

научно-технический

журнал

ISSN 2220-4245

ИЗВЕСТИЯ

№ 2(62)

2025

Транссиба

Юбилейный выпуск, посвященный 125-летию
Омского государственного университета путей сообщения



К 125-летию Омского государственного университета путей сообщения

Уважаемые читатели!

В 2025 году исполняется 125 лет со дня основания Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС) – одного из ведущих транспортных вузов России, подведомственных ФАЖТу (Росжелдору).

В настоящее время ОмГУПС – это университетский комплекс, который уже 125 лет готовит выпускников для железнодорожной и других отраслей по программам высшего и среднего профессионального образования.

Подготовка высококвалифицированных кадров невозможна без организации научной работы, поэтому наш университет уже много лет занимается научными исследованиями и разработками в сфере железнодорожного транспорта. За годы существования вуза были созданы научные школы по проблемам диагностики, надежности и ремонта подвижного состава, электрической тяги, энергосбережения и энергоэффективности на железнодорожном транспорте, развития системы токосъема для высокоскоростного движения. На основе развития данных научных направлений в вузе было принято решение об учреждении научно-технического журнала «Известия Транссиба», который издается уже 15 лет.

ОмГУПС в настоящее время активно развивается, наращивая свой потенциал с применением современных цифровых технологий и расширяя направления деятельности, решает новые научные и образовательные задачи, обеспечивая комфортные условия для всех, чья жизнь так или иначе связана с этим вузом – от студентов до профессоров.

В год своего 125-летия ОмГУПС твердо опирается на свои исторические традиции и не останавливается в своем развитии, а уверенно идет вперед и делает все возможное для подготовки успешного высококвалифицированного научно-технического кадрового потенциала страны.

Мы очень рады сотрудничеству с учеными и специалистами в области транспорта, и особенно приятно видеть среди них талантливую молодежь. Журнал «Известия Транссиба» готов в приоритетном порядке принять к рассмотрению Ваши статьи по проблемам и перспективам развития железнодорожного транспорта и промышленности.



*С уважением, ректор ОмГУПС, главный редактор
журнала «Известия Транссиба» С. М. Овчаренко*

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, советник при ректорате ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ (Омск).
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
4. Алексеев Виктор Михайлович – профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТа (МИИТа), д.т.н., профессор (Москва).
5. Бессоненко Сергей Анатольевич – профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» СГУПС, д.т.н., доцент (Новосибирск).
6. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
7. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. Гуда Александр Николаевич – проректор по научной работе РГУПС, д.т.н., профессор (Ростов-на-Дону).
10. Зыкина Анна Владимировна – заведующая кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. Исаков Александр Леонидович – зав. кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. Ким Константин Константинович – заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники и энергетики» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. Комяков Александр Анатольевич – профессор кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
14. Косарев Александр Борисович – первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
15. Кузнецов Андрей Альбертович – заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
16. Лебедев Виталий Матвеевич – д.т.н., профессор (Омск).
17. Никитин Александр Борисович – профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
18. Лившиц Александр Валерьевич – заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» ИРГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
19. Лю Цзиньцунь – доктор, профессор, заместитель декана Школы гражданского строительства университета Сунь Ятсена (Чжухай, Китай).
20. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
21. Сидоров Олег Алексеевич – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
22. Смердин Александр Николаевич – первый проректор, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
23. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Подвижной состав» АЛТ Университета имени Мухамеджана Тынышпаева, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. Файзибаев Шерзод Сабирович – профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ТТГУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
25. Харламов Виктор Васильевич – заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).

EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. Galiev Ilkham Islamovich – deputy chief editor, the advisor to the rector's office of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. Shantarenko Sergey Georgievich – deputy chief editor, professor of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Alekseev Viktor Mikhailovich – professor of the department of Information Control and Protection of RUT, D. Sc., professor (Moscow, Russia).
5. Bessonenko Sergey Anatolevich – professor of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., associate professor (Novosibirsk, Russia).
6. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
8. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Huda Alexander Nikolaevich – vice-rector for scientific-work of RSTU, D. Sc., professor (Rostov-on-Don, Russia).
10. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. Isakov Alexander Leonidovich – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
12. Kim Konstantin Konstantinovich – head of the department «Theoretical foundations of electrical engineering and power engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
13. Komyakov Aleksandr Anatolevich – professor of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
14. Kosarev Alexander Borisovich – senior deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
15. Kuznetsov Andrey Albertovich – head of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
16. Lebedev Vitaliy Matveyevich – D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. Nikitin Aleksandr Borisovich – professor of the department «Automation and telemechanics on railways» of PGUPS, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
18. Livshits Alexandr Valerievich – head of the department «Automation of Production Processes» of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
19. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
20. Paramonov Aleksandr Mikhailovich – professor of the department «Heat-power engineering» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
21. Sidorov Oleg Alexeevich – professor of the department «Power supply of railway transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
22. Smerdin Aleksandr Nikolaevich – the first vice-rector, vice-rector by scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
23. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Rolling stock» of ALT of Muxamedzhan Tyynshpaev University, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
24. Fayziybaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Locomotives and locomotive facilities» of TSTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
25. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Иванченко Владимир Иванович – ответственный секретарь, к.т.н. (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Галиев И. И., Николаев В. А., Серяков К. О. Улучшение показателей динамических качеств электровоза ЭЭС6 на основе совершенствования механической части..... 2

Управление процессами перевозок

- Розенберг Е. Н., Новиков В. Г. Перспективные архитектуры систем управления и обеспечения безопасности движения поездов..... 11
- Овчинников Р. А. Влияние скорости движения поезда на размеры потерь мелкодисперсных углей от выдувания..... 20
- Тимухин К. М., Пархоменко А. А., Лесных В. В. Имитационное моделирование – инструмент оценки проектирования транспортных объектов..... 29

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Сычева А. В., Овчинников Д. В., Сычев В. П. Влияние вязкого элемента, включенного в систему масс упругих элементов железнодорожного пути, на его жесткость..... 41
- Нейман В. А. Охлаждение рельсов: как избежать «горячей сердцевины» для точного закрепления в летний период..... 48

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

- Кочнева Д. И., Высотский С. В. Оценка и прогнозирование потерь в логистической цепи железнодорожных контейнерных перевозок..... 59
- Шерматов Э. С. Оптимальная организация суточной работы станции на основе сетевого графика..... 66
- Витовская В. В., Гателюк О. В. О прогнозировании расхода электроэнергии на тягу поездов с использованием регрессионных моделей, дифференцированных по типам грузовых поездов..... 80

Теоретическая и прикладная теплотехника

- Парамонов А. М. Оптимизация параметров тепловой работы и конструкции печной установки с камерным температурным режимом тепловой обработки металла..... 90

Энергетические системы и комплексы

- Мятеж Т. В., Секретарев Ю. А., Донченко С. С., Капустин В. А., Сурков П. Е. Оптимизация режимов работы водохозяйственного комплекса на основе определения синергетической стоимости гидроресурса..... 103
- Губарев В. Я., Бавыкин М. А., Ярцев А. Г. Применение конверсии природного газа в высокотемпературной среде..... 117

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Дробязко А. С., Рыжаков С. А., Мудрая Н. Г. Анализ сигналов, формируемых магнитным датчиком обнаружения приближающегося состава, в системе оповещения работающих на железнодорожных путях..... 127
- Болтаев С. Т., Жоникулов Э. Ш., Мухиддинов О. О. Совершенствование метода местного управления и контроля стрелочных переводов на железнодорожных станциях с применением беспроводных технологий..... 137

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies»

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ))»

