некоторых пассажиров к услуге, в частности, скоростному пассажирскому сообщению, сокращающему время передвижения [9].

Пример использования этого подхода представлен расчетом прогноза изменения пассажиропотока между станциями на линии Омск-Новосибирск при введении скоростного железнодорожного сообщения. На сегодняшний день самыми крупными по населению городами на трассе Омск-Новосибирск являются Татарск, Барабинск и Чулым [6].

На рис. 1 условные площади городов (станций) изображены пропорционально их населению. При этом со станции Барабинск удобно передвигаться еще и жителям соседнего города Куйбышев [4].

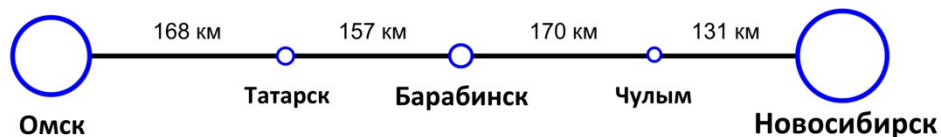


Рис. 1 - Станции планируемой скоростной магистрали

В настоящее время основные способы передвижения между данными станциями – это поезда и автобусы. Поезда дальнего сообщения – 10 пар поездов в сутки, делают остановки на всех станциях, кроме Чулымской (только половина остановок). Автобусное сообщение связывает Барабинск, Чулым и Новосибирск и осуществляется 2 раза в сутки.

Авиационное сообщение между Омском и Новосибирском осуществляется 1 раз в сутки. Пригородные поезда осуществляют перевозки из Омска только до Татарска. Между другими станциями количество поездов варьируется от 1 до 6.

Для региона трассы Омск-Новосибирск в 2024 году распределение доходов населения выглядит следующим образом (рис. 2 а).

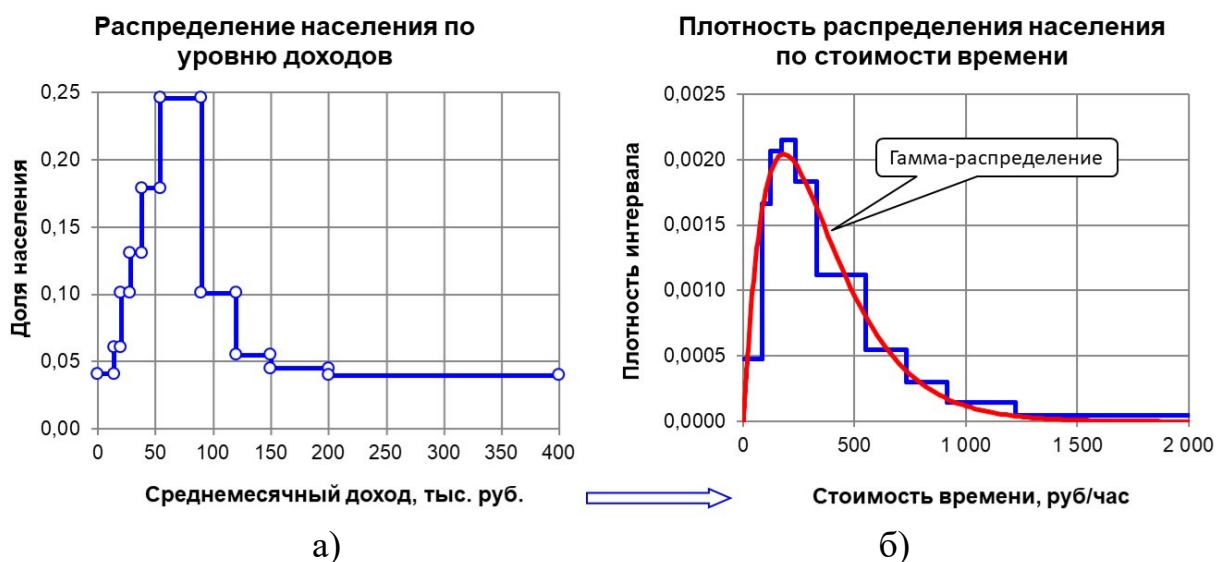


Рис. 2 – Среднемесячные доходы населения и их распределение:
 а) – распределение населения по среднемесячному уровню доходов;
 б) – плотность распределения населения по стоимости времени.

Тогда параметр $C_{вр}$ - стоимость времени населения, можно определить делением среднемесячного дохода на количество рабочих часов в месяце, которое примем равным 164 часам.

Одна из основных гипотез в математической статистике это гипотеза о законе распределения случайной величины [10]. Для проведения теоретических исследований реальные данные распределения населения по уровню доходов необходимо представить в виде некоторого закона. Наиболее часто используются нормальное распределение, экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, Гамма-распределение, равномерное распределение, логнормальное распределение, распределение Пирсона и др., каждое из которых имеет свою сферу практического применения.

Для поиска теоретического распределения в первую очередь необходимо определить семейство распределений, после чего определяют параметры распределения. Одним из основных способов поиска семейства распределений является сравнение реальных данных, представленных в виде гистограммы с функцией плотности теоретического распределения.

В рассматриваемом случае распределение среднемесячных доходов населения представлено неравномерными интервалами (рис 4.4а), поэтому для построения корректной гистограммы необходимо использовать, так называемую, плотность интервала или относительную частоту интервала, которая определяется делением доли населения в каждом интервале на его величину, выраженную в единицах стоимости времени $C_{вр}$ (руб./час).

Таким образом, рассчитав плотность каждого интервала, получим ступенчатый график распределения населения по стоимости времени (рис. 2 б).

Используя полученную гистограмму, подберем теоретическое распределение, путем сравнения с функцией плотности вероятности $f(x)$.

Для аппроксимации графика плотности распределения населения по стоимости времени, воспользуемся функцией плотности распределения частного случая Гамма-распределения – распределением Эрланга с целочисленными параметрами – параметром формы (α) и параметром масштаба (β) (формула 6):

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} (\alpha - 1)!} \quad (6)$$

В рассматриваемом примере, параметры распределения Эрланга, полученные методом максимального правдоподобия, составляют $\alpha = 2$ и $\beta = 180$ (рисунок 2 б) [3].

Полученная аппроксимация необходима для прогнозной оценки доли населения, выбирающей тот или иной вариант железнодорожного сообщения – обычный или скоростной поезд, в соответствии с формулой (4), где функция распределения стоимости времени населения – распределение Эрланга, имеет вид (формула 7):

$$F(x) = 1 - \sum_{n=0}^{n=\alpha-1} \frac{1}{n!} \cdot \left(\frac{x}{\beta}\right)^n \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}. \quad (7)$$

Данный подход реализован в разработанной автором исследования программе для ЭВМ «Стрела-XXI», предназначенной для расчета пассажиропотока при скоростном движении [11].

В табл. 1 приведен пример расчета пассажиропотока по скорректированной с учетом стоимости пассажиро-часа (формулы 3, 4) гравитационной модели с использованием трех видов передвижения – обычный поезд, скоростной (экспресс) и самолет, с фиксированными тарифами на поездку.

Таблица 1 – Распределение суточного пассажиропотока между городами Омск-Новосибирск с учетом стоимостного фактора в 2023 г.

Вид транспорта	Цена билета, руб.	Время поездки, час	Стоимость времени, руб./ч	Доля от исходного пассажиропотока	Добавленный пассажиропоток, чел./сут.
Обычный поезд	3000	7,6	≤ 500	0,77	0,00
Скоростной поезд	5000	3,6	≤ 1667	0,23	1229
Самолет	8000	1,8	> 1667	0,00	0,00

Для определения граничных значений стоимости времени используем ограничение (формула 3). Пассажиры с низкой стоимостью времени предпочитают использовать обычный поезд, так как не готовы платить за экономию времени. В таблице 4.4 скоростной поезд позволяет сократить время передвижения на 4 часа $t_{II} - t_{Э} = 7,6 - 3,6$, при этом требуется доплатить 2000 рублей $C_{Э} - C_{II} = 5000 - 3000$. Таким образом (формула 8):

$$\frac{C_{Э} - C_{II}}{t_{II} - t_{Э}} = \frac{2000}{4} = 500. \quad (8)$$

Аналогичным образом определим пограничную стоимость времени, при которой происходит перераспределение пассажиров между скоростным поездом (экспрессом) самолетом (формула 9):

$$\frac{C_C - C_{Э}}{t_{Э} - t_C} = \frac{8000 - 5000}{3,6 - 1,8} = 1667. \quad (9)$$

Рассчитаем доли каждого способа передвижения. Для обычного поезда по теории вероятности (формула 7):

$$\delta_{II} = P(x \leq 500) = F(500) = 1 - e^{-\frac{x}{180}} - \frac{x}{180} e^{-\frac{x}{180}} = 0,77.$$

То есть у 77% населения стоимость времени менее 500 рублей в час и им не рационально использовать скоростной поезд.

Доля передвижений на самолете:

$$\delta_C = P(x \geq 1667) = 1 - F(1667) = 0,001.$$

То есть на самолете между Новосибирском и Омском не выгодно передвигаться при наличии скоростного железнодорожного сообщения. Но в любом случае это может быть выгодно для транзитных пассажиров Новосибирского аэропорта, а такой пассажиропоток в данной работе не рассматривается. (Отметим, что при отсутствии скоростного поезда, на обычном поезде поедут 95% пассажиров, а на самолете полетят 5%).

Таким образом, все оставшиеся пассажиры используют скоростной поезд (формула 4):

$$\delta_{Э} = F\left(\frac{C_C - C_{Э}}{t_{Э} - t_C}\right) - F\left(\frac{C_{Э} - C_{II}}{t_{II} - t_{Э}}\right) = 0,23.$$

В соответствии с формулой (5) премедитатное исключение в приведенном примере равно 77%.

На рис. 3 показан результат скорректированной гравитационной модели оценки пассажиропотока в зависимости от тарифа на перевозки по скоростной магистрали при фиксированной стоимости билета Омск-Новосибирск на обычный поезд 3000 руб.

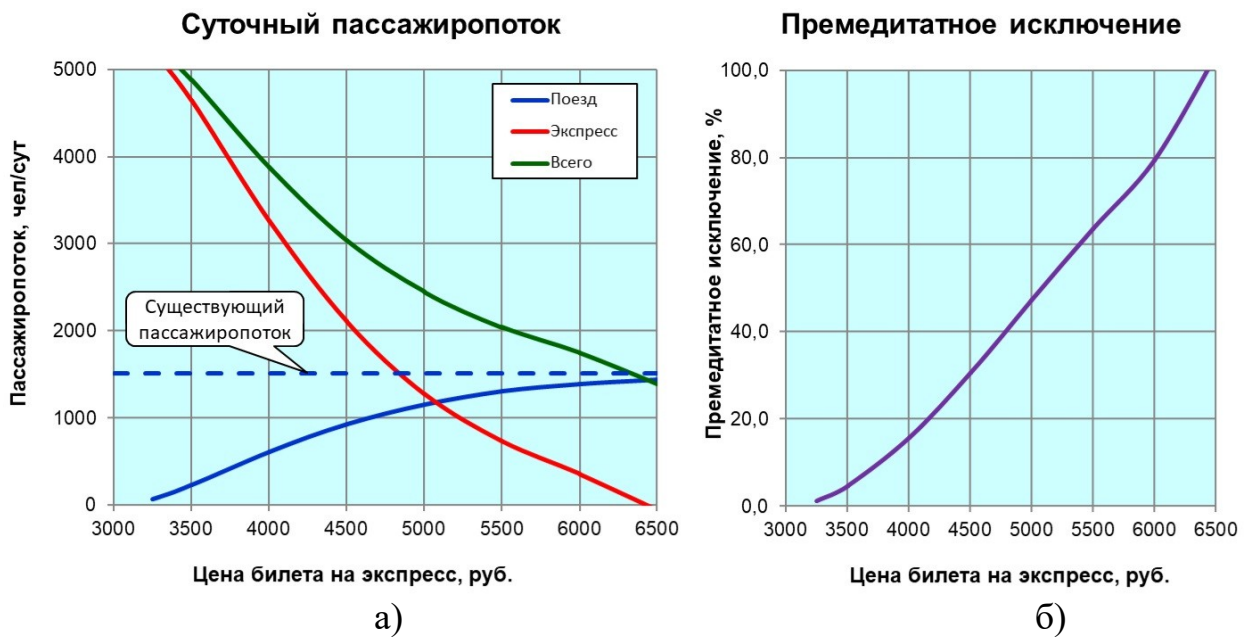


Рис. 3 – Зависимость суточного пассажиропотока (а) и премедитатного исключения пассажиров (б) на участке Омск-Новосибирск от тарифа на скоростной поезд (экспресс)

На рис. 3 а) представлены результаты генерации пассажиропотока при внедрении скоростного железнодорожного сообщения с учетом гравитационной модели. Например, в соответствии с табл. 1, скоростной поезд будут использовать 23% пассажиров от существующего пассажиропотока 1520 человек (или 356 пассажиров в сутки). Но на самом деле для всех потенциальных пассажиров с такой стоимостью времени (от 500 до 1667) появится новый эффективный способ передвижения, который они раньше не рассматривали и отказывались от передвижения (на поезде долго, а на самолете дорого). Для этой категории пассажиров время передвижения сократится в $7,6/3,6 = 2,11$ раза.

В соответствии с гравитационной моделью (формула 2), при сокращении времени передвижения в 2,11 раза, количество пассажиров увеличится в $2,11^2 = 4,46$ раза. То есть, вместо 356 пассажиров, пассажиропоток составит $4,46 \cdot 356 = 1585$ пассажиров в сутки. То есть, приток пассажиров в сутки составит $1585 - 356 = 1229$ человек, как это и следует из рис. 3 а), где общий пассажиропоток при тарифе на скоростном поезде в 5000 рублей, на 1229 человек выше существующего. На рис. 3 а) хорошо видно, что пассажиропоток очень чувствителен к уровню тарифов. Например, при увеличении тарифа на скоростной поезд с 4000 руб. до 5500 руб. суммарный пассажиропоток уменьшится в 2 раза. Что касается премедитатного исключения, которое рассчитывается как отношения пассажиропотока на обычном поезде к общему пассажиропотоку, то этот показатель при увеличении тарифа на скоростной поезд с 4000 руб. до 5500 руб., увеличится более чем в 4 раза (рис. 3 б).

Таким образом, проведенная оценка социально-экономических эффектов от введения скоростного движения представлена одним из подходов, при котором оценка стоимости времени осуществляется в виде стоимости рабочего времени

человека. То есть при оценке стоимости часа пассажира используется среднемесячный доход, деленный на среднемесячное число рабочих часов. Авторская методика показывает ориентировочный эффект от введения скоростного движения на участке Омск-Новосибирск, который дает основание считать проекты развития скоростных дорог в Сибирском регионе экономически обоснованными.

Библиографический список

1. Жаркова, Е. А. Системные аспекты развития железнодорожного транспорта на основе информационных технологий / Е. А. Жаркова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения: Гуманитарные исследования. – 2018. – № 1 (3). – С. 10–14.

2. Лапшин, В. А. Особенности моделирования пассажиропотока объектов транспортной инфраструктуры // Молодой ученый. 2020. № 291. С. 33–36.

3. Карасев, С. В. Оценка задержек поездов на железнодорожной сети методом моделирования в условиях случайного образования заявок на перевозку / С. В. Карасев, М. Е. Корягин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2 (45). – С. 43-51.

4. Аксененко, А. С. Оценка влияния расстояния до областного центра и текущего количества жителей на динамику изменения населения Новосибирской области / А. С. Аксененко, М. Е. Корягин, А. А. Прудников // Финансовый менеджмент. – 2024. – №. 3. – С. 301-310.

5. Карасев, С. В. Имитационное моделирование оценки задержек поездов на железнодорожной сети / С. В. Карасев, М. Е. Корягин // Политранспортные системы: Материалы X Международной научно-технической конференции. – 2019. – С. 163-165.

6. Бердышева, Ю. А. Оценка пассажиропотока на скоростной магистрали Омск-Новосибирск в условиях транспортной конкуренции / Ю. А. Бердышева, М. Е. Корягин // Управленческий учет. – 2023. – № 11-2. – С. 681-688.

7. Бердышева, Ю. А. Методические подходы к оценке эффектов от организации скоростного движения / Ю. А. Бердышева, М. Е. Корягин // Финансовые рынки и банки. – 2026. – № 2. – С. 206-209.

8. Бердышева, Ю. А. К вопросу оценки качества пассажирских перевозок на железной дороге / Ю.А. Бердышева, Е. А. Жаркова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения: Гуманитарные исследования. – 2020. – № 2 (8). – С. 5-9.

9. Бердышева, Ю. А. Премедитатное исключение в пассажирских железнодорожных перевозках: экономический аспект / Ю. А. Бердышева // Вопросы новой экономики. – 2023. – № 2(66). – С. 29-38.

10. Wilson, A. G. A statistical theory of spatial distribution models // Transportation research. – 1967. – Т. 1. – №. 3. – С. 253-269. – URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2492567> (дата обращения: 12.09.2020).

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617548 Российская Федерация. Программа для расчета пассажиропотока при скоростном движении «Стрела-XXI»: № 2024616257: заявл. 27.03.2024: опубл. 03.04.2024 / Ю. А. Бердышева, М. Е. Корягин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЛОЩАДОК МАЛОЙ ПЛОЩАДИ

П.С. Бурдяк, Д.А. Кузнецов

Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси
Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Россия

Аннотация: В статье рассмотрены основные аспекты, связанные с параметрами контейнерных площадок малой площади. Описаны различные факторы: их размеры, формы, оснащение и месторасположение. Приведены примеры площадок, находящихся в состоянии трансформации или имеющие потенциал трансформации в полноценные объекты, выполняющие полный набор операций с контейнерами. Для площадок малой площади предложен к рассмотрению вариант мобильного портового перегружателя, приведены параметры необходимые для функционирования площадки.

Ключевые слова: контейнерный терминал, терминал-спутник, контейнерная площадка, грузовые механизмы

DETERMINING THE PARAMETERS OF SMALL-SCALE CONTAINER SITES

P.S. Burdyak, D.A. Kuznetsov

Siberian transport university, 191 Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049,
Russia

Abstract: This article examines the key aspects related to the parameters of small container yard facilities. Various factors are described, including their size, shape, equipment, and location. Examples of yard facilities undergoing transformation or with the potential to be transformed into fully functional facilities capable of handling a full range of container operations are provided. For small yard facilities, a port handling solution is proposed, taking into account the parameters required for an open yard.

Key words: container terminal, satellite terminal, container yard, cargo handling equipment.

Преобразование крупных грузовых терминалов железнодорожных станций, портов и промышленных предприятий для организации работы с контейнерами – понятный и закономерный процесс в условиях совершенствования технологии перевозок грузов в мультимодальном и интермодальном исполнении [1]. Эта тенденция носит повсеместный характер в мире и в нашей стране, т.к. трансформация крупных действующих транспортных объектов в транспортно-логистические центры проходит быстрее, ввиду наличия необходимых факторов необходимых для функционирования транспортно-логистических комплексов. К таким факторам, в первую очередь, стоит относить:

- наличие действующей инфраструктуры авто и ж. д. транспорта;
- близость к сортировочным мощностям и инфраструктуре ж. д. транспорта;
- наличие устоявшихся грузопотоков;

– пересечение транспортных сетей нескольких видов транспорта и пр. [2, 3].

Тенденция развития транспортно-логистических комплексов в крупных транспортных узлах во всем мире стала возможна, благодаря значительной доли контейнерных перевозок – контейнеризации [4, 5].

На примере Новосибирского транспортного узла уже сформирована группа крупных пунктов взаимодействия видов транспорта в основе работы которых лежат операции с контейнерами, рисунок 1.

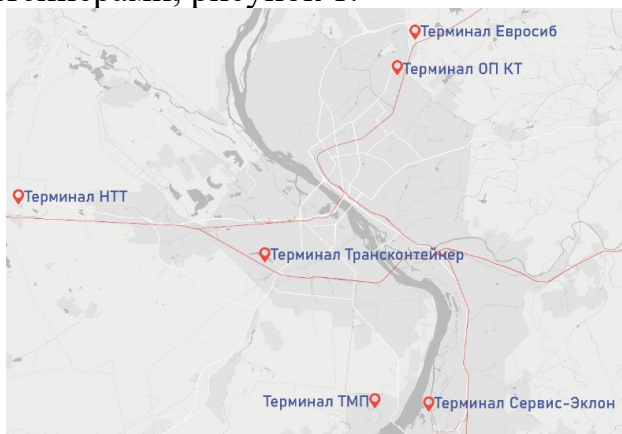


Рисунок 1 – Места расположения крупных контейнерных терминалов на территории г. Новосибирска

Помимо шести крупных, сформировавшихся терминалов (рисунок 1), фиксируется появление контейнерных терминалов-спутников [6], размещаемых вблизи главных терминалов. Основным предназначением таких терминалов является вынос части работы с крупных терминалов, исключение которой, позволяет сосредоточиться на производственных операциях с контейнерами. Технология работы такого терминала-спутника аналогична технологии «сухого порта». Он играет роль буфера на стыке железнодорожного и автомобильного транспорта. Количество таких терминалов и их основные характеристики приведены на рисунке 2.

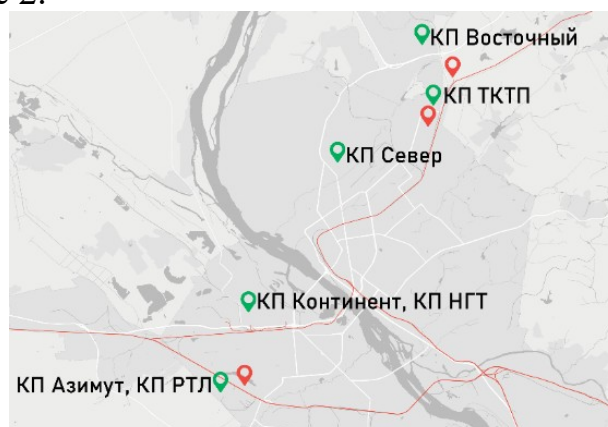


Рисунок 2 – Схема расположения терминалов-спутников

Из рисунка 2 следует, что количество терминалов спутников сопоставимо с количеством крупных терминалов. Ряд из них стремится трансформироваться в полноценный контейнерный терминал. В таблице 1 приведены терминалы с

потенциалом трансформации в полноценные объекты по объему и видам выполняемой работы.

Таблица 1 – Характеристика терминалов в г. Новосибирске с потенциалом трансформации

№	Наименование терминала	Площадь, га	Тип грузового механизма	Параметры ж. д. путей	
				Кол-во	Протяженность, м
1	НГТ	2,87	Краны на ж. д. ходу – 2 шт; кран автомобильный – 2 шт.	2	300 м
2	Континент	3,92	Кран автомобильный – 3 шт.	1+1	1000 м
3	Восточный	6,00	Ричстакеры – 2 шт, штабелер контейнерный – 1 шт.	1+1	832 м
4	Север	26,00	Кран автомобильный – 3 шт.	-	-

Процесс трансформации терминалов-спутников в полноценные комплексы по обработке контейнеропотока закономерны. Это связано с меньшей стоимостью земель, преимуществом расположения, ввиду небольших площадей, использование не дорогостоящих грузовых механизмов. Перечисленные факторы позволяют занимать свою нишу в перевозках контейнеров.

К схожим условиям, позволяющим предположить возможную трансформацию и дальнейшее эффективное использование объектов относятся многочисленные площадки небольших ж. д. предприятий. В качестве примера, можно привести подъездные пути с уже имеющимися необходимыми для контейнерной технологии устройствами [7]:

- бетонные или асфальто-бетонные площадки (строительные площадки, растворобетонные узлы, территории бывших производственных площадок и т.д.);
- грузовые механизмы (строительные козловые краны, достаточной грузоподъемности, мостовые краны, автопоезды для работы стреловых кранов);
- автомобильные дороги и железнодорожные пути.

Наличие таких устройств позволяет сократить значительное количество средств и времени, необходимых на трансформацию, а сама трансформация позволяет получить преимущества, связанные с доступностью объекта, наличия смежных объектов для взаимодействия и потенциала совершенствования работы для полноценного включения объекта в работу транспортной сети региона.

Необходимость близости объекта к центру транспортного узла, а также к крупным контейнерным терминалам, вызвана сокращением внутриузловых пересечений и подразумевает трудности с поиском необходимого по площади и форме участка для проектирования.

Например, участки занимаемые площадками НГТ и Континент (см. табл. 1), не смогут полноценно развиваться в полноценные комплексы переработки контейнеропотока, ввиду ограниченности длины площадки, наличия поблизости сооружений, занятие которых связано с высокой стоимостью, а также удаленности от транспортной сети ж. д. транспорта, рисунки 3, 4 [8].

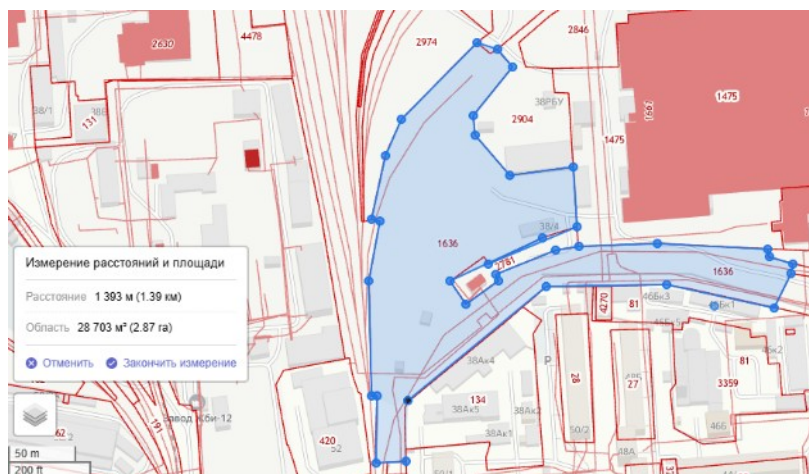


Рисунок 3 – Схема площадки НГТ

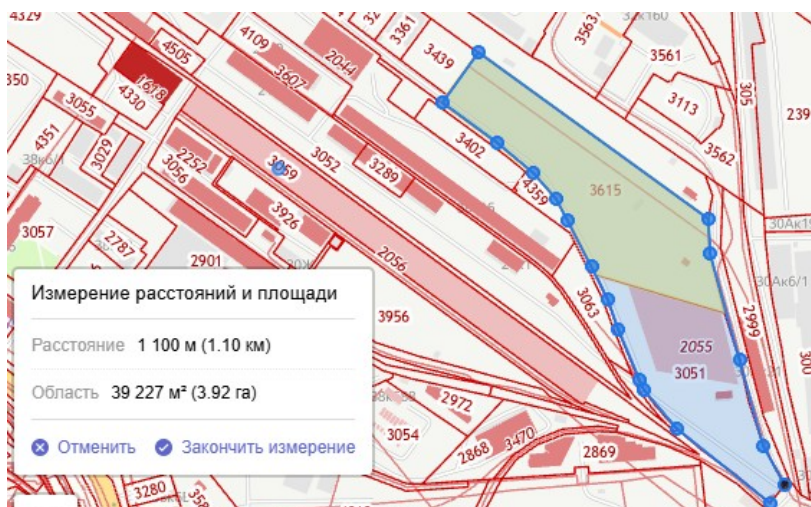


Рисунок 4 – Схема площадки Континент

Участок, занимаемый площадкой Север (см. рисунок 5) обладает большей площадью в сравнении с площадками НГТ и Континент, однако возможность развития маловероятна в связи со сложностями подключения к транспортной сети ж. д. транспорта и расположения поблизости устройств, имеющих сложные коммуникации и связи с другими устройствами.

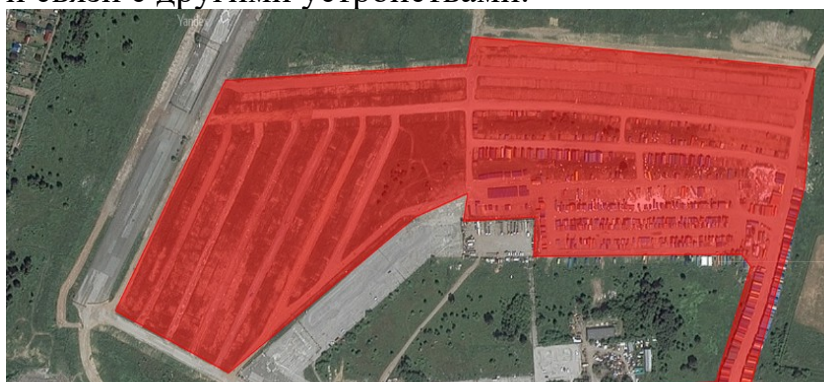
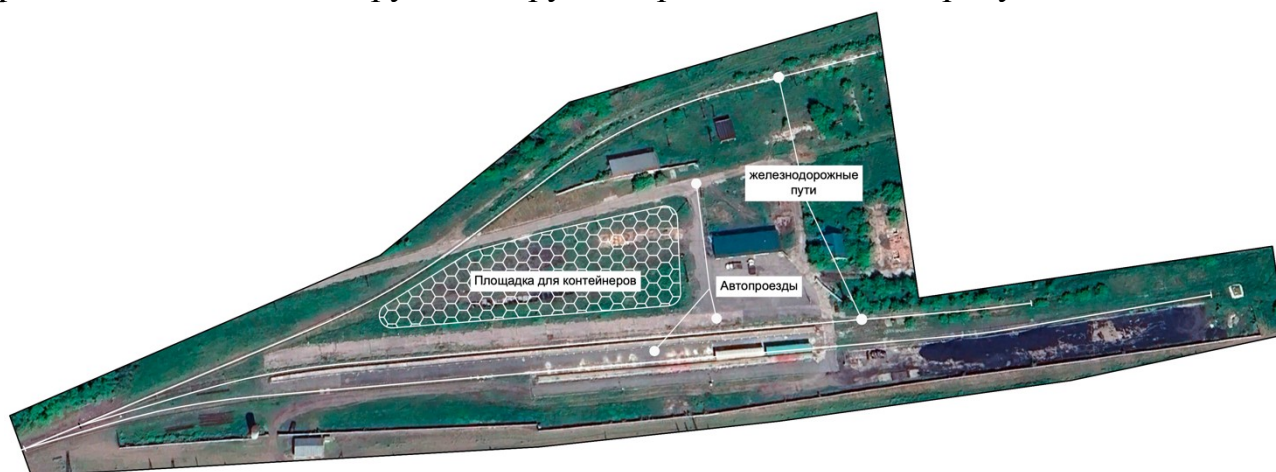


Рисунок 5 – Схема расположения площадки Север

В ходе анализа форм и размеров участков с потенциалом трансформации в полноценный контейнерный терминал, а также определения возможности такой

трансформации и определения ее параметров, выбрана для изучения площадка расположения мест погрузки выгрузки, представленная на рисунке 6.



P

Рисунок 6 – Основные элементы площадки в районе расположения станции Мочище

Для данной площадки характерно наличие:

- асфальтно-бетонного покрытия на части площадки;
- близости автомобильных дорог, а также дорожных одежд на территории предприятия;
- железнодорожных путей (два погрузочно-выгрузочных и одного второстепенного назначения).

При наличии основных элементов и устройств (см. рисунок 6), необходимых для трансформации объекта в полноценную контейнерную площадку, на территории предприятия отсутствуют какие-либо средства механизации.

Для организации работы, широко распространенных на контейнерных терминалах козловых контейнерных кранов и ричстакеров, на выбранной площадке недостаточно места для размещения крановых путей и площадок для проезда автокрановой техники. При размещении козлового крана требуется участок земли для укладки крановых путей с шириной между ними 24, 32 или 42 м (по основным типам кранов), рисунок 7: (в, г), а для ввода в работу ричстакера, необходимо организовать площадку с проездами шириной около 15 м по периметру площадки и внутри нее [7, 9, 10], рисунок 7: (а, б).

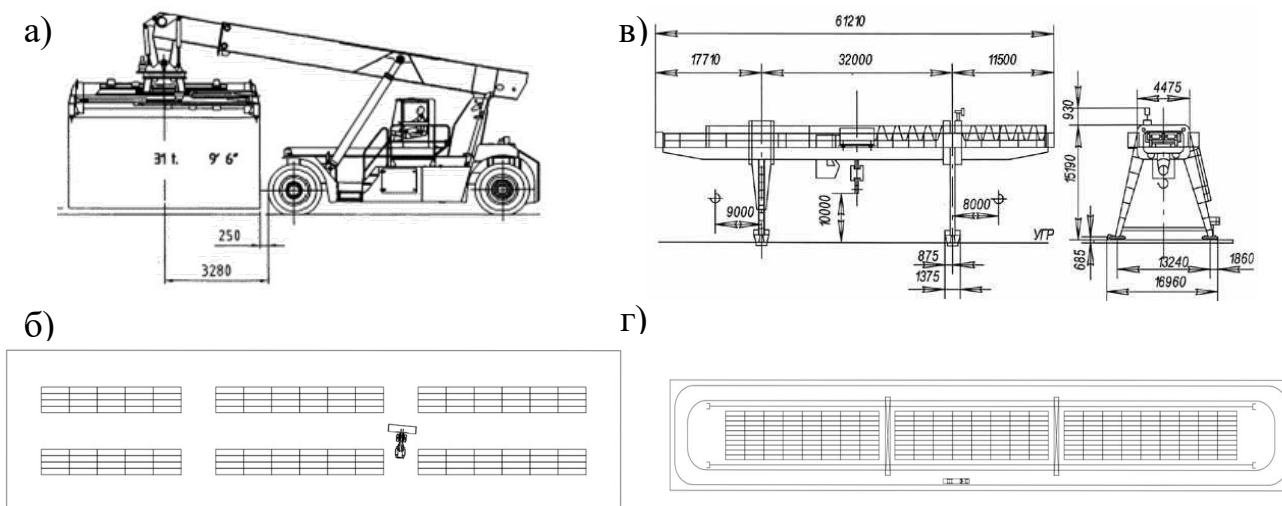


Рисунок 7 – Варианты погрузочно-разгрузочного оборудования и планировки контейнерной площадки

Ввиду ограничений линейных размеров площадки и ее территории выполнен поиск наиболее подходящей техники, возможной к использованию на терминалах с ограниченной площадью для размещения необходимого набора элементов и устройств.

В статье рассмотрен вариант использования портового перегружателя компании Meclift [11], приведенного на рисунке 8.



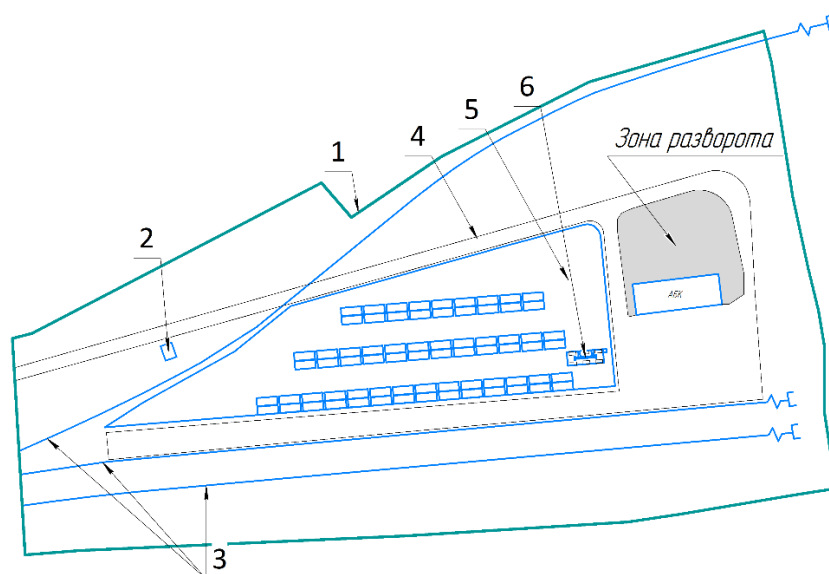
Рисунок 8 – Боковой портовый перегружатель ML 5016 SR

Параметры портового перегружателя приведены в таблице 2 [11].

Таблица 2 – Параметры Meclift ML 5016 SR

Параметры	Данные о параметрах
Страна производитель	Финляндия
Грузоподъемность (под спредером), т	42,5
Высота подъема, мм	7690
Высота штабелирования, ярус	2 – 4
Длина, мм	11 700
Ширина, мм	4 000
Высота, мм	4 500
Дорожный просвет, мм	220
Масса в снаряженном состоянии, т	64
Радиус поворота, м	7,55
Максимальная скорость движения с грузом, км/ч	30
Тип двигателя	ДВС

Для определения параметров контейнерной площадки использованы данные приведенные в таблице 2, а также разработана схема компоновки для устройств терминала [7, 9, 10], рисунок 9.



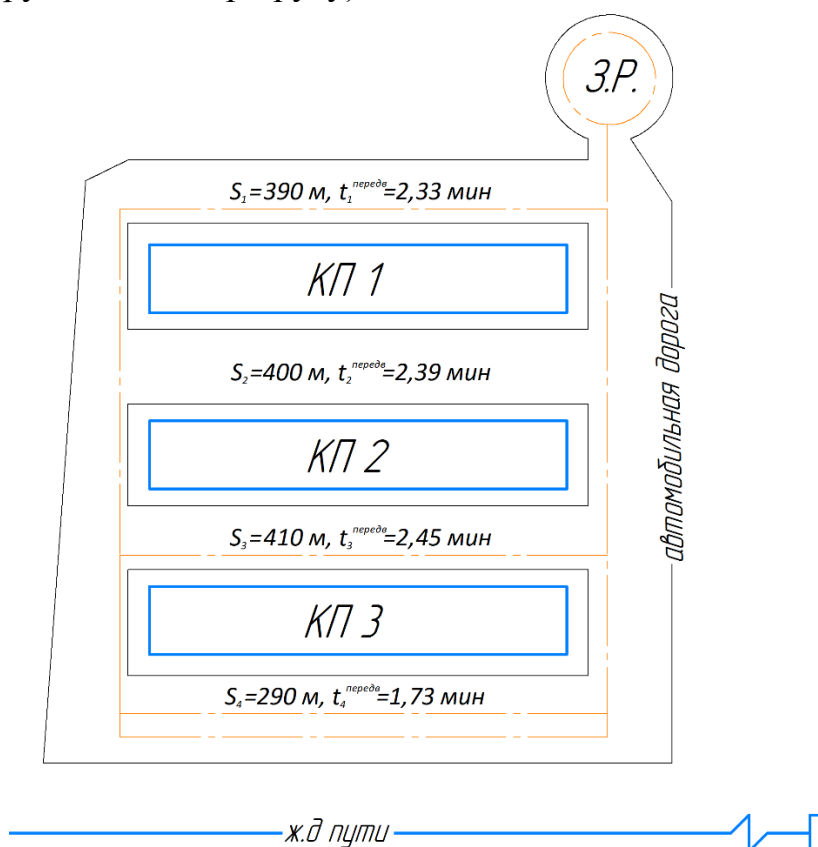
1 - ограждение КП; 2 - помещение КПП; 3 - ж.д. пути; 4 - автодорога; 5 - склад контейнеров; 6 - погрузочно-разгрузочный механизм

Рисунок 9 – Схема компоновки контейнерной площадки

При расположении контейнеров на терминале с хранением высотой два яруса, емкость контейнерной площадки составит около 140 ДФЭ. При таком расположении контейнеров возможно реализовать технологию работы с возможностью двухстороннего подъезда к складу контейнеров. В первом случае движение перегружателя будет направлено по часовой стрелке, во втором – против. Такая сторонность вызвана тем, что рабочая зона портового перегружателя Meclift расположена с правой стороны по ходу движения. Поэтому потребуется предусмотреть на схеме площадки разворотные кольца для возможности смены рабочей стороны портового перегружателя.

На рисунке 10 приведены схемы следования погрузчика и на их основе определено среднее время следования погрузчика при движении от ж. д. пути до

склада контейнеров и обратно (рис.10, где S_i – длина маршрута, t_i – время следования погрузчика по маршруту).



З.Р. – зона разворота ПРМ
КП – контейнерная площадка

Рисунок 10 – Схемы следования погрузчика







Среднее время передвижения погрузчика по всем маршрутам, при средней длине маршрута (372,5 м) и средней скорости движения (2,78 м/с) составила:

$$t_{\text{ср. передвижения}} = \frac{S_{\text{ср}}}{V_{\text{ср}}} = \frac{372,5}{2,78} = 140 \text{ секунд} = 2,33 \text{ минут.}$$

Для определения перерабатывающей способности на контейнерной площадке малой площади определены параметры работы погрузчика для формирования $T_{\text{цикл}}$ – длительности цикла от погрузки до следующей погрузки в таблице 3 определены основные операции при работе погрузчика.

Таблица 3 – Продолжительность основных операций при работе погрузчика

1. Подготовительные операции – 0,12 мин	2. Захват контейнера – 0,75 мин
---	---------------------------------

	
3. Постановка контейнера «на себя» – 0,65 мин	4. Подготовительные операции – 0,12 мин
	
5. Передвижение погрузчика – 1,16 мин	6. Снятие контейнера на площадку – 0,65 мин
	
7. Приведение в транспортное положение – 0,5 мин	8. Передвижение погрузчика – 1,2 мин
9. Подготовительные операции 0,12 мин	10. Захват контейнера – 0,75 мин
Итого T_u	5,98 мин

Производительность ПРМ определена по формуле [12], ДФЭ/ч:

$$P_{\text{мех}} = \frac{60}{T_u}, \quad (1)$$

$$P_{\text{мех}} = \frac{60}{5,98} = 10,03.$$

Производительность перегрузочной машины с учетом внутрисменных технологических перерывов ($k_{\text{вр}}=0,7$) составит:

$$P_{\text{эксп}} = P_{\text{мех}} \cdot k_{\text{вр}} = 10,03 \cdot 0,7 = 7,021 \text{ ДФЭ/ч}.$$

Суточная перерабатывающая способность определена по формуле ниже и сведена в таблицу 4:

$$G_{\text{сут}} = M \cdot (P_{\text{эксп}} \cdot T_c), \quad (2)$$

где M – количество ПРМ, шт;

T_c – время работы ПРМ на погрузке-выгрузке в течение суток (принято равным $T_c=22$ ч).

В таблице 4 сведены расчеты перерабатывающей способности для одной подачи вагонов в сутки в составе 11 вагонов 60-футовых фитинговых платформ, исходя из длины ж.д. пути, и использования одного ПРМ.

Таблица 4 – Перерабатывающая способность площадки

Показатель	Значение
$P_{\text{эксп}}$, ДФЭ/час	7,021
Продолжительность работы в сутки, часов	22
Количество ярусов хранения	2
Коэффициент переработки контейнеров, учитывающий перестановку контейнеров на площадке	2
Сменная перерабатывающая способность, ДФЭ/сут	77,23
Суточная перерабатывающая способность, ДФЭ/сут	154,46

Расчеты сведенные в таблицу 4 показывают, что не смотря на малую емкость площадки, не большую территорию и неправильную форму земельного участка, при наличии мобильной техники и использования имеющегося набора инфраструктуры возможно обеспечить переработку около 154 ДФЭ в сутки, что в годовом исчислении составит 56 тыс. ДФЭ в год. Преимущества площадок малой площади в виде их близости к центру транспортного узла и к крупным контейнерным терминалам позволяет сделать вывод о возможности занятия ими своего места в формировании единой транспортной системы страны в виде: терминалы-спутники – контейнерные площадки малой площади – крупные контейнерные терминалы.

Библиографический список

1. Панасенко, Н. Н. Контейнеризация международной транспортной системы / Н. Н. Панасенко, П. В. Яковлев. — Текст : непосредственный // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 4.
2. Скарга, П. Д. Развитие транспортно-логистических центров в Российской Федерации: анализ, тенденции и перспективы / П. Д. Скарга. — Текст : непосредственный // Вестник науки. — 2025. — № 6 (87).
3. Солодкий, А. И. Транспортная инфраструктура : учебник и практикум для вузов : для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям / А. И. Солодкий, А. Э. Горев, Э. Д. Бондарева. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Юрайт, 2023. — 326 с. — Текст : непосредственный.
4. Франк, С. О. Повышение эффективности контейнерной транспортной системы страны на основе развития терминальных комплексов : специальность 05.22.01 : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук / Франк Сергей Оттович ; Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (техн. ун-т). — М., 2006. — 22 с. — Текст : непосредственный.
5. Залукаева, Н. Ю. Мультимодальные перевозки / Н. Ю. Залукаева. — Текст : электронный // tstu.ru : [сайт]. — URL: <https://tstu.ru/book/elib1/pdf/2025/zalukaeva.pdf> (дата обращения: 22.05.2026).
6. Гурских, В. С. Анализ размещения контейнерных терминалов в Г. Новосибирск / В. С. Гурских, П. С. Бурдяк. — Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. — 2023. — № 4(11). — С. 5-11.

7. СП 262.1325800.2016 Контейнерные площадки и терминальные устройства на предприятиях промышленности и транспорта.

8. Публичная кадастровая карта: г. Новосибирск (Новосибирская область) — Текст : электронный // roscadaster.com : [сайт]. — URL: <https://roscadaster.com/map/novosibirskaya-oblast/novosibirsk> (дата обращения: 21.04.2026).