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

И. И. Галиев, В. А. Николаев, К. О. Серяков

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭС6 НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Аннотация. В данной статье рассмотрены методы совершенствования механической части грузовых магистральных электровозов серии 2ЭС6 «Синара» для улучшения показателей их динамических качеств и тяговых свойств. Согласно статистическим данным, за 2024 год случаи выхода из строя механического оборудования электровозов 2ЭС6 находятся на третьем месте по количеству неисправностей, что составляет 8,5 % от общего количества неплановых ремонтов. Данный факт свидетельствует о несовершенстве конструкции механической части и необходимости ее модернизации. С помощью математического моделирования выполнена оценка динамических и тяговых качеств локомотивов с двумя видами рессорного подвешивания буксовой ступени (типовым и модернизированным). Установлено, что при скоростях от 40 до 100 км/ч у локомотива с компенсирующим устройством ускорения кузова в 2 раза, а тележки в 1,8 раза ниже, чем аналогичные показатели локомотива с типовой схемой обрессоривания. Предложена имитационная модель узла подвешивания ТЭД, позволяющая оценить показатели динамической нагруженности типовой и усовершенствованной схем подвешивания ТЭД локомотива 2ЭС6. Результаты моделирования показали, что концентраторами напряжений в корпусе ТЭД являются его опорные узлы, а именно, места крепления поводка и моторно-осевых подшипников. Результаты моделирования соответствуют статистическим данным отказов ТЭД по причине появления трещин в корпусе, что подтверждает адекватность модели. Предложена усовершенствованная конструкция системы подвешивания ТЭД к раме тележки электровоза 2ЭС6 для обеспечения снижения негативного воздействия динамических нагрузок на крепежные узлы ТЭД и механическую часть локомотива. Теоретические исследования усовершенствованной конструкции, проведенные с помощью математической модели, показали, что при скорости локомотива, равной 80 км/ч, максимальные напряжения в контрольных точках ТЭД снижаются в среднем на 30 % по сравнению с типовой схемой подвешивания.

Ключевые слова: механическая часть локомотива, динамика подвижного состава, колебания локомотива, тяговые и динамические качества локомотива, напряженное состояние узлов машин, износ, надежность.

Ikham I. Galiev, Viktor A. Nikolaev, Kirill O. Seryakov

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

IMPROVEMENT OF THE ELECTRIC LOCOMOTIVE 2ES6 DYNAMIC PERFORMANCE BASED ON IMPROVEMENT OF THE MECHANICAL PART

Abstract. This article discusses methods for improving the mechanical part of 2ES6 Sinara series freight mainline electric locomotives to improve their dynamic performance and traction properties. According to statistics, in 2024, mechanical equipment failures of 2ES6 electric locomotives ranked third in terms of the number of malfunctions, accounting for 8.5 % of the total number of unscheduled repairs. Using mathematical modeling, an assessment of the dynamic and traction qualities of locomotives with two types of spring suspension of the axlebox stage (standard and modernized) was made. It was found that at speeds from 40 to 100 km / h, the locomotive with a compensating device accelerates the body by 2 times, and the bogie by 1.8 times lower than similar indicators of a locomotive with a standard springing scheme. A simulation model of the traction motor suspension unit is proposed, which allows estimating the dynamic loading indices of the standard and improved traction motor suspension schemes of the 2ES6 locomotive. The simulation results showed that the stress concentrators in the traction motor housing are its support units, namely, the attachment points of the rod and motor-axial bearings. The simulation results correspond to the statistical data of traction motor failures due to the appearance of cracks in the housing, which confirms the adequacy of the model. An improved design of the traction motor suspension system to the bogie frame of the 2ES6 electric locomotive is proposed to reduce the negative impact of dynamic loads on the traction motor fastening units and the mechanical part of the locomotive. Theoretical studies of the improved design, carried out using a mathematical model, showed that at a locomotive speed of 80 km/h, the maximum stresses at the traction motor control points are reduced by an average of 30 % compared to the standard suspension scheme.