9. СП 316.1325800.2017 «Терминалы контейнерные»

10. Бурдяк, П. С. Схема размещения и параметры контейнерной площадки тылового терминала для приема автотранспорта / П. С. Бурдяк. — Текст : непосредственный // Транспорт и логистика: Технологии устойчивого развития : Материалы VIII Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–02 февраля 2024 года. — Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2024. — С. 47-50.

11. Meclift ML5016SR Container Mover. — Текст : электронный // meclift.de : [сайт]. — URL: https://www.meclift.de/index.asp?b_id=&k_id=21433&subk_id=21439&module_bauart=Voll%20Containerstapler&module_id=1400 (дата обращения: 20.05.2026).

12. Иванова В. И., Маликов О. Б. Оптимизированный расчёт производительности перегрузочной машины при обработке контейнеров на терминале. — Текст : электронный // CyberLeninka : [сайт]. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizirovannyy-raschyot-proizvoditelnosti-peregruzochnoy-mashiny-pri-obrabotke-konteynerov-na-terminale> (дата обращения: 24.05.2026).

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО УЧАСТКА РЕЛЬСА С ПОМОЩЬЮ ТЕНЗОМЕТРИИ

А. А. Игумнов¹, Т. В. Игумнова¹

1. Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Россия

Аннотация: В работе проанализировано деформированное состояние участка рельса под статической нагрузкой, а также обсуждается возможность калибровки установки для циклических испытаний на изгиб крупногабаритных объектов. Проведена верификация созданной модели на изгиб под статической нагрузкой до 150 кН.

Ключевые слова: статическая и динамическая сила, относительная деформация, восстановление сил в системе «колесо-рельс», верификация, тензометрия.

DEVELOPMENT OF A CALIBRATION METHOD FOR A CYCLIC TESTING SETUP USING STRAIN GAUGES

A. A. Igumnov¹, T. V. Igumnova¹

1. Siberian transport university, 191 Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049, Russia

Abstract: The paper analyzes the deformed state of a rail section under static load, and discusses the possibility of calibrating a setup for cyclic bending tests of large-sized objects. The created model for bending under static load has been verified. A model rail section with glued-on strain-gauge sensors has been used for the verification of cyclic tests using a standardized method.

Key words: static and dynamic force, relative deformation, restoration of forces in the wheel-rail system, verification, and strain measurement.

В Российской Федерации действует стандарт на нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний [1]. В соответствии с этим документом оценка нагрузок в системе колеса и рельса проводится методами тензометрии. Первичным сигналом служат значения относительных деформаций на участках (точках) рельса. Регистрация производится с помощью тензорезисторов, соединенных в тензосхемы или тензометрические мосты. Главной сложностью, как правило, служит обработка и анализ полученных сигналов [2-4]. Чтобы регистрировать процессы в системе колеса и рельса нужны системы обработки сигналов с определенной частотой дискретизации для проведения динамических измерений от 1 до 3 кГц [5]. Необходимость измерения динамических деформаций на действующем пути, расположение тензометрических преобразователей на различных участках рельса, различие в обработке результатов статических и динамических измерений, диктует необходимость калибровки тензодатчиков не только статическими, но и динамическими нагрузками на калибровочном испытательном участке [6, 7].

1 Постановка задачи

Актуальным остается вопрос статических и динамических измерений относительных деформаций. В работе исследовано напряженно-деформированное состояние участка (части) рельса длиной 1 м.

На рис. 1 представлен общий вид модели рельса или участка рельса. Нагрузка в системе колеса и рельса имеет определенную направленность, это вектор, направление в пространстве которого неизвестно. В общем случае нагрузку можно разделить на нормальную и тангенциальную составляющую, соответственно F_z, F_y .

От выбора достоверных способов обработки информации и восстановления действующих нагрузок будет зависеть точность оценки F_z, F_y и, соответственно, их результирующей. При обработке данных тензометрических испытаний при наличии большого количества факторов, влияющих на результаты испытаний, могут быть разные погрешности [5, 8-10].

В стандартизированном методе применяется тензометрическая схема из шести датчиков, установленных на шейке рельса в точках от $L1$ до $L6$. Показания датчиков $L5$ до $L6$ (как правило, их полусумма), помогает судить о нормальной составляющей нагрузки. Косвенный пересчет показаний датчиков $L1, L2, L3, L4$ позволяет судить о значении тангенциальной составляющей силы.

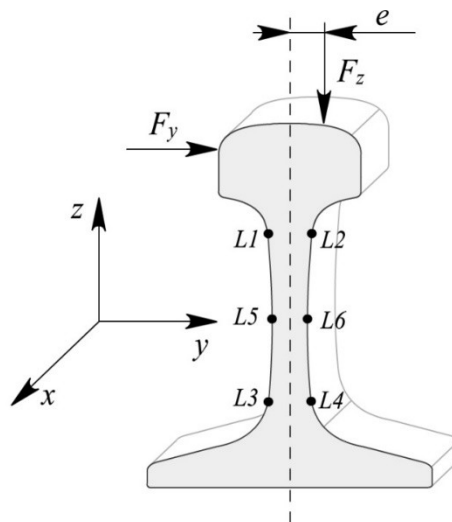


Рис. 1 Общий вид модели рельса

F_z, F_y – приложенные нагрузки, $L1-L6$ - точки установки тензорезисторов

Натурный эксперимент включал создание калибровочного участка рельса длиной 1 м с наклеенными тензодатчиками по разработанной авторами методике, включая стандартную установку по [1], а также установку датчика на головке рельса вдоль оси рельса для регистрации тангенциальной составляющей нагрузки. Тензорезисторы $S1, S2, S3, S4, S5, S6$ на подошве и были установлены на шейке согласно метода Шлюмпфа. Для калибровки установки циклических испытаний и испытательного рельса два

тензорезистора также были установлены на подошву рельса (*S7*, *S8*). Тензорезистор *S9* был установлен на головке вдоль оси *x*. Калибровочный участок рельса устанавливался на испытательную машину, реализующую статическое и циклическое нагружение. Рельс устанавливался на жесткие металлические опоры на базе 600 мм, испытания проводили по схеме трехточечного изгиба.



Рис. 2 – Испытательный рельс с наклеенными тензорезисторами в срединном пролете между шпалами, также на подошве и головке

Согласно данным численного моделирования в предыдущих исследованиях, относительные деформации вдоль оси рельса ε_x от вертикального изгиба, и, соответственно, возникающие продольные напряжения σ_x в подошве рельса соизмеримы по величине с вертикальными деформациями ε_z в шейке рельса [11].

Получены результаты натурных испытаний калибровочного участка рельса при статической нагрузке до 150 кН. Нагружение испытательного участка рельса производилось на испытательной машине ГРМ-1 на базе НИЛ Прочности СГУПС. Регистрация электрических сигналов с тензорезисторов проводилась посредством тензометрической многоканальной системы Динамика-3. На начальном этапе испытаний и калибровке участка и установки было подключено 4 канала.

Данные тензометрических измерений с тензорезистора, расположенного на кромке подошвы рельса в точке *S7*, представлены на рис.3. По вертикальной оси приведены относительные деформации в относительных единицах $\cdot 10^{-6}$ (млн⁻¹), по горизонтальной оси – время в секундах. Время испытаний составило более 30 минут. Рельс нагружали до требуемой нагрузки и выдерживали (нагружение ступеньками). Первая ступень была соответственно 50 кН (обозначено цифрой 1 на рис.3), цифрой 2 обозначено

выдержка на ступеньке 100 кН (см. рис.3), цифрой 3 обозначено выдержка на ступеньке 150 кН (см. рис.3).

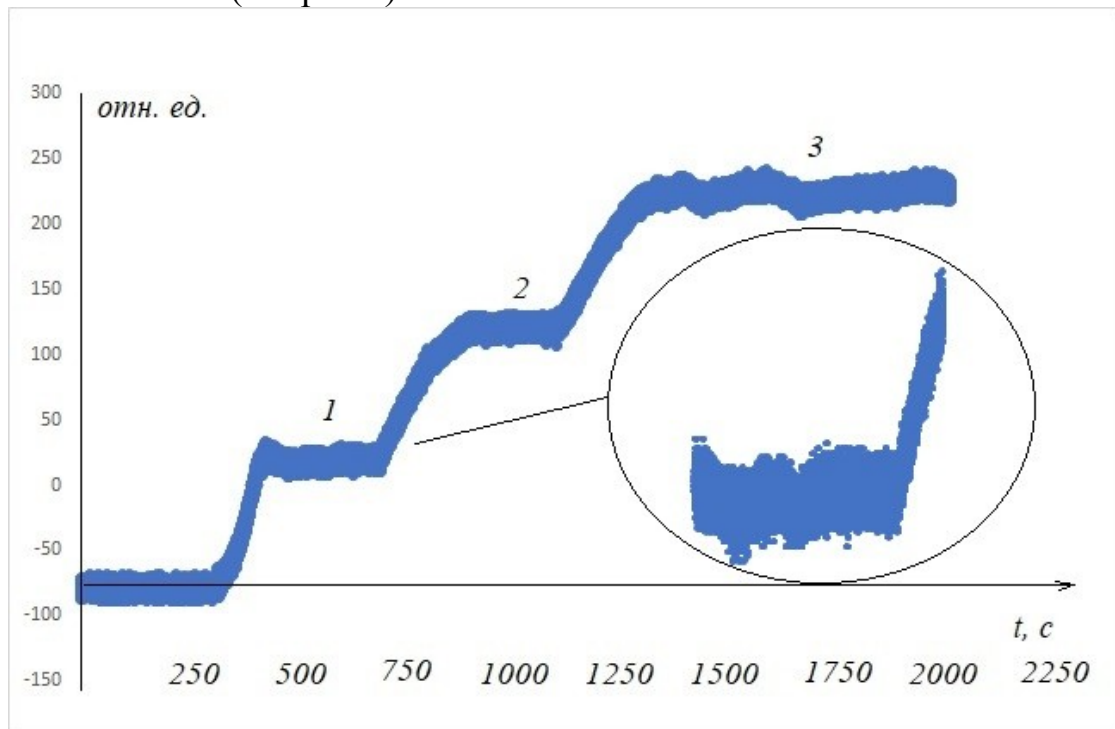


Рис.3 Изменение растягивающих относительных деформаций ϵ_x в подошве рельса (линия О1 и К1 по [1])

На рис.3 в увеличенном окне показан участок ступеньки при статической нагрузке 50 кН. Видно, что тензометрические показания имеют разброс, а для того, чтобы проводить анализ, нужно усреднять значения при постоянной нагрузке. В таблице 1 в столбце 2 приведены значения среднеквадратического отклонения показания тензорезистора S7 на плоском участке каждой ступеньки, при этом значение СКО не существенно. Предложено рассчитывать параметр k – приращение показаний тензочанала в относительных единицах к величине ступеньки в Ньютонах. В столбце 3 показано рассчитанное значение k , этот параметр является коэффициентом преобразования по данному каналу.

Таблица 1 – Данные по верификации и калибровки испытательного участка

Нагрузка, кН	Полученные данные		
	СКО, отн. Ед.	Приращение на величину нагрузки, отн.ед.	k , отн. ед./Н
1	2	3	4
50	3,02	97,28	0,00195
100	2,91	199,06	0,00199
150	3,00	301,57	0,00201

Среднее значение коэффициента преобразования k на трех ступеньках составляет 0,00198, разброс составляет не более 3 %. Аналогичные

количественные параметры получены по каналам, расположенным на шейке и головке рельса.

Следующим этапом стали циклические испытания, на рис. 4 показан отклик каждого тензочанала на циклическое нагружение. Размах на седьмом канале $S7$ составляет 75 млн^{-1} . При этом амплитуда нагрузки составляла 40 кН . Эти данные хорошо согласуются с данными, полученными при статических испытаниях, коэффициент преобразования по каналу k составляет $0,001875$.

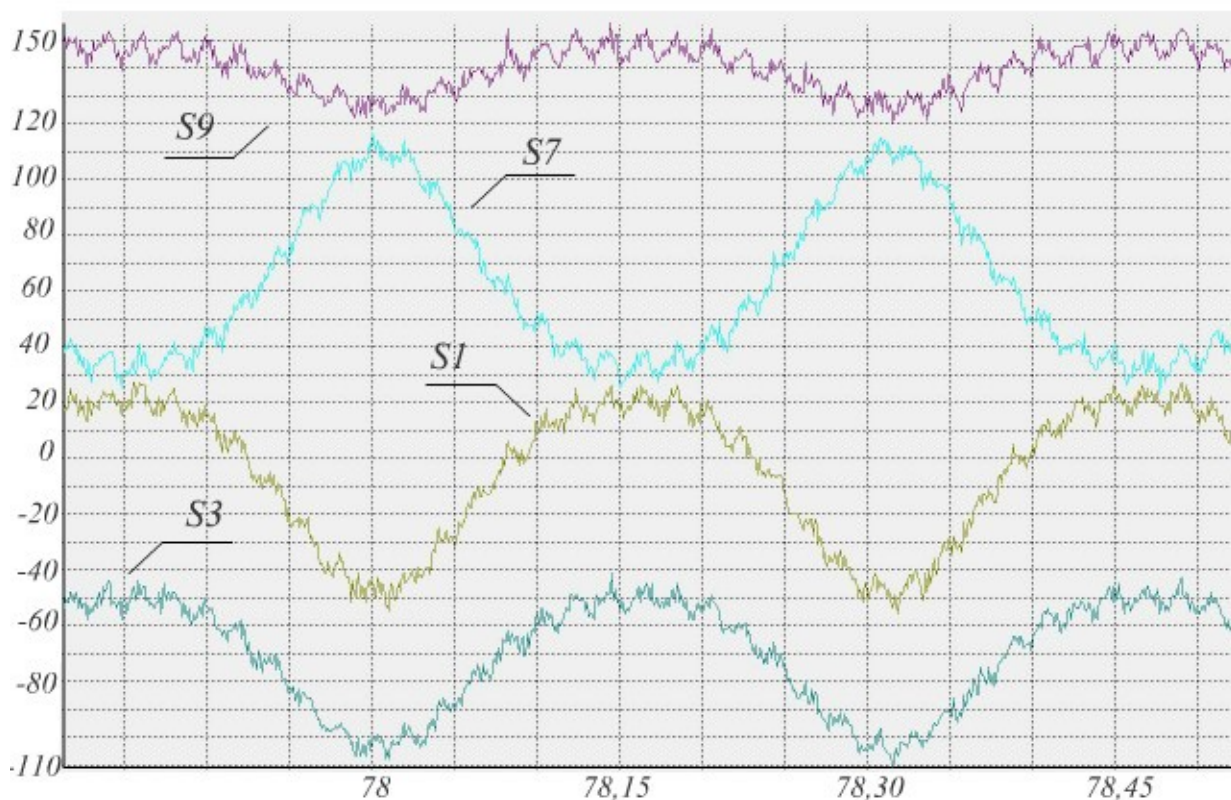


Рис. 4 – Отклик датчиков на циклическое воздействие амплитудой 100 кН

Выводы. Создан испытательный участок рельса длиной 1 м с измерительным сечением, включающим девять датчиков. Проведена верификация созданной модели при статических испытаниях. Установлен калибровочный коэффициент для наиболее чувствительного канала при статических и циклических испытаниях.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования измерительного сечения для обеспечения циклических испытаний, а также использования результатов натурных испытаний для решения задач восстановления нагрузок в системе колеса и рельса.

Библиографический список

1. ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. –

Введ. 2022-02-01. М.: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации., М. Изд-во стандартов, 2021. 32 с.

2. Разработка средств мониторинга динамических процессов взаимодействия колес и рельсов в эксплуатации / С. А. Бехер, Т. В. Сыч, А. О. Коломеец, А. С. Кочетков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 3(46). с. 33-42.

3. Маломыжев Д.О. Анализ методов определения напряженно-деформированного состояния и усталостной прочности подвижного состава / Маломыжев Д.О., Пыхалов А.А. // Молодая наука Сибири. 2022. № 2 (16). с. 12-19.

4. Бороненко, Ю.П. Разработка новых методов измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары при движении вагона / Ю.П. Бороненко, Р.В. Рахимов, А.В. Белянкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2020. Т. 17. № 1. с. 7-22.

5. Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Бехер С.А., Никитенко М.С. Микропроцессорные многоканальные системы для динамических испытаний конструкций // Датчики и системы. 2011. №8. с. 29-34.

6. Близнецов А.С. Прогнозирование усталостной прочности стальных конструкций при многократных переменных нагрузках / Близнецов А.С., Ли М.В., Пивкин М.Ю., Пучкин Д.К. // Журнал технических исследований. 2025. Т. 11. № 1. С. 55-61.

7. Кошкаров, Р.В. Анализ чрезвычайных ситуаций на объектах железнодорожного транспорта / Р.В. Кошкаров, Л.А. Королева // XXI век. Техносферная безопасность. 2020. Т. 5, № 4(20). с. 374-383.

8. Применение метода теневого муара для исследования рельефа пластин / Попов А.М., Зиновьев В.Б., Герасимов С.И., Тихомиров В.М. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 97-103.

9. Прогнозирование глубины забивки нагеля крестообразного сечения огнестрельным методом / Попов А.М., Шведов В.Н., Зиновьев В.Б., Герасимов С.И. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 79-86.

10. Экспериментальное изучение изгиба густо перфорированной пластины/ Попов А.М., Зиновьев В.Б., Герасимов С.И., Сподарева Л.А. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2 (57). С. 99-105.

11. Игумнов А.А. Разработка способов измерения динамических сил в системе «Колесо-Рельс» с использованием модельного эксперимента и тензометрии / Игумнов А.А., Игумнова Т.В. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). с. 78-88.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ: АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Т.С. Овчинникова¹, Ш.Н. Валиев¹

1. Тюменский индустриальный университет, Базовая кафедра АО
«Мостострой-11», г. Тюмень, ул. Луначарского, 2.

Аннотация: В статье рассматриваются теоретические основы и практические аспекты оценки надёжности мостовых сооружений. Проанализированы эволюция методов расчёта, от метода допускаемых напряжений к методу предельных состояний, а также вероятностные подходы к оценке запасов прочности. Особое внимание уделено вопросам долговечности, коррозионного и усталостного износа, а также живучести конструкций. Выявлены ключевые проблемы современных методов диагностики и прогнозирования остаточного ресурса. Обоснованы направления дальнейших исследований, направленных на повышение точности прогнозных моделей и разработку комплексных систем мониторинга состояния мостов.

Ключевые слова: надёжность мостов, предельные состояния, долговечность, коррозионный износ, усталость, живучесть, остаточный ресурс, вероятностные методы.

MODERN APPROACHES TO ASSESSING AND ENSURING THE RELIABILITY OF BRIDGE STRUCTURES: ANALYSIS OF PROBLEMS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

T.S. Ovchinnikova¹, S.N. Valiev¹

1. Tyumen Industrial University, Basic Department of JSC "Mostostroy-11",
Tyumen, Lunacharsky St., 2.

Abstract: The article discusses the theoretical foundations and practical aspects of assessing the reliability of bridge structures. The evolution of calculation methods is analyzed, from the method of allowable stresses to the method of limiting states, as well as probabilistic approaches to estimating safety reserves. Special attention is paid to the issues of durability, corrosion and fatigue wear, as well as structural survivability. The key problems of modern diagnostic methods and forecasting of residual resource have been identified. The directions of further research aimed at improving the accuracy of predictive models and the development of integrated systems for monitoring the condition of bridges are substantiated.

Keywords: bridge reliability, limiting conditions, durability, corrosion wear, fatigue, survivability, residual resource, probabilistic methods.

Введение

В условиях стремительного развития технологий и увеличения транспортной нагрузки на инфраструктурные объекты, вопросы обеспечения надёжности мостовых сооружений приобретают первостепенное значение, поскольку мосты являются критической инфраструктурой, обеспечивающей безопасность и бесперебойность транспортных потоков. Надёжность мостовых сооружений представляет собой комплексное свойство, определяющее их способность выполнять заданные функции в течение установленного срока службы при заданных условиях эксплуатации, и включает в себя целый ряд факторов, таких как

прочность материалов, устойчивость конструкций, долговечность и безопасность эксплуатации [1]. Современная теория надёжности мостов сформировалась на стыке теории вероятностей, строительной механики и материаловедения, пройдя путь от эмпирических коэффициентов запаса до сложных вероятностных моделей. В данной работе рассматриваются современные подходы к оценке и повышению надёжности мостовых сооружений, анализируются ключевые проблемы, с которыми сталкиваются специалисты в этой области, а также обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

1. Эволюция методов расчёта и оценки надёжности

Исторически проектирование мостов базировалось на методе допускаемых напряжений, при котором запас прочности закладывался в пониженные нормы сопротивления материалов. Этот метод, господствовавший до середины XX века, не учитывал вероятностную природу нагрузок и прочности материалов, что часто приводило либо к перерасходу материалов, либо к недостаточной безопасности.

Переломным моментом стала разработка метода расчёта по предельным состояниям, основоположником которого является Н.С. Стрелецкий [2]. Суть метода заключается в раздельном нормировании нагрузок и сопротивлений материалов путём введения коэффициентов надёжности (γ_i к нагрузкам и γ_m к материалам), что позволило более адекватно учитывать случайный характер воздействий и разброс свойств материалов. Данный подход, принятый сейчас практически во всём мире, позволяет дифференцированно рассматривать два типа предельных состояний: первую группу (полная потеря несущей способности) и вторую группу (затруднение нормальной эксплуатации) [3].

Параллельно развивались вероятностные методы оценки надёжности. Н.С. Стрелецкий предложил оценку, основанную на наложении кривых распределения воздействий (S) и несущей способности (F), введя понятие «гарантии неразрушимости». А.Р. Ржаницын разработал удобный аппарат оценки запаса прочности через характеристику безопасности (φ), представляющую собой отношение среднего запаса прочности к его стандарту [4]. Эти подходы заложили основу для количественной вероятностной оценки риска отказа.

2. Ключевые факторы, снижающие надёжность и долговечность

Долговечность мостовой конструкции – свойство сохранять работоспособность в течение заданного времени с требуемой надёжностью [3]. На практике на долговечность негативно влияют три основных деградационных процесса:

1. *Коррозионный износ.* Для стальных и железобетонных конструкций это ведущий фактор старения. Скорость коррозии (V) является случайной величиной и зависит от ряда параметров: влажности, агрессивности среды, а для железобетона – ещё и от класса бетона и его водонепроницаемости. Коррозия арматуры приводит к снижению несущей способности основных несущих элементов конструкций.

2. *Усталостные повреждения.* Обусловлены многократным циклическим нагружением от подвижного транспорта. Оценка производится на основе кривой

усталости (Вёллера) и теории линейного суммирования повреждений (Палмгрена-Майнера). Мера усталостного повреждения (D) накапливается с течением времени и зависит от спектра нагрузок и числа циклов нагружения.

3. *Ослабление натяжения высокопрочной арматуры* в сборных конструкциях с поперечными «сухими» стыками. Потеря предварительного напряжения снижает обжатие стыков и их сопротивление сдвигу, что было причиной серьёзных повреждений ряда советских мостов 60-80-х гг. постройки [1]. Для оценки остаточного усилия применяются частотный метод и метод «разгрузки».

3. Современные подходы к оценке остаточного ресурса

Оценка остаточного ресурса грузоподъёмности и долговечности – наиболее востребованная задача при обследовании эксплуатируемых мостов. Можно выделить два основных подхода:

➤ *Детерминистический (эмпирический) подход.* Примером является методика ФАУ «РОСДОРНИИ» (разработанная под руководством д.т.н. Шестерикова В.И.) [5], описывающая физический износ $U(t)$ экспоненциальной функцией от времени с параметром λ (интенсивность износа) и периода приработки T_0 . Критический износ $U_{кр}$ задаётся нормативно, что позволяет рассчитать прогнозный срок службы. Недостаток метода – слабая физическая обоснованность и усреднение влияния различных повреждений.

➤ *Вероятностный подход.* Более строгий метод, рассматривающий запас прочности как случайную величину. Критерием исчерпания ресурса считается момент, когда фактическая грузоподъёмность $K_{факт(t)}$, снижающаяся из-за износа, сравнивается с требуемой $K_{треб(t)}$, растущей из-за увеличения эксплуатационных нагрузок, при заданном уровне обеспеченности γ_i . Этот подход требует знания закона распределения и параметров нагрузок и прочности, а также модели деградации.

Важным инструментом для оценки остаточного ресурса стали пространственные расчёты и метод конечных элементов (МКЭ), которые позволяют более точно моделировать работу конструкции, учитывать реальное распределение нагрузок и наличие повреждений. Использование МКЭ в сочетании с вероятностными методами (например, метод Монте-Карло) открывает возможности для создания цифровых двойников мостов и прогнозирования их поведения.

4. Проблемы и недостатки существующих подходов

Одной из ключевых проблем проектирования и эксплуатации мостовых сооружений является необходимость учёта факторов неопределённости, таких как изменчивость нагрузок, климатических условий и качества материалов. Эти факторы могут существенно влиять на долговечность и безопасность объектов, что требует разработки более сложных и адаптивных моделей. Особенно остро стоит вопрос обеспечения долговечности в условиях воздействия агрессивных сред и коррозионных процессов, где срок службы конструкции напрямую зависит от

качества материалов, технологии их применения и реальных условий эксплуатации. В связи с этим перспективным направлением исследований является применение методов стохастического анализа и теории надёжности, позволяющих учитывать вероятностные характеристики нагрузок, а также разработка новых материалов с повышенной устойчивостью к коррозии и механическим повреждениям.

Несмотря на значительный прогресс в этой области, современная практика оценки надёжности сталкивается с рядом системных проблем:

1) Недостаточность нормативной базы по живучести. Живучесть – способность сооружения противостоять прогрессирующему разрушению при отказе отдельных элементов – лишь недавно стала фигурировать в нормах (СП 35.13330, ГОСТ Р 54257) в виде общего требования. Отсутствие детализированных методик оценки живучести для различных конструктивных систем (вантовых, висячих, с подвесными пролётами) создаёт критические риски, что наглядно продемонстрировала катастрофа моста Моранди в Генуе.

2) Слабая связь между моделями износа и реальными дефектами. Многие модели деградации (например, экспоненциальная) носят общий характер и плохо учитывают специфику и синергию различных деградационных процессов, таких как одновременное воздействие коррозии и усталости.

3) Высокая неопределённость исходных данных. Прогнозные модели крайне чувствительны к точности оценки скорости коррозии, параметров усталостной кривой и темпов роста нагрузок. Существующие методы натурного измерения (например, скорости коррозии) часто являются точечными и требуют сложной статистической обработки для получения достоверной картины.

4) Сложность учёта совокупного действия нагрузок и воздействий. Современные расчёты зачастую не в полной мере учитывают реалистичные комбинации повышенных транспортных нагрузок, динамических воздействий, климатических факторов и последствий техногенных аварий, что снижает точность прогнозирования поведения сооружения в нештатных ситуациях.

5. Перспективные направления дальнейших исследований в области надёжности мостовых сооружений

Дальнейшее развитие методов обеспечения надёжности мостовых сооружений неразрывно связано с совершенствованием инструментов математического моделирования, внедрением новых материалов и технологий. Особенно перспективным представляется движение в сторону гибридных моделей, объединяющих строгость аналитических подходов с вычислительной мощностью численных методов. Ключевым драйвером прогресса также становится применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта, открывающих возможности для автоматизации процессов оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса конструкций.

Для достижения качественно нового уровня точности и достоверности прогнозов необходима концентрация усилий на следующих приоритетных направлениях [6-11]:

1. Разработка комплексных физико-статистических моделей деградации. Приоритетом является создание моделей, способных интегрировать различные механизмы разрушения (коррозия, усталость, ползучесть) и учитывать их синергетический эффект во взаимосвязи с локальными условиями эксплуатации, такими как микроклимат и действительное напряженно-деформированное состояние.

2. Развитие методов неразрушающего контроля и систем мониторинга. Критически важным является переход к непрерывному мониторингу на базе сетей датчиков (тензометрических, вибрационных, коррозионных) и современных технологий (компьютерное зрение, акустическая эмиссия). Это обеспечит сбор больших данных о реальной работе конструкции в режиме реального времени.

3. Совершенствование вероятностно-статистических методов. Актуальным является активное внедрение методов анализа рисков и теории надежности сложных систем. Обработка данных, полученных с систем мониторинга, методами машинного обучения позволит существенно уточнить прогнозные модели и повысить обоснованность управленческих решений.

4. Разработка нормативных и методических основ оценки живучести. Необходима формализация требований и создание инженерных методик расчета, позволяющих проверять устойчивость несущих систем (вантовых, балочных, арочных) к прогрессирующему обрушению в случае гипотетического повреждения критически важных элементов.

5. Интеграция технологий информационного моделирования (ТИМ) и цифровых двойников. Наиболее перспективным направлением является создание динамических цифровых копий сооружений. Такие модели, обновляемые в реальном времени данными мониторинга, открывают возможности для проведения виртуальных испытаний и оценки последствий различных сценариев эксплуатации и аварийных повреждений без риска для реального объекта.

Заключение

Теория надёжности мостов прошла путь от эмпирических коэффициентов к сложным вероятностным моделям, учитывающим стохастическую природу нагрузок, свойств материалов и процессов износа. Современные подходы, основанные на методе предельных состояний, вероятностных оценках и численном моделировании, позволяют с определенной степенью достоверности оценивать несущую способность и прогнозировать остаточный ресурс. Однако, несмотря на достигнутый прогресс, сохраняется ряд ключевых проблем, требующих дальнейшего изучения: комплексная оценка деградации материалов, учет живучести конструкций при локальных повреждениях и высокая степень неопределенности исходных данных. Дальнейшее развитие отрасли лежит в области конвергенции методов строительной механики, материаловедения, теории вероятностей и цифровых технологий. Решение этих междисциплинарных задач

позволит перейти от планово-предупредительных ремонтов к предиктивному обслуживанию на основе точного прогноза технического состояния, что является ключевым условием для обеспечения безопасной и долговечной работы мостовых сооружений в условиях растущих транспортных нагрузок и ужесточающихся требований к безопасности.

Список литературы

1. Васильев А.И. Основы теории надёжности мостов: учебное пособие. – М.: МАДИ, 2021. – 96 с.
2. Стрелецкий Н. С. Принципиальные основы методики расчёта по предельным состояниям. / Н. С. Стрелецкий – М.: Стройиздат, 1949
3. ГОСТ 27751-2014 Надёжность строительных конструкций и оснований.
4. Ржаницын А. Р. Теория расчёта строительных конструкций на надёжность. / А.Р. Ржаницын – М.: Стройиздат, 1978
5. Методическое пособие. Методика оценки остаточного ресурса долговечности мостов по результатам натурных исследований. – М.: ФАУ «ФЦС», 2019
6. Васильев А.И., Валиев Ш.Н., Шмидт В.С., Овчинников И.Г. Длительные деградиационные процессы, влияющие на снижение грузоподъемности и долговечности мостовых сооружений в период их эксплуатации // Вестник Евразийской науки. – 2022. – Т.14. – №2.
7. Гарантии и риски в техническом регулировании транспортного строительства и дорожного хозяйства / Ш. Н. Валиев, А. В. Кочетков, И. А. Чижиков [и др.] // Устойчивое развитие территорий : Сборник докладов VI Международной научно-практической конференции, Москва, 15–17 мая 2024 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2024. – С. 468-474. – EDN ERNFMC.
8. Валиев, Ш. Н. Управления инновационными рисками в транспортном строительстве / Ш. Н. Валиев // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2024. – № 1. – С. 36-37. – EDN AYIWDA.
9. Кочетков, А. В. Риск-ориентированный подход при эксплуатации мостов / А. В. Кочетков, Ш. Н. Валиев // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2024. – № 4(113). – С. 25-29. – EDN LQEXA.
10. Расчёт предельного состояния мостовых сооружений по критериям допустимости риска нежелательного события / Ш. Н. Валиев, В. С. Надеждин, Д. А. Кочетков [и др.] // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2024. – Т. 1. – С. 115-122. – EDN VNDRXM.
11. Расчёт предельного состояния мостовых сооружений по критериям допустимости риска нежелательного события / Ш. Н. Валиев, В. С. Надеждин, Д. А. Кочетков [и др.] // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2024. – Т. 1. – С. 115-122. – EDN VNDRXM.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

В. С. Костромин, М. С. Галай, В. И. Кочергин

Сибирский государственный университет путей сообщения,
ул. Дуси Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Россия

Аннотация: В статье содержится описание преимуществ и перспектив совершенствования процессов плазменной резки металлов. Приведены основные параметры плазменной резки, определяющие качество обрабатываемых поверхностей и производительность оборудования. Предложены технические мероприятия по цифровизации производственных процессов на основе реализации прогрессивного алгоритма с обратной связью по напряжению дуги и интеллектуального контроля параметров резки посредством применения спектрометрического модуля и омического толщиномера.

Ключевые слова: металлообработка, раскрой металла, плазменная резка, скорость резки, качество реза, цифровизация промышленного производства.

IMPROVEMENT OF PLASMA TECHNOLOGY METAL CUTTING

V. S. Kostromin, M. S. Galaj, V. I. Kochergin

Siberian transport university, 191 Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049, Russia

Abstract: The article describes the advantages and prospects of improving the processes of plasma cutting of metals. The main parameters of plasma cutting are given, which determine the quality of processed surfaces and equipment performance. Technical measures are proposed for digitalization of production processes based on the implementation of a progressive algorithm with arc voltage feedback and intelligent control of cutting parameters by using a spectrometric module and an ohmic thickness meter.

Key words: metalworking, metal cutting, plasma cutting, cutting speed, cutting quality, digitalization of industrial production.

При производстве в машиностроении различных видов изделий из черных и цветных листовых металлов необходимо применение механических, термических, гидроабразивных, электроэрозионных и иных методов их раскроя. От точности и качества выполнения данного процесса зависят трудоемкость последующих операций обработки и сборки и итоговое качество готовой продукции. Выбор оптимального способа раскроя является важным моментом планирования технологического процесса изготовления заготовок и деталей и в значительной степени влияет на качество образующейся кромки и точность реза, образование отходов исходного материала и необходимость дополнительной обработки после раскроя. Относительно новыми технологиями раскроя металлов, получившими достаточно широкое распространение, являются лазерные и плазменные методы резки. Плазменная резка, основанная на нагреве металла посредством образования в зоне линии раскроя под воздействием электрической дуги потока высокотемпературного ионизированного газа (от 15000 до 30000 °С) с последующим удалением расплава потоком плазмы – это один из самых эффективных способов раскроя листовых металлов [1, 2].

Основными преимуществами плазменной резки следует считать высокую точность реза, возможность изготовления заготовок сложной формы, низкую термическую деформацию металлов и равную эффективность при раскрое листов различной толщины. Вместе с тем данному методу резки присущи и определенные недостатки, такие, как образование грата, то есть, слоя остывшего металла или его оксидов в нижней части реза, и брызг в верхней части реза; образование зоны теплового влияния; насыщение при определенных условиях кромок готового изделия азотом. В случае неверно установленных параметров резки или технологических нарушений работы плазмотрона возможно появление угловатости среза, окалины, избыточной шероховатости поверхности реза и цветов побежалости. На качество резки, помимо заданных технологических параметров, может влиять совокупность множества иных факторов, к которым относятся тип используемого оборудования и источника тока, качество и однородность расходных материалов, чистота применяемых газов и квалификация оператора.

Появление в условиях развития научно-технического прогресса и потребности в импортозамещении новых материалов и сплавов вызывает необходимость создания методик оперативной адаптации технологических процессов плазменной резки при соблюдении необходимых показателей качества и эффективности обработки. Для реализации данных технических мероприятий и расширения диапазона обрабатываемых материалов предлагается оптимизация параметров резки, создание специализированных систем охлаждения и удаления газов, повышение экологичности, разработка новых конструкций сопел и электродов, увеличение мощности и энергоэффективности оборудования, а также использование автоматизированных систем [3, 4, 5]. Особенно актуальным следует считать модернизацию процессов тонкоструйной плазменной резки листовых металлических материалов и их композиций [6, 7].

Развитие технологий металлообрабатывающего производства приводит к росту требований к точности и скорости плазменной резки. Первоочередными мерами по обеспечению качества реза является обеспечение оптимальных значений величин тока дуги, расстояния инструмента до обрабатываемой поверхности, расхода образующего плазму газа и скорости резки. Скорость движения рабочего органа станка в наибольшей степени оказывает влияние на результаты раскроя материалов. Оптимальная скорость резки выбирается в зависимости от ряда факторов, включая вид обрабатываемого материала, его толщину и геометрию изделий. Повышение скорости резки повышает производительность, но может приводить к потере качества реза и деформации материала, поэтому необходим точный баланс между скоростью и качеством резки. Следовательно, для выбора оптимальной скорости резки необходим оперативный анализ условий и требований каждой конкретной задачи металлообработки. В качестве иллюстрации данного положения на рисунках 1 и 2 приведены результаты выреза металлов при различных скоростях.

Интеллектуализация и автоматизация процессов плазменной резки открывают новые возможности в промышленном производстве [8]. Применение

искусственного интеллекта, машинного обучения и комплексная автоматизация позволят существенно улучшить показатели точности, качества и скорости термической обработки металлов. При традиционном выборе с помощью справочных таблиц максимально возможной скорости перемещения сопла современного оборудования для плазменной резки с числовым программным управлением не исключается заметное снижение эффективности процесса, поскольку в этом случае многое зависит от квалификации оператора. В условиях динамичности производства и использования различных марок сырья статичные таблицы могут не обеспечивать в полной мере оптимального качества, что обычно выражается в образовании грат и увеличении зоны термического влияния.



Рисунок 1 – Вырез детали при скорости станка в 2000 мм/мин



Рисунок 2 – Вырез детали при скорости станка в 1300 мм/мин

Переход к динамической модели управления плазменной резкой возможен на основе использования искусственного интеллекта. Цифровизация и автоматизация выбора режимов резки при наличии достаточного объема обучающей выборки для различных конструкционных материалов позволит не только повысить качество обработки, но также сократить время переналадки оборудования, оперативно компенсировать отклонения в качестве поверхности металла путем изменения положения плазматрона, выявлять аномалии рабочих процессов плазматрона (нестабильность дуги, подсос воздуха, засорение каналов), формировать рекомендации по своевременному проведению очередного технического обслуживания.

Ограничениями для широкого внедрения интеллектуальных технологий в сфере использования данного вида металлообработки на современном этапе следует считать высокую капиталоемкость, недостаток квалифицированного персонала и нюансы отраслевой фрагментации производств. Кроме того, необходим учет динамической нелинейности процесса, обусловленной чувствительностью плазменной дуги к внешним условиям, что усложняет обучение искусственного интеллекта. В качестве ключевых технологий цифровизации и автоматизации плазменной резки предлагаются эволюция систем числового программного управления (ЧПУ) на основе включения в программы управления технологических контекстов в виде величины допуска и требований к кромке, типа обрабатываемого материала, выбора стратегии резки; внедрения систем адаптивного управления и машинного зрения; построения цифровых двойников и симуляторов процессов.

Наиболее перспективным направлением эволюции с целью снижения себестоимости и повышения качества продукции является организация плазменной резки с автоматизированным распознаванием в реальном времени марки стали и фактической толщины заготовки с последующей корректировкой параметров с помощью нейросетевых алгоритмов или адаптивных моделей. Для реализации эффективного интеллектуального управления предлагается интеграция в структуру станка с ЧПУ двух дополнительных модулей: спектрометрического модуля, позволяющего выполнение экспресс-анализов химического состава заготовки, в том числе, идентификацию содержания легирующих элементов, и омического толщиномера для определения фактической толщины листа в точке начала реза.

Алгоритм интеллектуального управления должен содержать в своем составе замкнутую петлю обратной связи по напряжению дуги. При отклонении значений текущего напряжения от эталонных, а также при наличии деформации листа заготовки или местного изменения состава металла, необходимо мгновенно скорректировать положение плазматрона по отношению к обрабатываемому материалу. Основные этапы работы предлагаемого прогрессивного алгоритма настройки параметров плазменной резки:

- определение входных параметров толщины и типа материала;
- выбор диаметра сопла и величины силы тока;
- расчет скорости реза;

- корректировка формы и положения факела;
- установка времени пробивки.

Для успешной реализации предлагаемых технических и цифровых решений помимо аппаратной модернизации процессов плазменной резки и разработки модернизированного программного обеспечения потребуются также специализированная подготовка кадров; обеспечение выполнения экологических требований; отраслевая стандартизация; автоматизация и унификация сопутствующих производственных процессов сварки, маркировки и складирования готовой продукции. Совершенствование технологических процессов плазменной резки металлов вкупе с другими организационно-техническими мероприятиями позволит машиностроительным предприятиям достичь конкурентных преимуществ за счет повышения качества, снижения себестоимости и минимизации экологической нагрузки на окружающую среду.

Библиографический список

1. Сайт металлообрабатывающей компании VT-METALL. – URL: <https://vt-metall.ru/articles/121-sposobi-raskroya-metalla/> (дата обращения: 14.05.2026).
2. Анахов С. В., Пыкин Ю. А., Матушкин А. В. Плазменные инструменты в машиностроительных технологиях. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2023. – 189 с.
3. Мевлют Ш. Т., Киселёв Н. П. Повышение качества плазменной резки металлов путем оптимизации технологических параметров процесса // Проблемы и перспективы студенческой науки. – 2020. – № 1 (7). – С. 9–13.
4. Сиваченко Ю.А. Совершенствование местного отсоса от плазменной резки мелкосерийных деталей // Экономика строительства и природопользования. – 2021. – № 4 (81). – С. 28–32.
5. Анахов С. В., Гузанов Б. Н., Матушкин. Исследование эффективности применения нового устройства для воздушно-плазменной резки листовой легированной стали // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2022. – № 4. – С. 67–77.
6. Рахимьянов Х. М., Локтионов А. А., Рахимьянов А. Х., Гаар Н.П. Оценка технологических схем тонкоструйной плазменной резки металлических материалов и их композиций // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20. – № 2. – С. 18–34.
7. Рахимьянов Х. М., Гаар Н. П., Локтионов А. А. Оптимизация режимов тонкоструйной плазменной резки листовых материалов на основе безразмерных параметров процесса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 4 (128). – С. 23–32.
8. Платов С. А., Щенятский А. В. Алгоритм адаптивного управления процессом обработки торцов пружин методом плазменной резки // Информатика, вычислительная техника и управление. – 2023. – Т. 21. – № 3. – С. 95–103.

ЭЛЕМЕНТЫ СРОКА ДОСТАВКИ В МЕЖДУНАРОДНЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗКАХ

А. П. Гrefenshteyn¹, В. С. Гарнец¹, А. Н. Корнеева²

1. Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Россия
2. АО «Проектный институт «Алтайкоммунпроект», ул. Путиловская, 30, г. Барнаул, 656038, Россия

Аннотация: в статье рассмотрена методика оценки элементов срока доставки в экспортно-импортных контейнерных перевозках. Предложенный подход позволяет вычислять превышение реального срока доставки над «нормативным» или «предельным», а также рассчитывать время простоя контейнеров на пограничной перегрузочной станции. Описаны результаты применения методики на данных реальной транспортно-экспедиционной компании, которые получены по СМГС-накладным за 2023–2025 годы.

Ключевые слова: пограничная железнодорожная станция, контейнер, срок доставки, экспорт, импорт, клиентоориентированность

ELEMENTS OF DELIVERY TIME IN INTERNATIONAL CONTAINER TRANSPORT

A. P. Grefenshteyn¹, V. S. Garnets¹, A. N. Korneeva²

1. Siberian Transport University, 191 Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049, Russia
2. Altaykommunproekt Design Institute JSC, 30 Putilovskaya str., Barnaul, 656038, Russia

Abstract: The article examines a methodology for assessing the elements of delivery time in export-import container transport. The proposed approach makes it possible to calculate the excess of the actual delivery time over the “standard” or “maximum” delivery time, as well as to calculate container downtime at a border transshipment station. The results of applying the methodology to the data of an actual freight forwarding company, obtained from SMGS consignment notes for 2023–2025, are described.

Keywords: border railway station, container, delivery time, export, import, customer focus

Введение

Трудно переоценить достоинства организации контейнерных перевозок грузопотоков в современных условиях. Использование универсальных и специализированных контейнеров позволяет улучшить технологию грузопереработки и обслуживание клиентов за счет унитизации отправок, повышения скорости и надежности перевозок [1]. В международном сообщении особенно актуально решение проблем взаимодействия видов транспорта в узлах – портах, пограничных переходах, терминалах, железнодорожных станциях и т. д.

Такая инфраструктура, как правило, имеет соответствующее оснащение для пропуска физических лиц, транспортных средств, грузов, товаров и животных между государствами [2]. Для соблюдения правовых основ

функционирования границ государств, например, на пограничной железнодорожной станции взаимодействуют разные учреждения, инспекции и войска (пограничные, таможенные, ветеринарные, фитопатологические и т. д.), а также ряд транспортно-экспедиторских предприятий и посредников [2]. В процессе передачи вагонов между государствами на пограничной станции кроме разных видов контроля, выполняемых перечисленными выше государственными организациями, проводятся технические, грузовые и коммерческие операции.

С одной стороны, проведение отдельных видов таможенного контроля защищает права и интересы страны, ведущих экономическую деятельность предприятий, а также граждан. С другой стороны, от взаимодействия учреждений, инспекций, структурных подразделений ОАО «РЖД» зависит время нахождения контейнеров на пограничной железнодорожной станции, т. е. срок доставки в экспортно-импортных перевозках.