Keywords: mechanical part of the locomotive, dynamics of rolling stock, locomotive vibrations, traction and dynamic qualities of the locomotive, stress state of machine components, wear, reliability.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В последние годы на сети российских железных дорог существует тенденция к увеличению массы грузовых поездов, что требует комплексного решения широкого круга задач, среди которых первостепенное значение имеют снижение износа колес железнодорожных экипажей и рельсов и повышение тяговых свойств локомотивов. Одним из основных средств снижения износа колес и рельсов является эффективное рессорное подвешивание экипажа, обеспечивающее его надежную защиту от вибрационных воздействий, стабилизацию силы давления колеса на рельс и снижение интенсивности накопления расстройств верхнего строения пути. Стабилизация силы давления колеса на рельс, в свою очередь, обеспечивает улучшение тяговых свойств локомотива.

В качестве объекта исследования были выбраны электровозы 2ЭС6 приписного парка Западно-Сибирской железной дороги (далее – Депо А). Согласно полученным статистическим данным за 2024 год случаи выхода из строя механического оборудования электровозов 2ЭС6 находятся на третьем месте по количеству неисправностей – 144 случая на 1 млн км пробега, что составляет 8,5 % от общего количества неплановых ремонтов (рисунок 1).

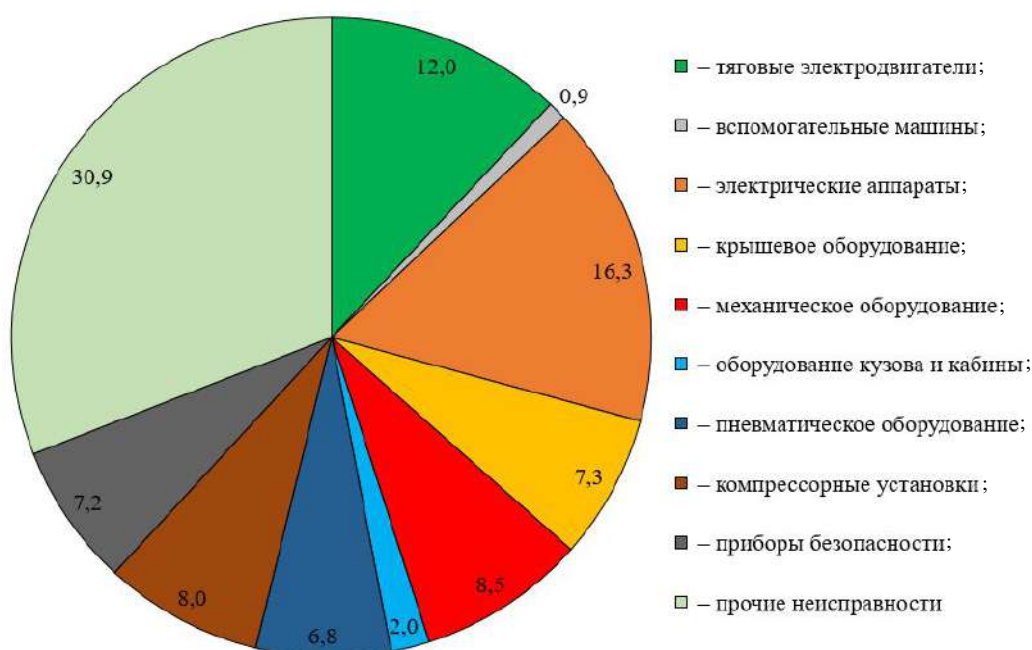


Рисунок 1 – Количество отказов оборудования электровозов 2ЭС6 за 2024 год (в процентах от общего числа)

Основная масса дефектов механической части приходится на бандажи колесных пар и опорные узлы тяговых электродвигателей, к числу которых относятся моторно-осевые подшипники (МОПы). Распределение неисправностей колесных пар представлено в таблице.