Существуют типовые схемы [2], которые определяют последовательность и продолжительность проведения необходимых видов государственного контроля, обработку поездов и вагонов в зависимости от вида сообщения. Открытым остается вопрос определения реального срока нахождения контейнера на пограничной железнодорожной станции, в том числе под грузовыми операциями¹.

Настоящая статья посвящена определению времени простоя универсальных контейнеров на перегрузочной пограничной станции, помещенных под таможенную процедуру таможенного транзита.

Методы

В качестве важнейшего критерия, влияющего на выбор способа транспортировки для клиентов, рассмотрим время и своевременность, надежность доставки. Поэтому соответствующими критериями методики являются срок доставки и время нахождения груза на пограничной станции.

Опишем элементы транспортного процесса, из которых суммируется нормативный срок доставки (на железнодорожном транспорте). Срок включает в себя время на операции, связанные с отправлением и прибытием, время в пути следования и на перегруз. Для описания элементов срока доставки использованы нормативы [3, 4] и предложена следующая схема (рисунок 1).

Приведенная схема иллюстрирует порядок расчета нормативного срока доставки t_n , сут. Важно отметить, что для маршрутных отправок, в том числе контейнерных поездов, отправитель и перевозчик могут согласовывать иные сроки (согласованные сроки) и иную среднесуточную скорость, которые отличаются от данных рисунка 1.

Поэтому в методике введены понятия:

- реальный срок доставки – t_p , сут – фактический, определяемый либо натурными методами, либо по штемпелям таможенной службы, ОАО «РЖД» в накладных СМГС;

- предельный срок доставки – t_n , сут – установлен СМГС [3].

¹ Бесперегрузочные (передаточные) пограничные станции в статье не рассматриваются.

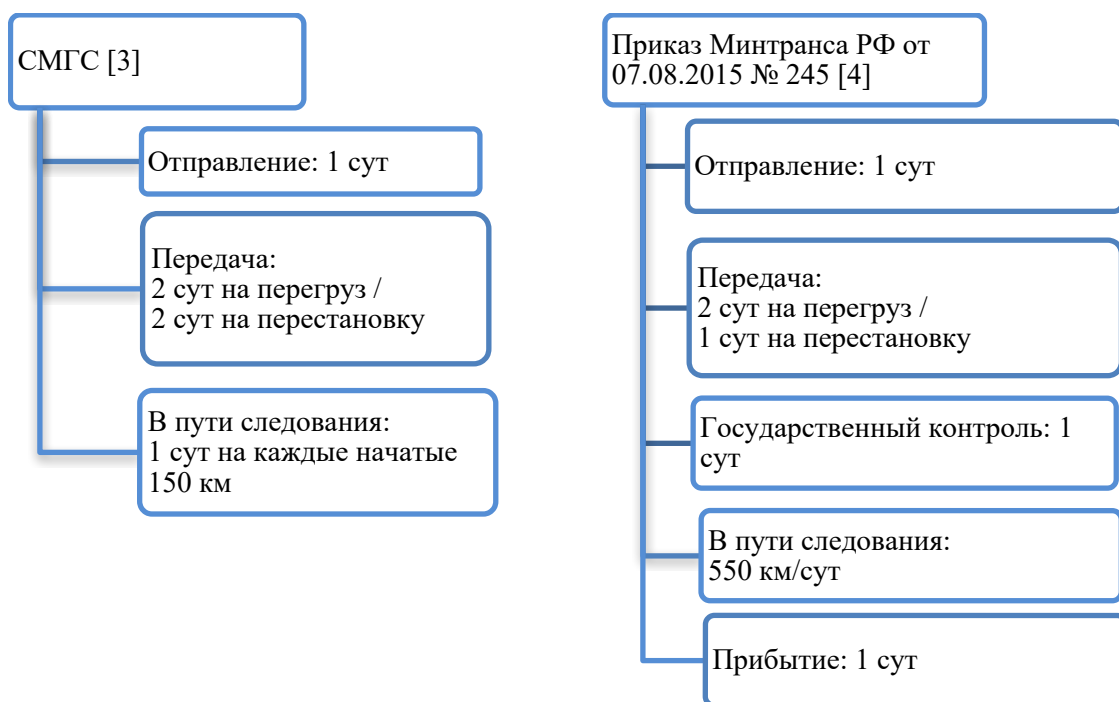


Рис. 1. Схема расчета элементов срока доставки [3, 4]

Обязательное условие – соблюдение соотношений $t_n \leq t_n$ и $t_p \leq t_n$.

Методика расчета элементов срока доставки в экспортно-импортных контейнерных перевозках основывается на предыдущих исследованиях авторов [5, 6], поэтому формулы расчета и пояснения к ним приводятся в виде таблицы 1.

Таблица 1. Основные параметры методики расчета элементов срока доставки [5, 6]

Параметр	Обозначение	Примечание
L_i	расстояние между станциями в i -ой стране, км	по тарифным расстояниям
n	число стран-участниц международной перевозки	одна страна-участница
$t_{СМГС_i}$	время на операции в пути следования в i -ой стране согласно [3], сут	4 сут
S_i	норма среднесуточного пробега (нормативная скорость доставки) в i -ой стране, км/сут	ускоренный контейнерный поезд, 850 км/сут
$t_{Пр_i}$	время на операции в пути следования в стране Р согласно [4], сут.	3 сут
N_i^k	дата прибытия на конечную станцию в i -ой стране;	рисунок 2
N_i^h	дата начала погрузки на станции отправления i -ой стране	рисунок 2
N^k	дата прибытия на конечную станцию в Р	рисунок 2
N^h	дата начала погрузки на станции отправления из К;	рисунок 2

Предельный и нормативный сроки доставки можно рассчитать по формулам [3–6]:

$$t_n = \sum \frac{L_i}{150} + \sum_{i=1}^n t_{СМГС i}, \quad (1)$$

$$t_n = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{S_i} + \sum_{i=1}^n t_{Пр i}. \quad (2)$$

Время нахождения контейнера в i -ой стране определяется [5, 6]:

$$t_p^i = N_i^k - N_i^h + 1. \quad (3)$$

Величина t_p рассчитывается суммированием соответствующего времени во всех странах-участницах перевозки или определяется по штемпелям СМГС-накладной [5, 6]:

$$t_p = \sum_{i=1}^n t_p^i = N^k - N^h + 1. \quad (4)$$

Чтобы найти реальное время нахождений контейнера на перегрузочной пограничной станции, необходимо оценить расхождение между t_p^i и $(t_n + 2)$, где 2 сут установлено на перегруз [3–6].

$$t_{пер} = (t_p^i - t_n) + 2. \quad (5)$$

Чтобы оценить риски нарушения условий выполнения сроков доставки в международном сообщении [3], необходимо определить, превышает ли реальный срок предельный [5, 6]:

$$\Delta = t_p - t_n > 0. \quad (6)$$

На рисунке 2 предложена схема выполнения расчетов по настоящей методике.

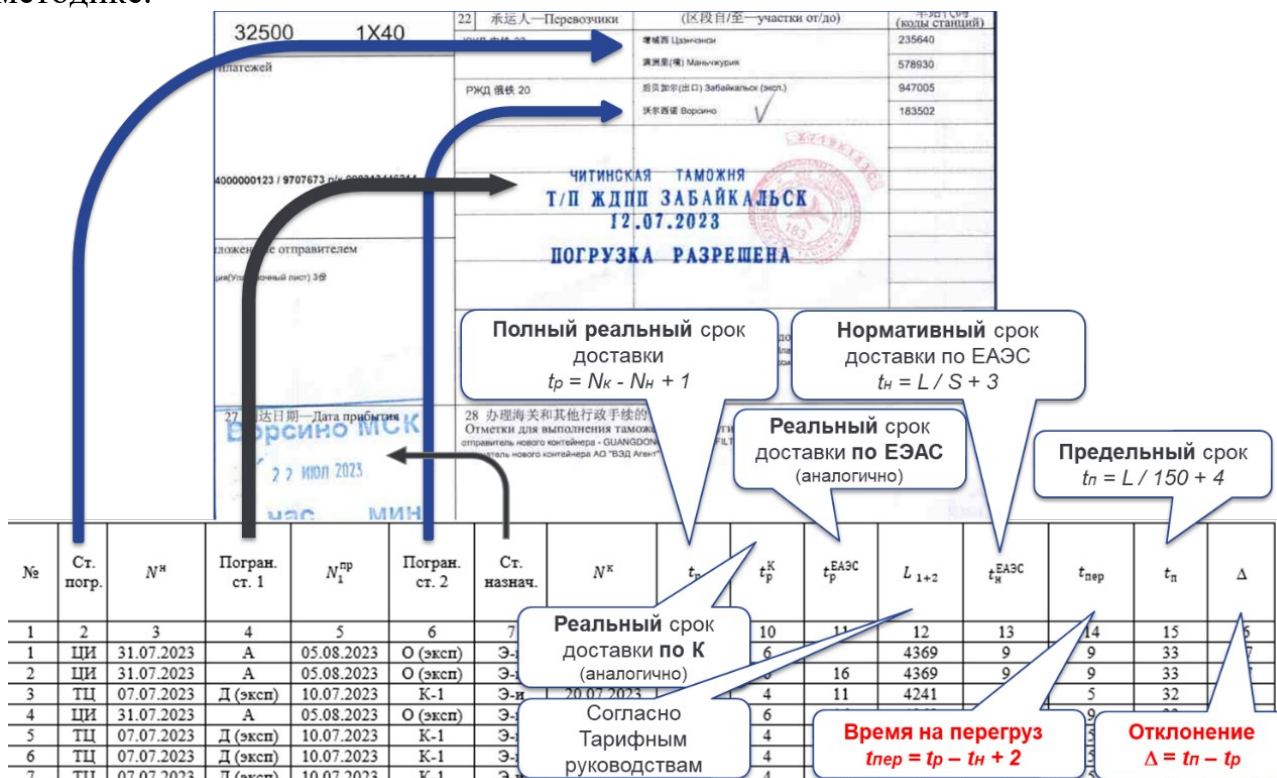


Рис. 2. Схема расчета элементов срока доставки

Приведенная в статье методика позволяет определить время нахождения грузов на каждом элементе процесса транспортировки, а также выявить сторону, допустившую превышение реального срока доставки над нормативным или

предельным. За счет виновника, согласно [5], выплачивается компенсация клиенту.

Отдельно отметим, что элемент срока доставки t_{nep} определяет фактический простой контейнера на инфраструктуре владельца (в ожидании перегруза или под ним).

Результаты

Расчеты по формулам (1)–(6) и алгоритму на рисунке 2 были выполнены в файле табличного редактора для разных пограничных перегрузочных железнодорожных станций. Обработывались СМГС-накладные реальной транспортно-экспедиционной компании (ТЭК), которая специализируется на организации экспортно-импортных контейнерных перевозок и внешнеэкономической деятельности. Объем выбранных СМГС-накладных составляет около тысячи единиц за 2023–2025 гг. Полученная таблица расчетных данных из-за большого размера в статье не приводится, публикуются только основные результаты.

Во-первых, среднее значение величины реального срока доставки в импортном направлении составило $t_p=22$ сут, что превышает сроки доставки, которые устанавливаются экспедиторами на рынке транспортно-логистических услуг (таблица 2).

Таблица 2. Реальные сроки доставки грузов в импортном направлении

Направление	Реальный срок доставки, t_p , сут			Установленные экспедиторами сроки, сут
	Средний	Минимальный	Максимальный	
М	21,7	10	55	16–20
Н	22,6	11	51	18–20
С-П	26,6	16	37	20–24

На основе обработанных данных установлено, что:

- 26,1 % контейнеров из выборки пришли в срок, заявленный в таблице 2;
- 23,9 % контейнеров были доставлены раньше;
- 50,0 % контейнеров были в пути дольше заявленных экспедитором сроков.

Сравнение фактических данных с условиями, которые предлагают экспедиторы клиентам, позволяет сделать вывод об отклонении заявленных сроков доставки примерно в 2 раза (в большую или меньшую стороны), что негативно влияет на показатель надежности и клиентоориентированности [7].

Во-вторых, t_{nep} – средний срок нахождения контейнера на станциях по всем обработанным накладным-СМГС в импортном направлении составляет более 8 сут (рисунок 3), в экспортном – около 12 сут (рисунок 4).

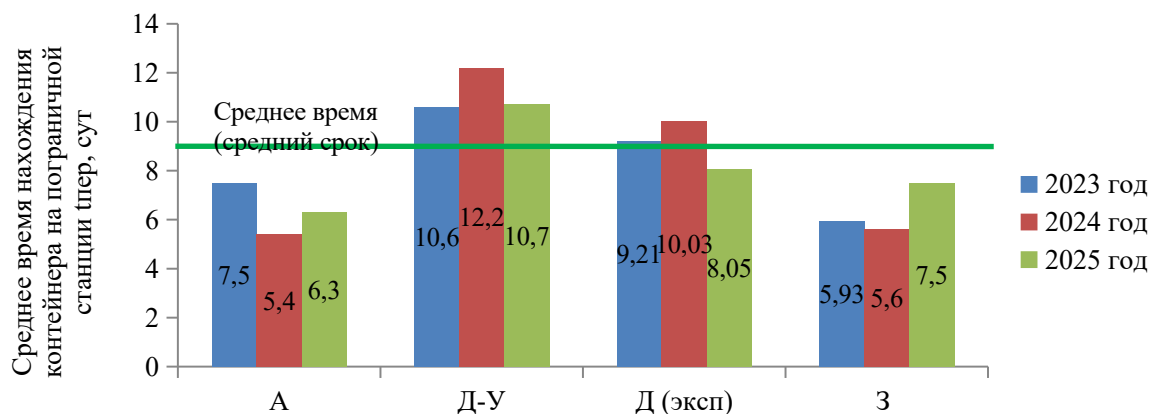


Рис. 3. Диаграмма среднего времени нахождения контейнеров на станции перегруза (импорт), $t_{пер}$

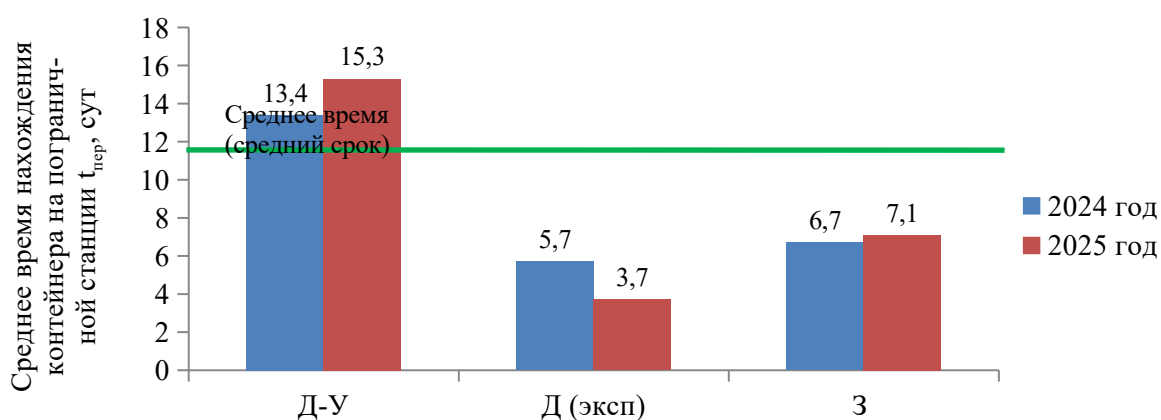


Рис. 4. Диаграмма среднего времени нахождения контейнеров на станции перегруза (экспорт), $t_{пер}$

Полученные реальные значения $t_{пер}$ в 3–6 раз превышают установленные нормативы на перегруз [3, 4]. Такая ситуация негативно сказывается на разных сторонах, участвующих в транспортировке:

- 1) операторы подвижного состава: увеличение потребного парка вагонов из-за роста оборота и увеличение расходов на приобретение, текущий и капитальный ремонт, обслуживание и т. д.;
- 2) владелец инфраструктуры: снижение перерабатывающей способности станции и, как следствие, упущенная выгода привлечения дополнительных грузопотоков из-за простоев вагонов;
- 3) грузовладельцы: логистические расходы из-за низкой надежности сроков доставки, в том числе «стоимость грузовой массы в запасах» [8].

Описанная проблема обуславливает актуальность изменения технологии передачи грузов на сухопутных пограничных переходах, где взаимодействуют дороги разной ширины колеи. В рамках развития настоящей тематики возможно дальнейшее изучение особенностей использования вагонов с раздвижными колесными парами как альтернативного способа передачи грузов через государственную границу.

В-третьих, более детальный анализ расчетов показывает, что $t_{пер}$ на разных объектах значительно отличается друг от друга. Описание основных станций (пограничных переходов) приведено в обобщенном виде в таблице 3.

Таблица 3. Перечень железнодорожных пограничных переходов

Пограничный переход	Станция	Принадл ежность	Станция	Принадл ежность	Характеристика	Техническая операция
М – З	М	К	З	Р	Внешняя	Перегрузочная
Сх – Г	Сх	К	Г	Р	Внешняя	Перегрузочная
Х – Ат	Х	К	А	Кз	Внешняя	Перегрузочная
СМ – О	СМ	Кз	О	Р	Внутренняя	Передаточная
Ау – Д	Ау	К	Д (эксп)	Кз	Внешняя	Перегрузочная
Е – К	Е	Кз	К	Р	Внутренняя	Передаточная
Э – Д-У	Э	К	Д-У	М	Внешняя	Перегрузочная
С-Б – Н	С-Б	М	Н	Р	Внутренняя	Передаточная
Примечания						
1 внешние перегрузочные станции – расположенные у границ соседних государств, на стыке железных дорог с разной шириной колеи (1520 и 1435 мм);						
2 внутренние перегрузочные станции – расположенные внутри страны на стыке магистрального и промышленного железнодорожного транспорта узкой колеи (1520 и 750 или 1000 мм)						

Станции из таблицы 3 – З, Г, А, Д, Д-У (рисунки 3, 4) – относятся к «внешним перегрузочным». На них передача грузов между государствами производится с помощью перегруза, т. е. перестановки контейнеров средством механизации по типу «платформа 1520 мм – платформа 1435 мм».

Коротко рассмотрим каждую из перегрузочных станций отдельно [9–18].

Пограничный переход М – З является крупнейшим пунктом пропуска на Р – К границе. Станции М и З связаны одним железнодорожным путем; колея 1435 мм вводится на территорию станции З и после этого происходит перегрузка в вагоны другой колеи. Станция имеет 25 путей. Контейнерный терминал имеет 10 путей, 2 козловых крана, 9 ричстакеров и 1 кран на автомобильном ходу. Текущая пропускная способность оценивается в 35 млн тонн в год, с планом роста до 40 млн тонн к 2030 году. В сутки принимается по 22 пары поездов, после модернизации с возможностью роста до 50 пар поездов [10–12].

Пограничный переход Сх – Г является крупнейшим в восточной части страны. Станции связаны одним железнодорожным путем. Колея 1435 мм вводится на территорию станции Г и после этого происходит перегрузка груза на вагоны другой ширины колеи. Текущая пропускная способность оценивается в 18 млн тонн в год, до 18 пар поездов в сут. Перегруз осуществляется на станции Сх, которая оснащена контейнерным терминалом с 17 козловыми кранами и более 150 автокранами для лесных грузов. Перерабатывающая способность Сх оценивается в 33 млн тонн [13–15].

Пограничный переход Х – Ат является одним из ключевых узлов для контейнерных грузов. Текущая пропускная способность – 18 пар поездов. Перегруз контейнеров осуществляется на станции Ат. Перерабатывающая способность оценивается в 25 млн тонн [16].

Пограничный переход Ау – Д является ключевым узлом в маршруте К – Е. Пропускная способность составляет 20 млн тонн в год. На станции имеется контейнерный терминал на 62 условных вагона, и пропускает до 20 пар поездов в сут [17].

Железнодорожный пограничный переход Э – Д-У ключевой узел на Т магистрали. На станции имеется 2 пути широкой колеи и 1 путь узкой колеи. Пропускная способность составляет до 12 пар поездов в сут [18].

В-четвертых, отметим, что наибольшие задержки происходят на станции Д-У. Время нахождения контейнеров на стороне другого государства превышает предельные сроки доставки по СМГС. Средняя скорость перевозки составляет 125,63 км/сут (при установленной в СМГС 150 км/сут).

По данным из открытых источников [9] было выявлено, что с 2022 по 2025 гг. объем перевозок через данный пограничный переход вырос на 93,5 % (с 3,1 млн т до 6 млн т). Отмечено, что планируется увеличение пропускной способности еще на 50 % по сравнению с текущим уровнем.

В-пятых, рассчитанные по формуле (6) отклонения t_p от t_n не показали отрицательных значений (рисунок 5). То есть $t_p \leq t_n$ – истина.

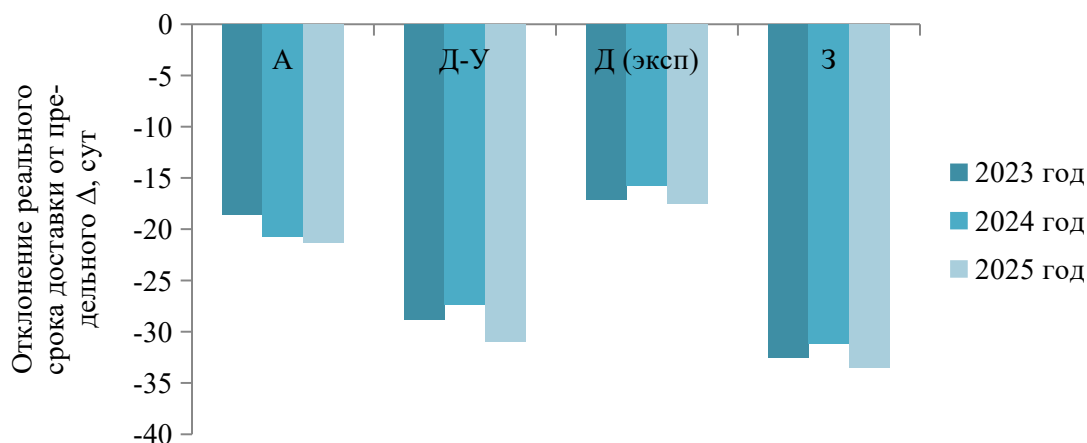


Рис. 5. Диаграмма отклонения реального срока доставки от предельного, Δ

Несмотря на нарушение сроков доставки, предлагаемых экспедиторами (таблица 2), нарушения сроков, установленных ОАО «РЖД» [3, 4] не было выявлено. По сути, предельный срок доставки t_n , определенный по норме $S_i=150 \text{ км/сут}$, с учетом дополнительного времени простоя под грузовыми операциями на пограничной станции достаточно трудно нарушить.

Таким образом, нарушения сроков доставки, определенных по нормативу среднесуточного пробега [3, 4], не установлено. Считаем, что установленная величина 150 км/сут является достаточно низкой, и подобный сервис может не удовлетворить потребителей услуг, клиентов.

Норма пробега в 2015 году была уменьшена с 320 до 150 км/сут и на протяжении более 10 лет не менялась в большую сторону, вследствие чего предоставление услуг железнодорожным транспортом теряет конкурентоспособность среди других видов грузовых перевозок, где норма

среднесуточного пробега, например, при наличии двух водителей в одном подвижном составе, измеряется до 1 тыс км/сут.

Выводы

В статье приведена методика расчета срока нахождения контейнеров, помещенных под таможенную процедуру таможенного транзита, на внешних перегрузочных пограничных станциях. В рамках описания методики предложены формулы расчетов и графические пояснения в виде схемы.

Методика апробирована на примере деятельности реальной ТЭК. Изучались данные тысячи СМГС-накладных за последние три года в импортном и экспортном сообщении. Рассчитаны элементы нормативного, предельного, реального срока доставки, а также среднее время нахождения контейнеров на станции непосредственно под грузовыми операциями.

Было установлено, что на пограничной станции А средний простой импортного контейнера составляет 6,19 сут, Д-У – 11,33 сут, Д (эксп) – 9,60 сут, а З – 5,85 сут. Данный показатель превышает нормативный параметр в 3–6 раз в зависимости от направления. Полученные результаты подтверждают необходимость совершенствования технологии организации передачи вагонов между разными странами.

Библиографический список

1. Кагадий И. Н., Грефенштейн А.П. Перспективы контейнерных перевозок угля // Железнодорожный транспорт, 2024. № 12. С. 18-21. EDN KRYPBS.
2. Приказ Минтранса РФ от 9 февраля 2010 г. N 31 «Об утверждении Типовой схемы организации пропуска через государственную границу Российской Федерации лиц, транспортных средств, грузов, товаров и животных в железнодорожных пунктах пропуска через государственную границу Российской Федерации (с изменениями)» от 02.03.2010 № 16540 // Российская газета, № 54, 17.03.2010. с изм. и допол. в ред. от 20 сентября 2021 г.
3. Соглашение о Международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) (с изм. и доп. на 01.07.2023) : утв. Организацией Сотрудничества Железных Дорог 1.11.1951 : в ред. письма Комитета Организации Сотрудничества Железных Дорог от 15.02.2023 N II-1/8/23 ОО. Приложение 6 к СМГС. Руководство по накладной ЦИМ/СМГС.
4. Приказ Минтранса РФ от 07.08.2015 № 245 «Об утверждении Правил исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом (с изменениями)» от 14.03.2016 № 41393 // Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 16.03.2016, № 0001201603160014. Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, № 17, 25.04.2016 с изм. от 28 декабря 2017 г.
5. Гарнец В. С. Оценка величины задержек грузов на пограничных станциях в международных перевозках // В мире научных открытий : материалы IX Международной студенческой научной конференции, Ульяновск, 12–14

марта 2025 года. Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 2025. С. 3775-3778. EDN WPKTER.

6. Гарнец В. С., Грефенштейн А. П. Оценка величины задержек контейнерных грузов на пограничных станциях // Интеллектуальный потенциал Сибири : 32-я Региональная научная студенческая конференция: материалы конференции. В 5-ти частях, Новосибирск, 20–25 мая 2024 года. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2024. С. 239-241. EDN MRCKJG.

7. Ким А. С., Кагадий И. Н. Обоснование эффективности ускоренной доставки грузов в направлении Дальнего Востока // Политранспортные системы : Материалы X Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 15–16 ноября 2018 года. Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2019. С. 280-282. EDN MGDPL.

8. Грефенштейн А. П. Логистические расходы при управлении запасами предприятия // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта, 2025. № 4(19). С. 12-17. DOI 10.52170/2712-9195_2025_4_12. EDN EBNSJB.

9. Анализ работы станций Достык и Алтынколь в условиях множественности собственников и операторов вагонов с выработкой рекомендаций по совершенствованию процесса работы данных станций с участниками перевозочного процесса // Корпоративный Фонд «KAZLOGISTICS» URL: <https://kazlogistics.kz/upload/iblock/b4d/b4dd1f4bab55317fb3f1a36c2703cb8d.pdf> (дата обращения: 02.06.2024).

10. ТрансКонтейнер увеличил мощности терминала Забайкальск до 555 тыс. // Информационный портал InfraNews URL: <https://www.infranews.ru/logistika/containeri/61038-transkontejner-uvelichil-moshhnosti-terminala-zabajkalsk-do-555-tys-teu/> (дата обращения: 02.06.2026).

11. ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия готовят к новым объемам // Информационное агентство «РЖД-Партнер.РУ» URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/zhdpp-zabaykalsk-manchzhuriya-gotovyat-k-povum-obemam/> (дата обращения: 02.06.2026).

12. К 2030 году пропускная способность погранперехода Забайкальск – Маньчжурия вырастет до 40 млн т // Информационное агентство «РЖД-Партнер.РУ» URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/k-2030-godu-propusknaaya-sposobnost-pogranperekhoda-zabaykalsk-manchzhuriya-vyrastet-do-40-mln-t-/> (дата обращения: 02.06.2026).

13. РЖД известили китайских коллег о планах по развитию погранперехода Гродеково – Суйфэньхэ // Информационное агентство «РЖД-Партнер.РУ» URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/rzhd-izvestila-kitayskikh-kolleg-o-planakh-po-razvitiyu-pogranperekhoda-grodekovo-suyfenkhe/> (дата обращения: 02.06.2026).

14. До 17,7 млн т в год планируется увеличить провозную способность погранперехода Гродеково – Суйфэньхэ (КНР) // Информационное агентство «РЖД-Партнер.РУ» URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/do-17-7->

mln-t-v-god-planiruet-sya-uvelichit-provoznuyu-sposobnost-pogranperekhoda-grodekovo-suyfenkhe/ (дата обращения: 02.06.2026).

15. Китайский связной // Российские железные дороги URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=143671&accessible=true> (дата обращения: 02.06.2026).

16. Пропускная способность направления Алтынколь – Хоргос возрастет почти вдвое // KAZINFORM URL: <https://www.inform.kz/ru/propusknaya-sposobnost-napravleniya-altinkol-horgos-vozzrastet-pochti-vidvoe-c08537> (дата обращения: 02.06.2026).

17. Трансказахстанский транзит из Китая растет // Транспортно-логистическая инвестиционная группа компаний Республики Казахстан «РТС Holding» URL: <https://ptc-holding.kz/news/transkazahstanskij-tranzit-iz-kitaya-rastet-2/> (дата обращения: 02.06.2026).

18. Точка перехода // 1520 INTERNATIONAL URL: <https://1520international.com/content/2024/noyabr-2024/the-transition-point/> (дата обращения: 02.06.2026).

19. Петренева Е. А. Формализация подхода к оценке возможности перевозки контрейлера на заданном направлении // Вестник транспорта Поволжья, 2026. № 2(116). С. 159-167. EDN UHBRHC.

Технологии информационного моделирования мостовых сооружений: интеграция методической и нормативной базы

А.В. Паторняк¹

¹Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), ул. Дуси Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются вопросы интеграции технологий информационного моделирования в систему проектирования мостовых сооружений с акцентом на взаимосвязь методической и нормативной базы. Показано, что в смежных отраслях строительства, прежде всего в дорожном и гражданском строительстве, цифровизация уже получила нормативную поддержку и практическое развитие, тогда как в мостостроении сохраняется существенное отставание. Установлено, что основными причинами данного отставания являются недостаточная проработанность нормативных требований к информационным моделям мостов, сложность их геометрии, техническая и конструктивная сложность объектов, необходимость учета координатно-высотных систем, а также отсутствие формализованных подходов к переходу от цифровой информационной модели к расчетной схеме. На основе анализа отечественного и зарубежного опыта показано, что применение технологий информационного моделирования в мостовой отрасли позволяет повысить точность проектирования, сократить сроки согласования решений, снизить риск коллизий и повысить эффективность взаимодействия между участниками проектно-строительного процесса. Особое внимание уделено примерам практического использования технологий информационного моделирования при проектировании и реконструкции мостовых сооружений, включая задачи автоматизированной передачи данных в расчетные комплексы. Сформулированы рекомендации по модернизации нормативной базы, предусматривающие закрепление требований к структуре и наполнению информационных моделей, разработку библиотек параметрических элементов, регламентацию формирования аналитических моделей и расширение мер государственной и организационной поддержки цифровизации мостовой отрасли.

Ключевые слова: информационное моделирование, технологии информационного моделирования, мостовые сооружения, жизненный цикл, транспортная инфраструктура

Bridge Information Modeling Technology: Integration of Methodological and Regulatory Standards

A.V. Patornyak¹

¹Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. This paper examines the integration of information modeling technologies into the bridge design process, with a focus on the relationship between methodological and regulatory frameworks. It is shown that in related construction sectors, primarily in road and civil engineering, digitalization has already received regulatory support and practical implementation, whereas bridge engineering continues to lag significantly behind. It has been established that the main reasons for this lag are the insufficient elaboration of regulatory requirements for bridge information models, the complexity of their geometry, the uniqueness of most structures, the need to account for coordinate and elevation systems, as well as the absence of formalized approaches to the transition from a digital information model to a design scheme. Based on an analysis of domestic and international experience, it is shown that the application of information modeling technologies in the bridge industry allows for increased design accuracy, reduced decision-approval times, lower collision risk, and improved efficiency of interaction among participants in the structure's life cycle. Particular attention is paid to

examples of the practical application of information modeling technologies in the design and reconstruction of bridge structures, including tasks related to the automated transfer of data to analytical systems. Recommendations are formulated for modernizing the regulatory framework, providing for the establishment of requirements for the structure and content of information models, the development of libraries of parametric elements, the regulation of analytical model creation, and the expansion of state and organizational support measures for the digitalization of the bridge industry.

Keywords: information modeling, information modeling technologies, bridge structures, life cycle, transportation infrastructure

Введение

В современном строительстве цифровизация перестала быть модным трендом, показывающим красивую объемную картинку будущего сооружения, а стала необходимым условием повышения эффективности, безопасности и качества проектов. Технологии информационного моделирования (ТИМ) позволяют автоматизировать многие процессы проектирования и управления жизненным циклом сооружений.

В сферах проектирования дорог, зданий и сооружений (область ПГС) ТИМ активно внедряется в нормативную базу, что подтверждается как рядом постановлений и приказов, так и сводов правил и государственных стандартов [1]. В этих сегментах уже реализован ряд больших проектов, в которых информационные модели позволили сократить время согласования документации и выявить коллизии на раннем этапе проектирования [2].

Тем не менее в мостостроении сохраняется заметный цифровой разрыв: отрасль остается консервативной, а проектирование и строительство зачастую ведется с помощью традиционных 2D-чертежей и бумажных документов. Анализ действующих нормативов показывает, что в области мостового хозяйства практически отсутствуют соответствующие стандарты и методические рекомендации, регламентирующие использование информационных моделей [3]. В результате проектные организации либо вовсе не применяют ТИМ, либо используют его в ограниченном объеме, без интеграции с нормами и стандартами.

Цель настоящей статьи – выявить причины отставания мостовой отрасли от общей тенденции цифровизации на основе анализа нормативной базы и практики проектирования, а также предложить пути интеграции технологии информационного моделирования в процесс проектирования мостов. Для этого в статье рассматривается опыт применения ТИМ в смежных отраслях, анализируется потенциал для мостостроения, а также даются рекомендации по модернизации нормативного регулирования отрасли.

Цифровизация проектирования дорог и зданий

В последние годы реализация цифровых технологий в дорожном и гражданском строительстве получила мощную поддержку на уровне государства. Например, с 2022 г. внедрение ТИМ является обязательным для всех государственных объектов, что закреплено в Постановлении Правительства РФ № 1431. Для дорожной инфраструктуры был выпущен ряд предварительных национальных стандартов. На сегодняшний день существует ряд сводов правил и государственных стандартов, устанавливающие требования к формированию информационных моделей, обмену данными и ведению проектной документации в цифровом формате. Следует отметить, что в пункте 3 раздела 1 Положения о составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию (Постановление Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 года N 87) указано, что «проектная документация состоит из текстовой и графической частей, содержащих материалы в текстовой и графической формах и (или) в форме информационной модели». Добавление термина «информационная модель» с одной стороны предоставило возможность проектировщикам применять ТИМ при разработке проекта, но при этом конкретные требования к цифровой информационной модели (ЦИМ) для разных видов сооружений не были разработаны.

Однако на сегодняшний день в проектировании дорог и зданий уже наработаны практические методики и решения. Например, создание унифицированных библиотек параметрических элементов позволяет ускорить моделирование и обеспечить соответствие проектов нормам. Практический опыт и исследования в этих секторах подтверждают, что информационное моделирование способствует снижению рисков и затрат при одновременном повышении качества проектной документации [3, 4].

Нормативный дефицит и причины отставания мостовой сферы в цифровизации

В отличие от проектирования дорог и зданий, нормативная база для проектирования мостов отстает в части цифровизации. В настоящее время основным инструментом проектирования мостовых сооружений остаются традиционные чертежи и текстовые описания. Различные разделы проектной документации разрабатываются изолированно друг от друга, без использования общей информационной модели. Это приводит к фрагментарности подхода, длительным согласованиям технических решений в смежных разделах и удлинению сроков работ, а также к увеличению стоимости проектов из-за выявления ошибок на стадии реализации проекта.

Анализ существующих нормативных документов показывает, что общие требования к цифровизации строительства, закрепленные в постановлениях, не содержат конкретных указаний для мостовых сооружений [1]. Это приводит к тому, что проектные организации, работающие в сфере мостостроения, либо не используют ТИМ вовсе, либо применяют его в ограниченном объеме, без интеграции с отсутствующей в необходимом объеме нормативной базой.

Ряд причин отставания нормативной базы мостов уже был описан в других публикациях [5, 6]. Однако, мостовая сфера сталкивается и с другими характерными особенностями.

Во-первых, основой проекта любого мостового сооружения является продольная ось, выступающая базовой привязкой для всех конструктивных элементов. Но из-за отсутствия единой информационной модели изменения в пространственном положении оси не приводят к автоматическим сопутствующим изменениям в разделах проектной документации (КЖ, КМ и т.д.). Это вызывает необходимость вручную вносить корректировки в смежные разделы документации и повышает риск возникновения коллизий.

Во-вторых, характерной спецификой мостов является их сложная геометрия и наличие неортогональных элементов, что достаточно непросто подробно и корректно представить на классических 2D-чертежах. Отсутствие в нормативной базе требований к автоматической генерации разверток и пространственных проекций приводит к неточностям при разработке проектной документации.

В-третьих, проектирование мостов предполагает работу с протяженными объектами в координатно-высотных системах, что требует специализированной поддержки геоинформационных платформ. В условиях отсутствия стандартизированных решений для обработки таких данных в мостостроении цифровизация сталкивается с техническими барьерами, ограничивающими эффективное внедрение технологии информационного моделирования.

Следует отметить и то, что большинство мостов представляют из себя уникальные объекты, которые требуют учета и анализа специфических геологических условий и гидрологических характеристик. В отличие от типовых объектов, например, дорожного строительства, где можно использовать стандартные решения, мостовые сооружения гораздо чаще требуют персонализированного подхода.

Эти факторы в совокупности приводят к тому, что мостовые организации не находят очевидного преимущества в переходе на ТИМ при текущем уровне поддержки со стороны государства, имеющегося отечественного ПО и слабо проработанной нормативной базы.

Потенциал ТИМ в мостостроении

Несмотря на вышеописанные барьеры, ТИМ обладает значительным потенциалом для проектирования мостов. Международный и отечественный опыт подтверждает эффективность применения ТИМ в проектировании сложных мостовых сооружений [7].

Одним из успешных проектов является пешеходный переход через железнодорожные пути в Химках (2021-2022 гг.). Компания ООО «ИКПАД» использовала комплекс Tekla Structures для проектирования объекта и обеспечения высокой точности сборки металлоконструкций. Общий вид цифровой информационной модели представлен на рисунке 1.

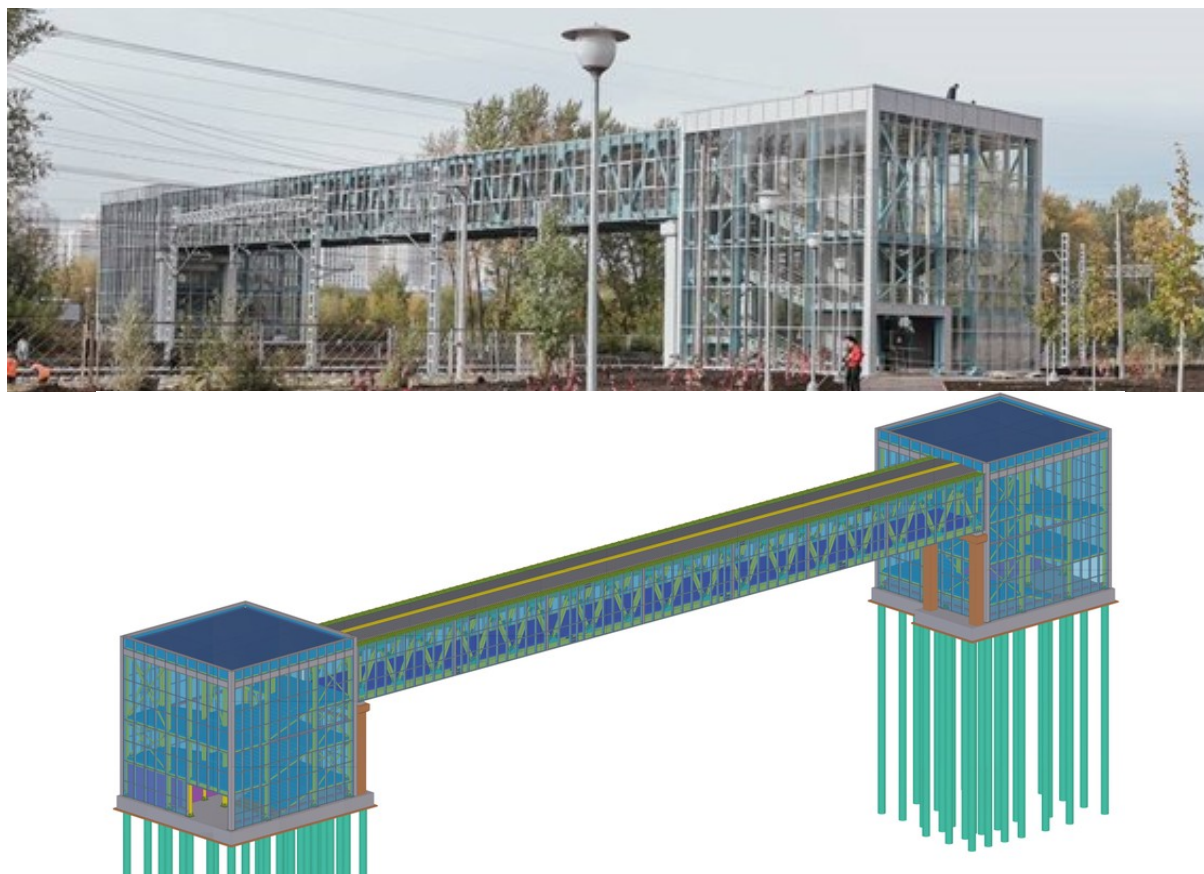


Рис. 1. Общий вид цифровой информационной модели

Другой пример успешного внедрения ТИМ в мостовую отрасль – путепровод в г. Красногорск (2020-2021 гг.). Необходимость строительства путепровода обусловлена запуском МЦД-1. Проект показал эффективность ТИМ в проектировании сложных дорожных сооружений с учетом существующей инфраструктуры. Общий вид цифровой информационной модели показан на рисунке 2.

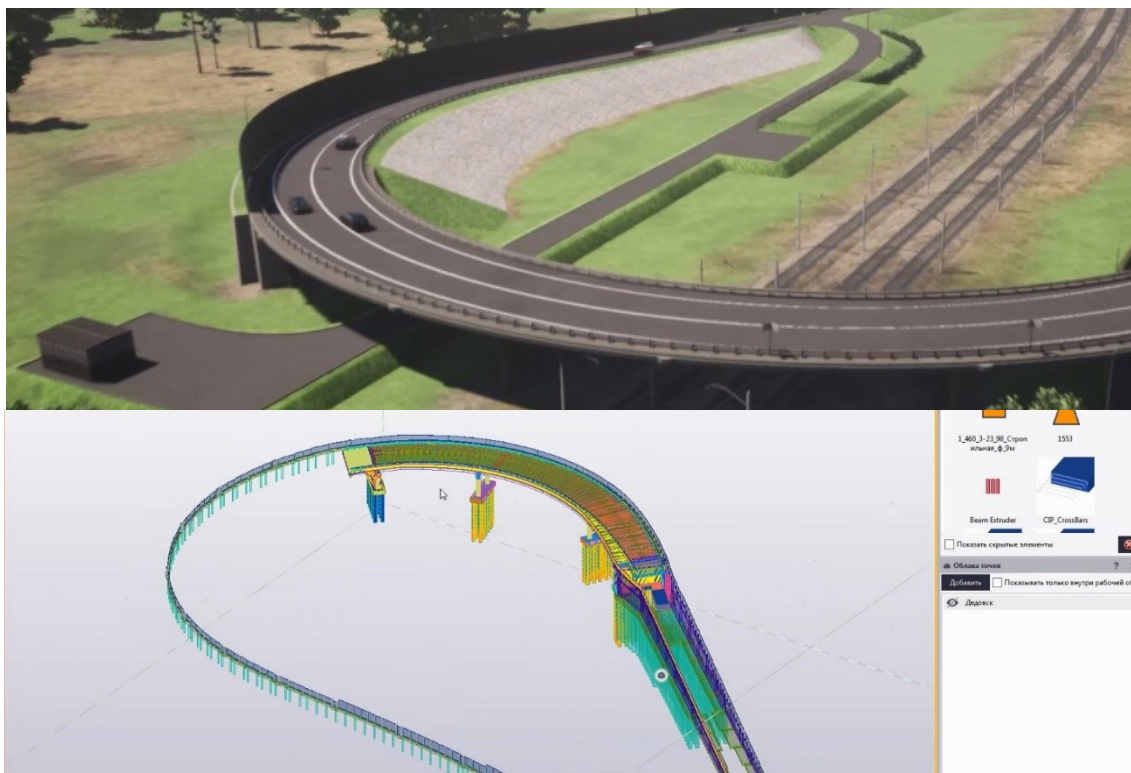
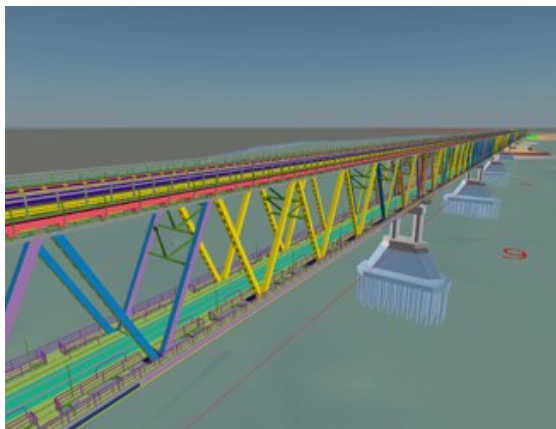


Рис. 2. Общий вид цифровой информационной модели

Некоторые проектные организации полностью перешли в «цифру». Например, институт ГИПРОСТОЙМОСТ перешел на применение ТИМ и даже получил статус «ВІМ-лидер 2022». В портфолио института входят проекты мостового перехода через пролив Невельского (рисунок 3, а), мостового сооружения через реку Каму, моста через реку Москву- в створе Берегового проезда (рисунок 3, б) разработанные в программных комплексах.