Неисправности колесных пар электровозов 2ЭС6 приписного парка депо А

Дефект	Количество дефектов на 1 млн км пробега (по годам)			
	2021	2022	2023	2024
По износу бандажа	2	7	16	10
По ползунам	1	1	2	1
По разнице диаметров	3	3	4	2
По кольцевой выработке	1	3	3	0
Излом болта корпуса МОПа	14	20	21	53
Излом корпуса МОПа	0	1	1	2
Неисправность подшипника МОПа	4	4	2	6
Итого	25	39	49	74

Статистика отказов свидетельствует о том, что конструкция механической части современных локомотивов имеет ряд недостатков. Существующее рессорное подвешивание, выполненное в виде винтовых пружин и гидродемпферов, характеризуется недостаточным статическим прогибом буксовой ступени, который составляет всего 75 мм. Причиной повышения уровня силового взаимодействия локомотива и пути является также несовершенство конструкции маятникового подвешивания тягового электродвигателя, что в свою очередь приводит к увеличению вибронагруженности узлов электровоза, к повышенному изнашиванию бандажей колес и рельсов, к увеличению разброса давления колеса на рельс и, как следствие, – к снижению реализуемой силы тяги.

Данные факторы обуславливают необходимость модернизации механической части локомотива с целью повышения тяговых и динамических качеств локомотива. Одним из эффективных способов снижения разброса давлений в системе «колесо – рельс» является модернизация рессорного подвешивания путем введения в буксовую ступень компенсирующего устройства. В данной схеме параллельно основным упругим элементам (цилиндрическим винтовым рессорам) в буксовую ступень введено компенсирующее устройство с изменяющейся жесткостью $q_6(z)$, функциональное назначение которого заключается в формировании динамической силы Q_6 , направленной на компенсацию динамической реакции основных упругих элементов [1 – 3]. Для анализа нагрузок, действующих на локомотив в процессе движения, а также для оценки эффективности применения компенсирующего устройства, составим математическую модель колебаний локомотива.

Математическая модель колебаний локомотива должна в полной мере описывать динамические процессы, протекающие в системе «локомотив – путь» и отражать ее наиболее важные характеристики [3]. При проведении математического моделирования динамики локомотива с целью упрощения расчетов примем ряд допущений:

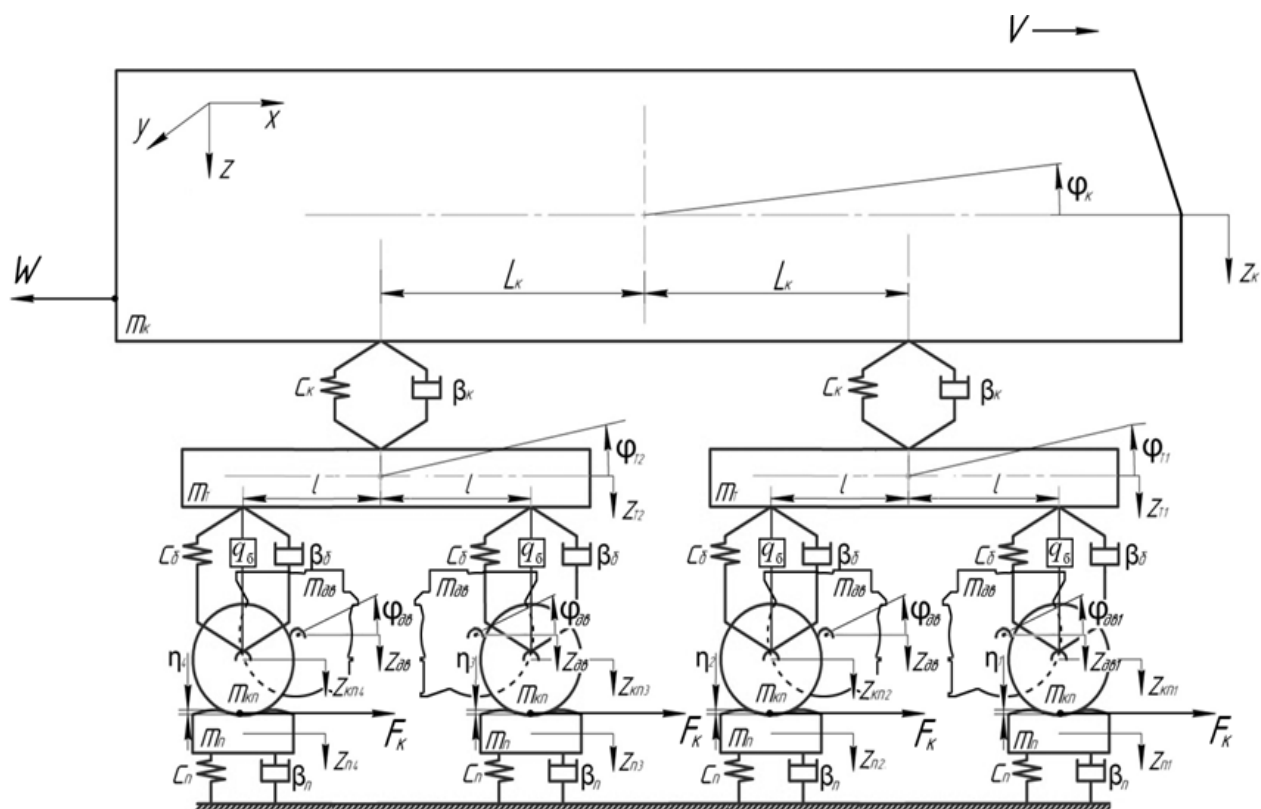
- 1) кузов, тележки и колесные пары считаем абсолютно твердыми телами;
- 2) колесные пары движутся по рельсам без отрыва;
- 3) при вертикальных колебаниях массы ТЭД распределяем поровну между массами тележек и колесных пар;
- 4) при горизонтальных (поперечных) колебаниях массу ТЭД приводим к колесной паре и определяем момент инерции ТЭД на основе теоремы Гюйгенса – Штейнера;
- 5) путь моделируем дискретной моделью (погрешность не более 12 %) [4];
- 6) экипаж является симметричным;
- 7) колебания являются малыми;
- 8) в качестве возмущающего воздействия принимаем случайное возмущение, спектральная плотность неровности которого предложена А. И. Беляевым [5, 6];
- 9) скорость движения локомотива постоянна.