а)



б)

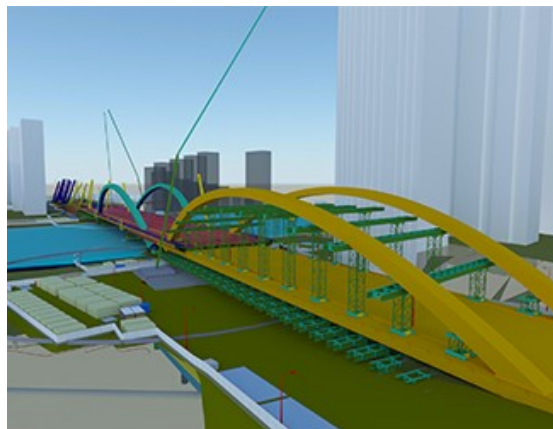


Рис.3. Общий вид цифровых информационных моделей
а) мост через пролив Невельского; б) мост через реку Москву

Отдельно стоит отметить программный комплекс (ПК) MStroy, разработанный специалистами ООО «МСтрой» (дочернее предприятие ОАО «Мострострой-11») в 2019 году. Это комплекс, предназначенный для управления строительными проектами. ПК обеспечивает оперативное принятие решений в случае возникновения отклонений и рисков, включает модули управления персоналом, субподрядчиками, техникой, графиком производства работ и 3D-визуализацию, кроме того, использует среду общих данных для всех участников проекта. Функционал ПК представлен на рисунке 4.

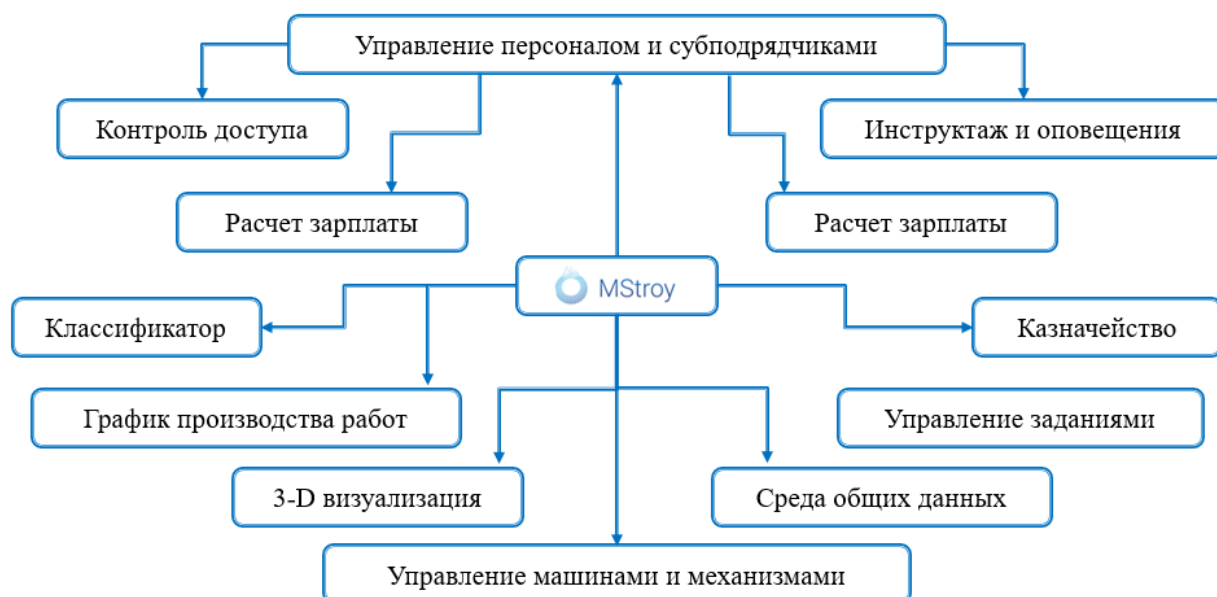


Рис.4. Функционал ПК MStroy

Одним из ключевых направлений нормативного развития ТИМ в мостостроении является формализация процесса формирования расчетной (аналитической) модели на основе цифровой информационной модели (ЦИМ). В настоящее время данный процесс, как правило, реализуется в рамках внутренних регламентов проектных организаций и не имеет нормативного закрепления. Это приводит к вариативности подходов, повышенной трудоёмкости и риску ошибок при ручной трансформации геометрической модели в аналитическую. Так, при реконструкции мостового сооружения через реку Бердь в г. Искитим Новосибирской области использование ТИМ позволило оптимизировать процесс проектирования за счет прямой выгрузки ЦИМ в аналитическую среду. Такой подход позволил специалистам проектной организации ООО «Изыскатель-МТ» провести прочностные расчеты без необходимости создания отдельной аналитической модели. По результатам расчетов было установлено, что замена балок пролетного строения для восприятия расчетных нагрузок не требуется – достаточно их усилить. Для экспорта ЦИМ в аналитический комплекс произведена идентификация конструктивных элементов, участвующих в восприятии нагрузок, то есть, декомпозиция элементов. Нормативные требования должны определять правила фильтрации несущих и конструктивных элементов. На первом этапе должны быть выделены укрупненные элементы: пролетные строения, концевые и промежуточные опоры, мостовое полотно и элементы технического обустройства. Затем выполняется детализация несущих подэлементов. Так, пролетные строения делятся на основные несущие конструкции (главные балки, ортотропная плита и т.д.), поперечные и продольные связи, опорные части. Опоры представлены оголовком (в свою очередь, делится на ригель/насадку, отмечается наличие шкафной стенки и открьлков), телом опоры и фундаментной частью. Элементами мостового полотна могут быть слои одежды ездового полотна, ограждения, деформационные швы и т. п., к элементам технического обустройства можно отнести системы электропитания, автоматизации, мониторинга и т. д. Далее происходит формирование расчетной схемы – замена пространственных (фактических) элементов на стержневые (формализованные, упрощенные), назначение граничных условий и типов опорных частей [8, 9]. Заключительным этапом стала передача данных в аналитическую систему «Парис» с применением формата «.mct» [10].

Следует отметить, что для создания ЦИМ использованы общие подходы для формирования и ведения информационной модели, описанные в нормативных документах, однако уровень проработанности и степень наполнения модели данными были назначены на основе накопленного методического опыта инженеров-мостовиков СибНИИ мостов в части разработки

аналогичных ЦИМ мостов [несколько примеров указаны в 11, 12]. На рисунке 5 показаны общий вид ЦИМ сооружения после реконструкции и фрагмент расчетной модели одного из пролетов.

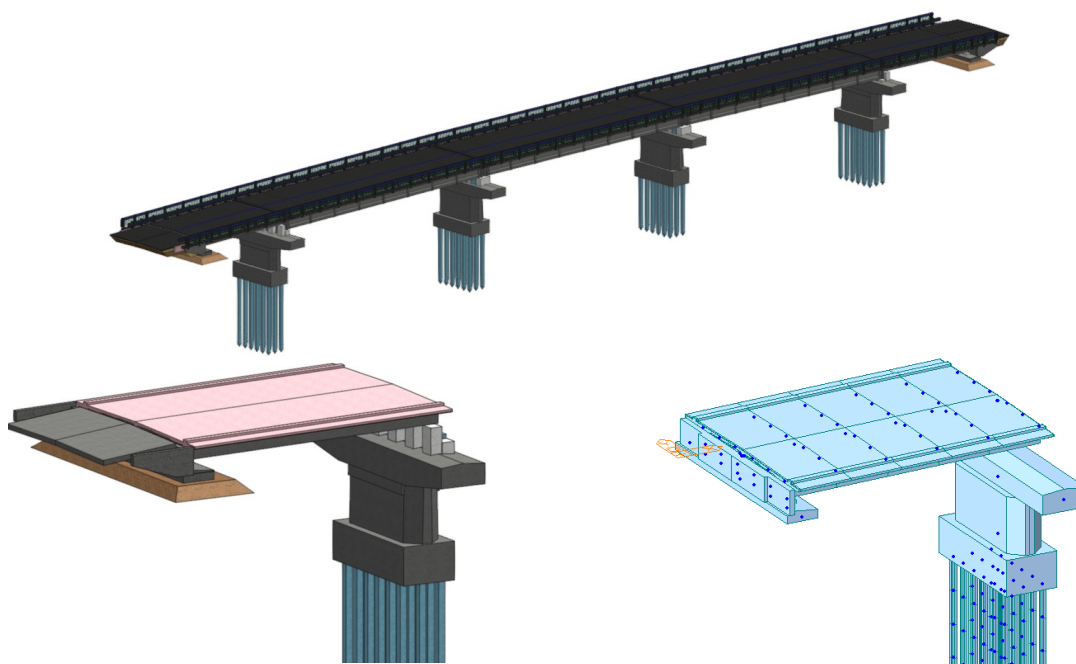


Рис.5. Общий вид ЦИМ сооружения и фрагмент расчетной модели пролета

Рекомендации по модернизации нормативной базы

Анализ текущего состояния нормативной базы [1] и практики применения ТИМ в мостостроении показывает, что дальнейшее развитие отрасли невозможно без системных изменений в нормативном регулировании. Модернизация должна носить комплексный характер и затрагивать как технические, так и организационно-методические аспекты.

Нормативная база должна рассматривать информационную модель моста не только как инструмент проектирования, но как элемент сопровождения всего жизненного цикла сооружения – от инженерных изысканий и проектирования до завершения строительства и возможно также для решения отдельных задач на стадии эксплуатации. Для этого необходимо нормативно закрепить требования к передаче и актуализации ЦИМ между стадиями жизненного цикла сооружения, а также к её использованию всеми участниками мостовой отрасли (проектировщики, строители, служба эксплуатации). Такой подход позволит использовать потенциал ТИМ в совокупности с уже применяемыми в службах эксплуатации информационными системами (например, АИС ИССО-Н) для мониторинга технического состояния сооружений и планирования ремонтных мероприятий [3].

С учетом специфики мостового хозяйства особое значение имеет связь геометрической информационной модели с расчетными схемами. В нормативных документах целесообразно зафиксировать требования к формированию аналитических моделей на основе ЦИМ и к обмену данными между платформами для информационного моделирования и расчетными комплексами. Это позволит снизить трудоёмкость проектирования, минимизировать ошибки при ручном вводе данных и повысить согласованность принимаемых инженерных и архитектурных решений. На текущий момент специалистами Сибирского научно-исследовательского института мостов СГУПС проводятся работы по актуализации информационной аналитической системы управления диагностикой и мониторингом искусственных сооружений для компании ОАО «РЖД» (АСУ ДМ ИССО). Предусматривается автоматизированное формирование расчетных моделей типовых несущих конструкций сооружений с последующим определением условий пропуска нагрузок по результатам расчета. Однако такой уровень автоматизации процессов ТИМ на данном этапе реализуется только для эксплуатируемых сооружений, имеющих широкий набор данных, уже хранящихся в информационных системах [13].

Для создания более благоприятных условий внедрения ТИМ необходимо предварительно реализовать формирование библиотек параметрических типовых элементов мостовых сооружений (опоры, пролётные строения, деформационные швы, опорные части и др.), адаптированных под требования отечественных норм. В частности, в рамках развития программного комплекса «Инфра» компанией «Нелинейность» ведётся поэтапная разработка параметрических библиотек элементов линейных искусственных сооружений, ориентированных на использование в среде информационного моделирования с учетом требований российских норм проектирования. Однако готовые решения носят преимущественно прикладной характер и не сопровождаются нормативным закреплением требований к структуре, составу атрибутивных данных и правилам параметризации, что ограничивает их масштабируемость на отраслевом уровне. В нормативных документах следует закрепить требования к таким библиотекам, включая их параметризацию, классификацию и совместимость с различными программными продуктами. При этом целесообразно совместное участие профильных отраслевых институтов и разработчиков программного обеспечения в разработке и поддержке базовых библиотек, что позволит избежать фрагментации и закрытости решений.

Поскольку применение ТИМ уже закреплено на уровне государственных требований, целесообразным представляется расширение мер поддержки проектных и изыскательских организаций. К таким мерам можно отнести финансирование пилотных проектов в мостостроении, субсидирование обучения специалистов, а также поддержку разработки отечественного программного обеспечения, ориентированного на линейные искусственных сооружения. Нормативное закрепление подобных механизмов позволит сократить разрыв между формальными требованиями и реальными возможностями их исполнения.

Внедрение указанных мер потребует координации между государственными органами, научно-исследовательскими институтами и проектными организациями. Системная модернизация нормативной базы и целенаправленная поддержка цифровых технологий станут ключевыми факторами, обеспечивающими более широкое интегрирование ТИМ в мостостроение. Это, в свою очередь, позволит повысить качество проектной документации, ускорить процессы согласования проектов, снизит как сроки реализации проектов, так и финансовые риски при возведении сложных инженерных сооружений.

Список использованных источников

1. Ефимов, С. В. Особенности нормативного регулирования в сфере применения технологии информационного моделирования мостовых сооружений / С. В. Ефимов, А. В. Паторняк, Н. В. Козак // Вестник гражданских инженеров. – 2025. – № 1(108). – С. 101-110.
2. Чжо, З. А. Технология информационного моделирования эксплуатируемых мостов в Республике Мьянма : специальность 05.23.11 "Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чжо Зин Аунг, 2019. – 112 с.
3. Martinez M., et al. Building Information Modeling Uses and Complementary Technologies in Road Projects: A Systematic Review // Buildings. 2024. Vol. 14(3). P. 38.
4. QECAD. BIM in Road & Highway Design: Transforming Infrastructure // QECAD CADBlog. 2025. Available at: <https://www.qecad.com/cadblog/how-bim-is-revolutionizing-road-and-highway-infrastructure-design/> (accessed Dec. 20, 2025).
5. Ефимов, С. В. Проблемы внедрения технологий информационного моделирования в России на примере разработки проекта реконструкции путепровода / С. В. Ефимов, И. В. Чаплин, Е. С. Кокоева // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 226-237.
6. Alsofiani, M. A. Digitalization in Infrastructure Construction Projects: A PRISMA-Based Review of Benefits and Obstacles // arXiv. 2024. Vol. 2405.16875.
7. Cao Y., et al. Building Information Modeling Applications in Civil Infrastructure: A Bibliometric Analysis from 2020 to 2024 // Buildings. 2024. Vol. 14(11).

8. Jia, J., et al. An automatic Generation Method of Finite Element Model Based on BIM and Ontology. *Buildings*. 2022. 12(11). P. 15.
9. Rudenko, I., & Petryna, Y. An Approach to Automatic BIM-Based Generation of Finite Element Models of Different Complexity and Finite Element Dimensionality. *Buildings*. 2025. 15(2). P. 16.
10. Жунев, К. О. Применение программы ПАРИС при проектировании автодорожного моста / К. О. Жунев, И. В. Засухин // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных : сборник материалов IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к 95-летию основания ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, 24 апреля – 25 2025 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2025. – С. 530-534.*
11. Ефимов, С. В. Применение технологии информационного моделирования при разработке проекта ремонта мостового сооружения / С. В. Ефимов, А. В. Паторняк, И. В. Чаплин // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2024. – № 3(60). – С. 113-121.*
12. Ефимов, С. В. Проблемы внедрения технологий информационного моделирования в России на примере разработки проекта реконструкции путепровода / С. В. Ефимов, И. В. Чаплин, Е. С. Кокоева // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 226-237.*
13. Чаплин, И. В. Совершенствование системы эксплуатации искусственных сооружений за счет применения цифровых двойников на примере железнодорожного моста / И. В. Чаплин, А. В. Паторняк, С. В. Ефимов // *Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22, № 3. – С. 831-838.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДЛЯ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОЦЕМЕНТА, ИЗГОТОВЛЕННОГО В ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ

А. В. Бахарева, Д.А. Ланис, П.О. Ломов

Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук,
191, Новосибирск, 630049, Россия

Аннотация: В работе представлены результаты лабораторных испытаний грунтоцементных образцов, твердевших в двух различных средах: в воздушно-сухих условиях при комнатной температуре (эталон) и в полностью водонасыщенном состоянии (в воде). Установлено, что наличие воды в период твердения снижает прочность при сжатии в среднем на 25–30 % относительно образцов стандартного твердения. Предложен поправочный коэффициент $K_{вод}$, позволяющий корректировать расчетные сопротивления грунтоцемента при проектировании элементов, работающих в условиях постоянного водонасыщения.

Ключевые слова: грунтоцемент, твердение в воде, прочность на сжатие, поправочный коэффициент, нормативные документы, водонасыщение.

Experimental Determination of a Correction Factor for the Strength of Soil-Cement Produced in Water-Saturated Ground Conditions

A. V. Bakhareva, D.A. Lanis, P.O. Lomov

Siberian transport university, 191 Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049, Russia

Abstract: This paper presents the results of laboratory tests on soil-cement specimens cured in two different environments: under air-dry conditions at room temperature (reference) and in a fully water-saturated state (submerged in water). It was found that the presence of water during the curing period reduces the compressive strength by an average of 25–30% compared to specimens subjected to standard curing conditions. A correction factor K_w is proposed to adjust the design resistance of soil-cement elements operating under permanent water saturation.

Keywords: soil-cement; curing in water; compressive strength; correction factor; design codes; water saturation.

Грунтоцемент является одним из наиболее востребованных материалов в современной геотехнической и гидротехнической практике. Благодаря возможности использования местного грунта, регулируемым прочностным и деформационным характеристикам, а также относительной технологической простоте, грунтоцементные конструкции широко применяются при устройстве буросекущих и буронабивных свай, противодиффузионных завес, укреплении откосов, стабилизации оснований методом глубинного смешения [1]. Во всех перечисленных случаях материал формируется и в дальнейшем эксплуатируется в непосредственном контакте с грунтовыми или поверхностными водами, нередко – в условиях полного водонасыщения [2].

Действующие нормативные документы, в частности [2, 3] и ведомственные методики регламентируют определение прочностных характеристик грунтоцемента по результатам испытаний образцов, твердевших в нормальных

(воздушно-сухих) условиях: при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха 60 ± 5 %. Такой подход обеспечивает воспроизводимость и стандартизацию результатов, однако не учитывает реальные условия твердения и эксплуатации значительной части грунтоцементных элементов, которые находятся ниже уровня грунтовых вод, в зоне фильтрационного потока или в теле гидротехнических сооружений [4].

При твердении в водонасыщенной среде процессы гидратации цемента протекают иначе, чем на воздухе. В результате прочность грунтоцемента, твердеющего в воде, может отличаться от прочности образцов, твердение которых происходит в нормальных условиях. Тем не менее, в действующих строительных правилах отсутствуют поправочные коэффициенты, позволяющие перейти от эталонных значений прочности к расчетным для водонасыщенных условий. Это приводит к риску завышения несущей способности проектируемых элементов и, как следствие, к снижению надежности и долговечности конструкций [5, 6].

Целью настоящей работы является экспериментальное обоснование поправочного коэффициента $K_{\text{вод}}$ для определения прочностных и деформационных характеристик грунтоцемента, изготовленного в водонасыщенных грунтах для последующего использования в инженерных расчетах.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изготовить серии образцов грунтоцемента.
2. Испытать образцы на одноосное сжатие в возрасте 28 суток.
3. Выполнить статистическую обработку материалов лабораторных испытаний с учетом ГОСТ 28570-2019 [3].
4. Установить и обосновать значение поправочного коэффициента $K_{\text{вод}}$ для инженерных расчетов.

Поправочный коэффициент $K_{\text{вод}}$ рассматривается для конкретного применяемого в исследовании грунта: супеси песчанистой, твердой, с числом пластичности от 1 до 7, модулем упругости (E) – 20 МПа, коэффициентом Пуассона (η) – 0,27, удельным весом (γ) – 19 кН/м³, углом внутреннего трения 25° , удельным сцеплением грунта (c) равным 2 кПа.

В рамках лабораторных испытаний представлена следующий состав использованных материалов на 1 м³ грунтоцемента:

- 1500 кг грунта, а именно супесь песчанистая, твердая с числом пластичности от 1 до 7;
- 300 кг цемента М400;
- 540 л воды.

Были изготовлены две серии образцов:

Серия В – образцы, твердение которых происходило в водонасыщенном состоянии ($S_R \sim 1,0$).

Серия С – образцы, твердение которых происходило в сухом состоянии, при комнатной температуре ($S_R \sim 0,5$).

Испытание образцов на примере серии С показаны на *рис. 1*.



Рис. 1. Разрушение образца

Результаты испытаний образцов представлены в *табл. 1*.
Табл. 1 – Результаты испытаний

Образец	Диаметр, мм	Высота, мм	h/d	Переходный коэффициент, η_1	Полное напряжение при разрушении образца σ_f , МПа	Прочность на одноосное сжатие R_{stb} , МПа
В-1	45	60	1,33	1,10	4,0	4,4
В-2	45	59	1,31	1,10	3,8	4,2
В-3	45	60	1,33	1,10	3,5	3,9
В-4	45	60	1,33	1,10	3,9	4,3
В-5	45	60	1,33	1,10	3,7	4,1
В-6	45	59	1,31	1,10	3,9	4,3
С-1	45	55	1,22	1,08	5,3	5,7
С-2	45	55	1,22	1,08	5,1	5,5
С-3	45	52	1,15	1,08	4,8	5,2
С-4	45	56	1,24	1,08	5,0	5,4
С-5	45	55	1,22	1,08	4,9	5,3
С-6	45	56	1,24	1,08	5,0	5,4

Установленный переходный коэффициент η_1 , который определен в зависимости от соотношения высоты образца к его диаметру, применяют при переходе от прочности испытанного образца к прочности бетона в образце стандартного размера и формы:

$$R_{stb} = \frac{F_{\max}}{A} \eta_1 \quad (1)$$

Таким образом, среднестатистическое значение водонасыщенных образцов ($S_R \sim 1,0$) равно 3,8 МПа, а среднестатистическое значение образцов с $S_R \sim 0,5$ равно 5,4 МПа.

Вычислим значение поправочного коэффициента $K_{вод}$, как соотношение этих величин:

$$K_{вод} = \frac{3,8}{5,4} = 0,7$$

Значение модуля деформации грунтоцемента E_{stb} должно назначаться на основании отбора и испытания зерна при проведении опытных работ. До проведения указанных испытаний при проведении численного моделирования при определении значения модуля деформации грунтоцемента E_{stb} допустимо использовать формулу:

$$E_{stb} \approx k_t R_{stb} \quad (2)$$

Коэффициент k_t принимается равным 400 в соответствии с [3] для песков средней крупности и крупных. Результаты расчета модуля упругости, E_{stb} представлены на *рис. 2, 3*.



Рис. 2. Значения модулей упругости образцов по серии В

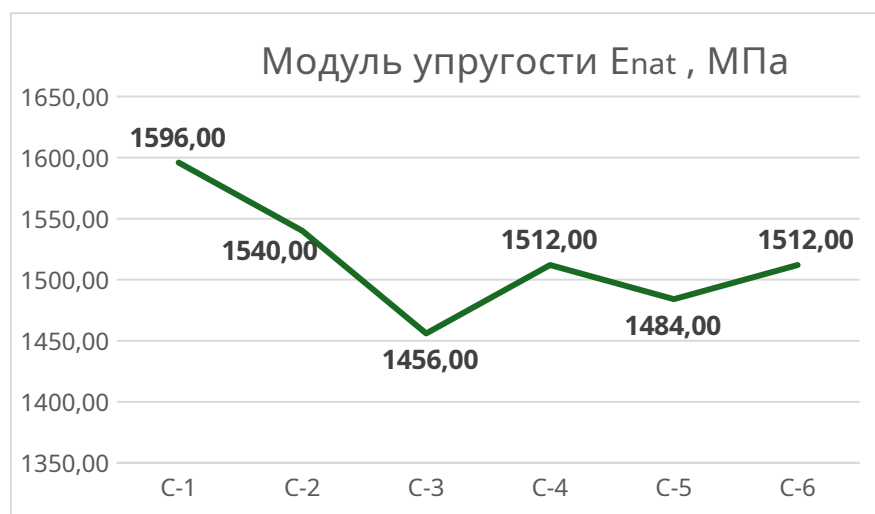


Рис. 3. Значения модулей упругости образцов по серии С

Среднестатистические значения модуля упругости составили: $E_{\text{sat}} = 1180$ МПа, $E_{\text{nat}} = 1520$ МПа.

Полученные данные были внесены в расчетную модель программного комплекса Midas GTS NX с одинаковыми инженерно-геологическими условиями. Также для расчета было принято следующее техническое задание: усиление грунтов выполнять буронабивными сваями из грунтоцемента длиной 10 м и диаметром 600 мм, с шагом 1,9 м, ширина ростверка проектируемого здания - 20 м, нагрузка на него составляет 300 кПа. Рассматриваемая сжимаемая толща грунтов составляет 22 м. Вид расчетной модели показан на рис. 4.

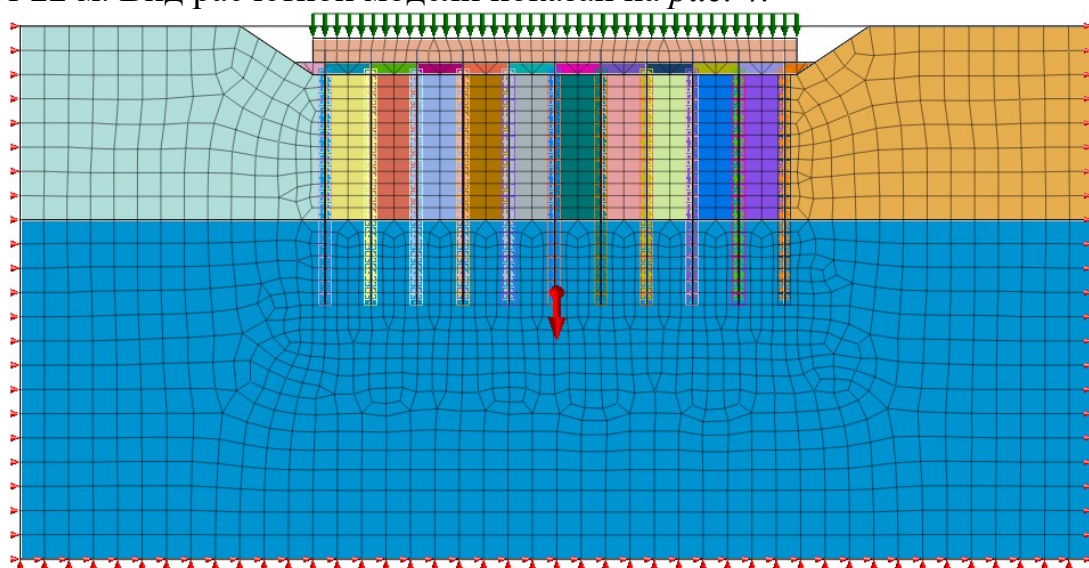


Рис. 4. Вид расчетной модели

Расчет в программном комплексе выполняется в несколько стадий:

стадия 1 – начальная, где моделируется выемка котлована;

стадия 2 – на этой стадии моделируется ситуация выполненного усиления грунтоцементными буронабивными сваями;

стадия 3 – на этой стадии моделируется ситуация нагружения усиления от будущего здания, на ростверк действует нагрузка 300 кПа.

По стадии 3 анализируется полученная осадка от нагрузки для обеих серий образцов.

По результатам расчета максимальная осадка для образцов серии В составила 10,97 см. Деформированный вид расчетной модели представлен на рис. 5.

По результатам расчета максимальная осадка для образцов серии С составила 9,15 см. Деформированный вид расчетной модели представлен на рис. 6.

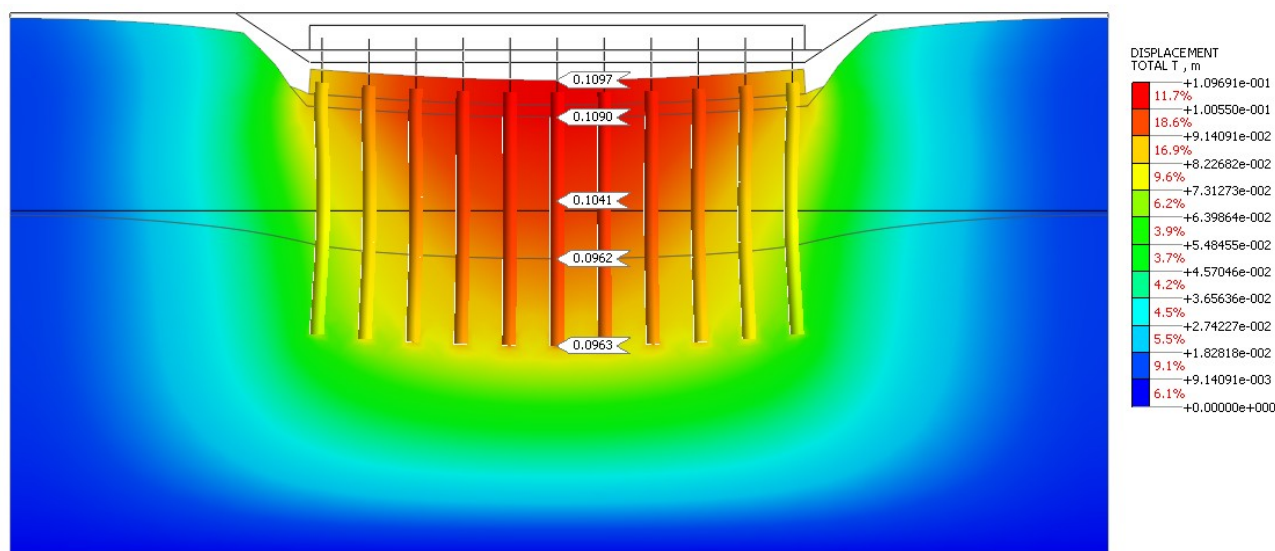


Рис. 5. Деформированный вид модели по серии В

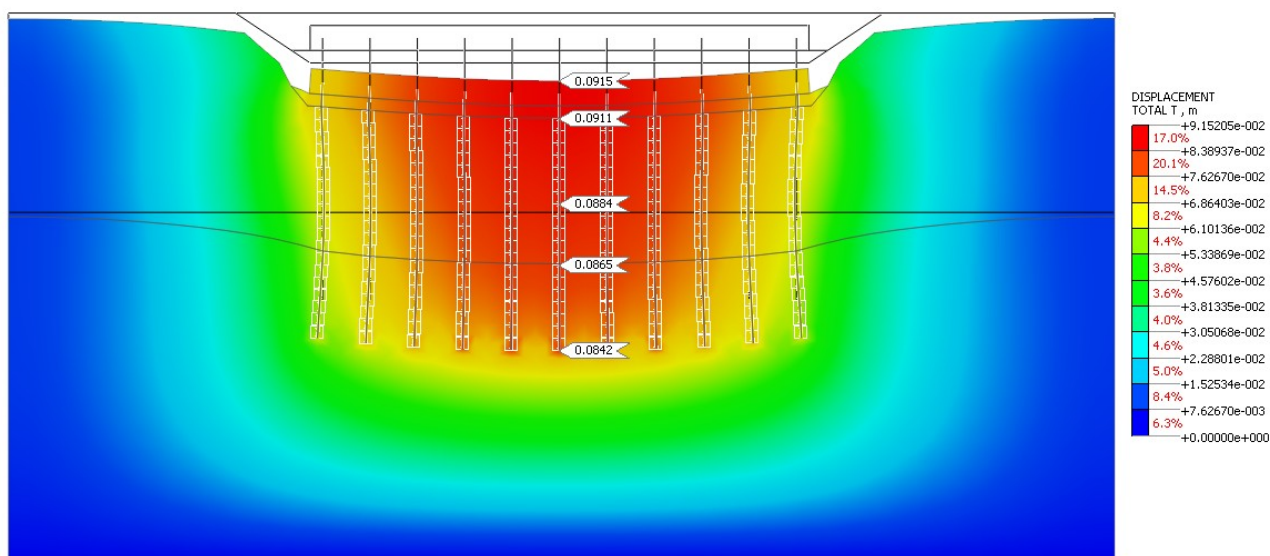


Рис. 6. Деформированный вид модели по серии С

В результате проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Экспериментальные данные позволили определить поправочный коэффициент $K_{\text{вод}}$ для грунтоцементных элементов, твердеющих в водонасыщенных грунтах.

2. Водонасыщение снижает темпы набора прочности и жесткости грунтоцементных элементов. Предложенный коэффициент $K_{\text{вод}}$ позволяет оценить влияние условий изготовления и твердения для грунтов с $S_R > 0,5$.

3. Экспериментально подтверждено, что численное значение осадки грунтоцементных элементов в водонасыщенных грунтах больше на 15 – 20 %, чем при стандартных условиях изготовления.

Стоит отметить, что водонасыщение является дестабилизирующим фактором и при создании грунтоцементных элементов в условиях полного водонасыщения, для достижения заданных проектом прочностных и деформационных характеристик в водонасыщенном состоянии требуется повышенное содержание

цемента по сравнению с тем же грунтом, эксплуатируемым в условиях частичного водонасыщения или осушенным [7].

Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что пренебрежение поправочным коэффициентом $K_{\text{вод}}$ в проектировании отдельных случаев может привести к отклонениям, которые могут стать причиной аварийных ситуаций, обрушений и превышений критических значений осадки [8 – 10].

Библиографический список

1. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения: свод правил: утвержден и введен в действие Приказом Минрегиона РФ от 29.12.2011 № 635/пр: редакция от 19.09.2024. – URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения 15.05.2026)
2. СП 291.1325800.2017. Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования: свод правил: утвержден и введен в действие Приказом Минстроя России от 15 мая 2017 г. № 785/пр: дата введения 2017-09-02: редакция от 29 июля 2024 г. – URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения 15.06.2026).
3. ГОСТ 28570-2019. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций: межгосударственный стандарт: издание официальное: взамен ГОСТ 28570-90; введ. в действие Приказом Росстандарта от 28.01.2020 № 26-ст. – URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения 15.06.2026).
4. Харченко И. Я., Богомолова О. В. Строительно-технологические особенности применения струйной цементации грунтов при устройстве противодиффузионных завес /И.Я. Харченко, О.В. Богомолова // Жилищное строительство. 2014. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21274692> (дата обращения 16.06.2026).
5. Гладков И. Л., Жемчугов А. А., Малинин Д. А. Технология струйной цементации грунтов в условиях плотной городской застройки /И.Л. Гладков, А.А. Жемчугов, Д.А. Малинин// Жилищное строительство. 2013. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20391174> (дата обращения 16.06.2026)
6. ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения: межгосударственный стандарт: издание официальное: взамен ГОСТ 30416-96; введ. в действие Приказом Росстандарта от 20.11.2020 № 1118 ст. – URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения 16.06.2026)
7. СП 250.1325800.2016. Здания и сооружения. Защита от подземных вод: свод правил: утвержден и введен в действие Приказом Минстроя России от 16.06.2016 № 432/пр: дата введения 2017-06-17. – URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения 15.06.2026).
8. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*: свод правил: утвержден и введен в действие Приказом Минстроя России от 24.05.2018 № 309/пр: редакция от 19.09.2024. – URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения 15.06.2026).
9. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий: свод правил: утвержден и введен в действие Приказом Минстроя России от 16.06.2016 № 428/пр: редакция от 19.09.2024. – URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения 16.06.2026).
10. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства: свод правил: принят и введен в действие Письмом Госстроя России от 29.12.1997 № 9-12/215. – URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения 15.06.2026).

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ КОРРОЗИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.

Б.Б. Жаналиев, И.Г. Овчинников
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38
E-mail: zhanaliiem2211@mail.ru

Аннотация В статье рассмотрены современные подходы к моделированию поведения армированных (железобетонных) конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред. Проанализированы феноменологический, диффузионный, конечно-элементный и вероятностный методы моделирования. Показано, что комплексный учет физико-химических процессов деградации материалов позволяет повысить точность прогнозирования долговечности и несущей способности конструкций. Особое внимание уделено моделированию коррозионных процессов, вызванных хлоридной агрессией и карбонизацией бетона.

Ключевые слова: армированные конструкции, агрессивная среда, коррозия арматуры, математическое моделирование, метод конечных элементов, диффузия хлоридов, вероятностный подход, долговечность.

MODERN APPROACHES TO MODELING THE CORROSION DEGRADATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES.

B.B. Zhanaliyev, I.G. Ovchinnikov
Tyumen Industrial University
625000, Tyumen, Voldarsky St., 38
E-mail: zhanaliiem2211@mail.ru

Abstract: This article examines modern approaches to modeling the behavior of reinforced concrete structures exposed to aggressive environments. Phenomenological, diffusion, finite element, and probabilistic modeling methods are analyzed. It is shown that integrated consideration of the physical and chemical degradation processes of materials allows for more accurate predictions of the durability and load-bearing capacity of structures. Particular attention is paid to modeling corrosion processes caused by chloride attack and carbonation of concrete.

Keywords: reinforced structures, aggressive environment, reinforcement corrosion, mathematical modeling, finite element method, chloride diffusion, probabilistic approach, durability.

Введение

Проблема обеспечения долговечности железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, является одной из наиболее актуальных задач современного строительного материаловедения и механики конструкций [4]. Основными факторами, вызывающими деградацию армированных конструкций, являются хлоридная агрессия, карбонизация бетона, воздействие газовой среды, содержащих кислые газы, а также их совместное действие. Коррозия стальной арматуры, вызванная проникновением агрессивных агентов через защитный слой бетона, приводит к снижению несущей способности, нарушению сцепления арматуры с бетоном и, в конечном счете, к разрушению конструкции.

В силу отсутствия достаточно надежной физической теории, позволяющей корректно описать поведение материалов в агрессивных средах, в настоящее время возникает необходимость использования различных подходов к моделированию. В данной работе рассматриваются основные способы моделирования поведения армированных конструкций в агрессивной среде [1].

Феноменологический подход к моделированию

Феноменологический подход является одним из наиболее распространенных методов описания поведения армированных конструкций в агрессивных средах. При построении моделей деформирования и разрушения конструкций в присутствии агрессивной среды обычно используются методы механики сплошной среды и феноменологической термодинамики необратимых процессов [1].

Согласно феноменологическому подходу, обобщенная модель деформирования конструктивного элемента с учетом его взаимодействия с агрессивной средой представляется в виде совокупности следующих моделей [1]:

- 1) **Модель конструктивного элемента** — описывает геометрию и расчетную схему конструкции (например, модель пластины по технической теории изгиба).
- 2) **Модель нагружения** — определяет схему и программу приложения внешних нагрузок.
- 3) **Модель деформирования материалов** — учитывает физико-механические свойства бетона и арматуры, включая анизотропию, разносопротивляемость растяжению и сжатию [2].
- 4) **Модель воздействия агрессивной среды** — описывает кинетику проникновения агрессивных агентов и их влияние на свойства материалов.
- 5) **Модель разрушения** — трактует процесс разрушения как накопление повреждений.

Важной особенностью феноменологического подхода является включение в систему параметров, характеризующих состояние материала, не только механических, но и физико-химических параметров [1]. Это позволяет учитывать взаимосвязь между напряженно-деформированным состоянием и степенью агрессивного поражения материала.

Моделирование диффузии агрессивных сред

Наиболее корректным методом моделирования проникания агрессивной среды в объем конструктивного элемента является закон диффузии. Модель воздействия агрессивной среды на железобетон обычно включает:

- модель, описывающую проникание агрессивной среды в конструктивный элемент;
- зависимость механических характеристик бетона от параметров агрессивной среды в объеме конструкции;

- модель коррозии арматуры.

Процесс диффузии хлоридов широко используется для оценки долговечности железобетонных конструкций. При моделировании этого явления учитываются такие факторы, как карбонизация бетона, растрескивание защитного слоя и проникновение ионов хлора. Жидкие среды, содержащие хлорид-ионы, представляют наибольшую опасность для коррозии арматуры.

В работах [4] рассматривается моделирование деформирования дискретно-армированного материала (железобетона) в случае одновременного воздействия хлоридсодержащей среды и карбонизации. Такой подход позволяет учитывать синергетический эффект различных агрессивных факторов.

Конечно-элементное моделирование

Метод конечных элементов (МКЭ) является одним из наиболее эффективных инструментов численного моделирования поведения армированных конструкций в агрессивной среде. Конечно-элементное моделирование позволяет:

- оценить критическое значение коррозии стали арматуры с точки зрения возникновения опасных напряжений вследствие образования продуктов коррозии;
- моделировать процессы деформирования и разрушения бетонной матрицы под действием эксплуатационных нагрузок и коррозии арматуры[5];
- анализировать влияние коррозии на конструкционные характеристики элементов [3].

При конечно-элементном моделировании коррозионное воздействие может быть введено в расчетную модель различными способами. Один из подходов заключается в задании радиальных деформаций арматуры (эквивалентный нагрев с ненулевым коэффициентом температурного расширения только в радиальном направлении). Альтернативный подход предполагает моделирование изменения механических свойств арматуры: вместо снижения площади поперечного сечения армирования уменьшается модуль Юнга и предел текучести корродированной арматуры [3].

Численное моделирование показывает, что учет таких процессов, как коррозия арматуры и растрескивание бетонного защитного слоя, оказывает существенное влияние на аналитические результаты. Моделирование нелинейного поведения процессов коррозии позволяет прогнозировать направления раскрытия трещин в бетоне.

Вероятностные методы моделирования

Экспериментальные данные свидетельствуют о стохастическом характере работы железобетонных конструкций в агрессивных условиях эксплуатации. Это обусловлено случайным характером многих факторов: неоднородностью свойств

материалов, вариативностью параметров агрессивной среды, неопределенностью уровня нагрузок и др.

Вероятностное моделирование поведения армированных конструкций в агрессивных условиях эксплуатации позволяет:

- ❖ учитывать неопределенность прочностных характеристик материалов и приложенных нагрузок;
- ❖ оценивать вероятность наступления предельных состояний с учетом коррозионного износа и фактора времени;
- ❖ прогнозировать комплексную деградацию конструкций с учетом различных механизмов коррозионного износа.

В работах по вероятностному расчету железобетонных элементов учитываются случайные свойства расчетных параметров, что позволяет более обоснованно подходить к оценке надежности и остаточного ресурса конструкций.

Заключение

Анализ современных подходов к моделированию поведения армированных конструкций в агрессивной среде позволяет сделать следующие выводы:

В связи с отсутствием единой физической теории, описывающей поведение материалов в агрессивных средах, наиболее распространенным является феноменологический подход, интегрирующий методы механики сплошной среды и термодинамики необратимых процессов.

Моделирование диффузии агрессивных агентов (прежде всего хлоридов) в бетонном защитном слое является основой для прогнозирования начала и интенсивности коррозии арматуры.

Конечно-элементное моделирование позволяет проводить детальный анализ напряженно-деформированного состояния коррозионно-поврежденных конструкций с учетом изменения механических свойств материалов и нарушения сцепления арматуры с бетоном.

Вероятностные методы дают возможность учитывать стохастическую природу процессов деградации и обоснованно оценивать надежность и остаточный ресурс конструкций.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка комплексных моделей, объединяющих физико-химические, механические и вероятностные подходы для более точного прогнозирования долговечности армированных конструкций в агрессивных средах.

Библиографический список

1. Овчинников И.И. Современное состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред // Internet Journal "Construction of Unique Buildings and Structures". – 2012. – № 2.

2. Овчинников И.И. Расчет напряженно-деформированного состояния и поврежденности армированной пластины в хлоридсодержащей среде // Строительная механика и расчет сооружений.

3. Леонович С.Н. Механика долговечности конструкционного бетона: новый подход к явлению деградации. Ч. 2. Коррозия арматуры // Строительные материалы. – 2024.

4. Селяев В. П. Расчет долговечности железобетонных конструкций // Вестник МГУ. 2008. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-dolgovechnosti-zhelezobetonnyh-konstruktsiy> (дата обращения: 16.06.2026).

5. Белов Вячеслав Вячеславович, Никитин Станислав Евгеньевич Верификация расчетной модели деформирования коррозионно-поврежденных железобетонных конструкций // Глобальная энергия. 2011. №4 (135). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-raschetnoy-modeli-deformirovaniya-korrozionno-povrezhdennyh-zhelezobetonnyh-konstruktsiy> (дата обращения: 16.06.2026).