Чтобы оценить влияние колебаний локомотива на реализуемую силу тяги, необходимо рассмотреть его как часть связанной системы «локомотив – путь» [6], находящейся под действием случайного возмущения. Расчетная схема системы приведена на рисунке 2.

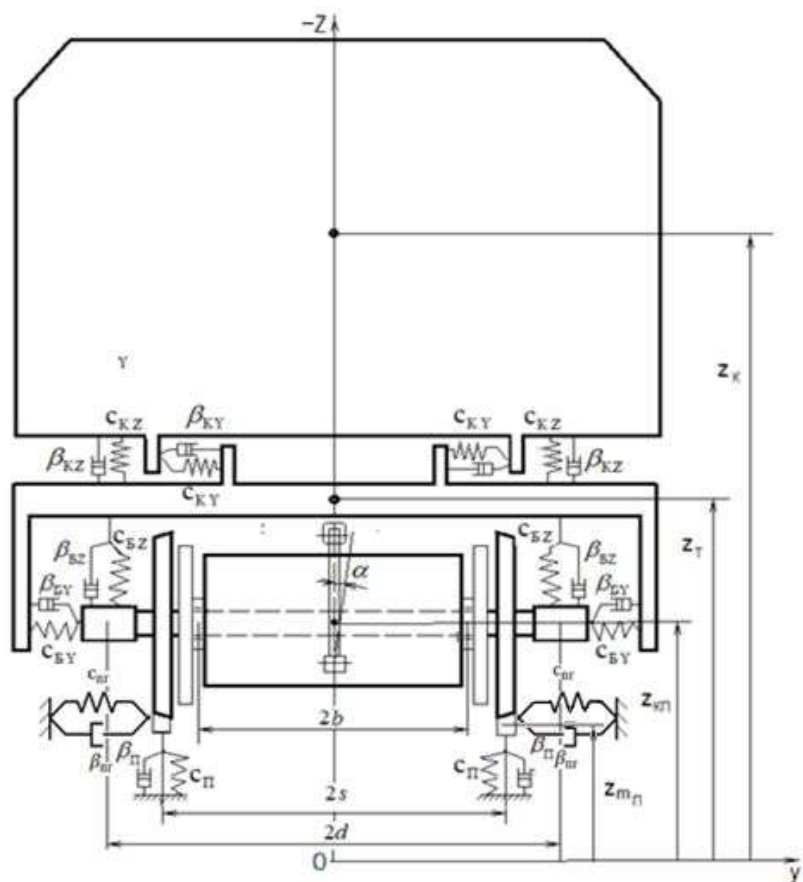
Математическую модель колебаний локомотива, движущегося с постоянной скоростью вдоль оси пути, составим на основе уравнений Лагранжа второго рода. Возьмем соответствующие производные выражений кинетической и потенциальной энергий, а также функции рассеяния, зависящие от выбранных обобщенных координат и скоростей. В результате получим систему дифференциальных уравнений, которую можно представить в матричном виде:

$$[M] \ddot{\vec{q}} + [B] \dot{\vec{q}} + [C] \vec{q} = \vec{Q}, \quad (1)$$

где $[M]$ – матрица инерционных коэффициентов; $[B]$ – матрица диссипативных коэффициентов; $[C]$ – матрица упругих коэффициентов; $\vec{Q}$ – вектор нагрузок, приложенных к узлам рассматриваемой механической системы, определяемый внешними возмущениями.



a



b

Рисунок 2 – Расчетная схема системы «локомотив – путь»:
a – вертикальная плоскость; б – горизонтальная плоскость

Для проведения расчета необходимо назначить обобщенные координаты: $z_k, z_{tk}, z_{k, \Pi i}$ – вертикальные перемещения кузова, k -й тележки, i -й колесной пары соответственно; $z_{\Pi i}$ – вертикальное перемещение участка пути, приведенного к i -й колесной паре; $y_k, y_{tk}, y_{k, \Pi i}$ – поперечные перемещения кузова, k -й тележки, i -й колесной пары соответственно; $\theta_k, \theta_{tk}, \theta_{k, \Pi i}$ – угловые перемещения кузова, k -й тележки, i -й колесной пары относительно оси z ; $\varphi_k, \varphi_{tk}, \varphi_{k, \Pi i}$ – угловые перемещения кузова, k -й тележки, i -й колесной пары относительно оси y ; $\psi_k, \psi_{tk}, \psi_{k, \Pi i}$ – угловые перемещения кузова, k -й тележки, i -й колесной пары относительно оси x ; η_i – функция неровности рельса под i -й колесной парой; $m_k, m_t, m_{k, \Pi}, m_{\text{дв}}$ – массы кузова, обрессоренных частей тележки, колесной пары и ТЭД соответственно; m_{Π} – приведенная масса пути; $J_k, J_t, J_{k, \Pi}$ – моменты инерции кузова, тележки и колесной пары соответственно (относительно осей z, y, x , которые обозначены дополнительным индексом); $c_k, c_{\text{б}}$ – жесткости кузовной и буксовой ступеней подвешивания; c_{Π} – приведенная жесткость пути; $\beta_k, \beta_{\text{б}}$ – коэффициенты вязкого трения кузовной и буксовой ступеней подвешивания; β_{Π} – приведенный коэффициент вязкого трения пути; F_k – сила тяги; W – сила сопротивления движению состава поезда. Здесь $k = 1, 2$; $i = 1, \dots, 4$ – нумерация колесных пар, тележек и тяговых электродвигателей по ходу локомотива.

Вектор обобщенных координат, характеризующий положение узлов рассматриваемой механической системы в любой момент времени, определяется по следующему выражению:

$$\vec{q} = \left\{ \begin{array}{l} x_k, y_k, z_k, \theta_k, \varphi_k, \psi_k, x_{t1}, y_{t1}, z_{t1}, \theta_{t1}, \varphi_{t1}, \psi_{t1}, x_{t2}, y_{t2}, z_{t2}, \theta_{t2}, \varphi_{t2}, \psi_{t2}; \\ x_{k, \Pi 1}, y_{k, \Pi 1}, z_{k, \Pi 1}, \theta_{k, \Pi 1}, \varphi_{k, \Pi 1}, \psi_{k, \Pi 1}, x_{k, \Pi 2}, y_{k, \Pi 2}, z_{k, \Pi 2}, \theta_{k, \Pi 2}, \varphi_{k, \Pi 2}, \psi_{k, \Pi 2}; \\ x_{k, \Pi 3}, y_{k, \Pi 3}, z_{k, \Pi 3}, \theta_{k, \Pi 3}, \varphi_{k, \Pi 3}, \psi_{k, \Pi 3}, x_{k, \Pi 4}, y_{k, \Pi 4}, z_{k, \Pi 4}, \theta_{k, \Pi 4}, \varphi_{k, \Pi 4}, \psi_{k, \Pi 4}; \\ x_{\text{дв}1}, y_{\text{дв}1}, z_{\text{дв}1}, \theta_{\text{дв}1}, \varphi_{\text{дв}1}, \psi_{\text{дв}1}, x_{\text{дв}2}, y_{\text{дв}2}, z_{\text{дв}2}, \theta_{\text{дв}2}, \varphi_{\text{дв}2}, \psi_{\text{дв}2}; \\ x_{\text{дв}3}, y_{\text{дв}3}, z_{\text{дв}3}, \theta_{\text{дв}3}, \varphi_{\text{дв}3}, \psi_{\text{дв}3}, x_{\text{дв}4}, y_{\text{дв}4}, z_{\text{дв}4}, \theta_{\text{дв}4}, \varphi_{\text{дв}4}, \psi_{\text{дв}4} \end{array} \right\}^T \quad (2)$$

Интегрирование полученных математических моделей, описывающих колебания узлов электровоза при его движении по неровностям рельсового пути, позволяет определить нагрузки в узлах механической части локомотива, а также оценить дополнительный момент, возникающий при горизонтальных перемещениях рамы тележки относительно колесной пары.

Результаты расчета основных динамических параметров электровоза с типовой схемой рессорного подвешивания и усовершенствованной схемой с компенсирующим устройством приведены на рисунках 3 – 6. Решение систем дифференциальных уравнений проведено в среде MathCAD.

Полученные результаты показывают, что максимальные виброускорения кузова локомотива с модернизированным рессорным подвешиванием при скоростях от 40 до 80 км/ч снижаются в два раза по сравнению с типовой схемой подвески, и с ростом скорости этот эффект увеличивается. Виброускорения тележек с компенсирующим устройством в диапазоне скоростей 40 – 100 км/ч уменьшаются в 1,8 раза. Снижение виброускорений обрессоренных масс приводит к стабилизации давления колес на рельс. Динамическая добавка давления колеса на рельс при скорости 80 км/ч снижается в 1,5 раза, что способствует уменьшению износа бандажей колесных пар и поверхности рельсов, стабилизации силы тяги и, следовательно, уменьшению вероятности срыва колесных пар на боксование.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таким образом, за счет снижения разброса давлений колеса локомотива на рельс, стабилизирующего силы взаимодействия в системе «колесо – рельс», улучшаются динамические и тяговые качества локомотива, а также возможно некоторое увеличение массы поезда.

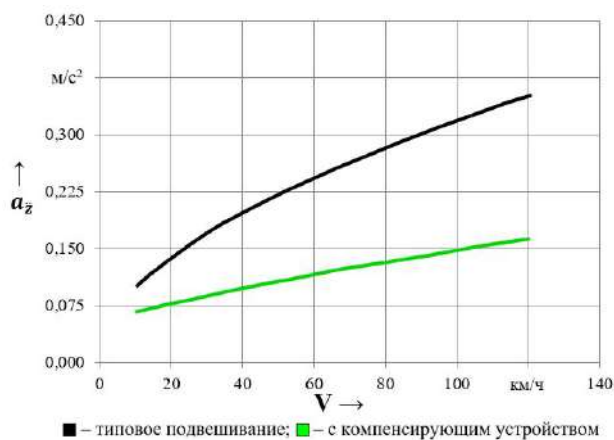


Рисунок 3 – Максимальные вертикальные ускорения кузова

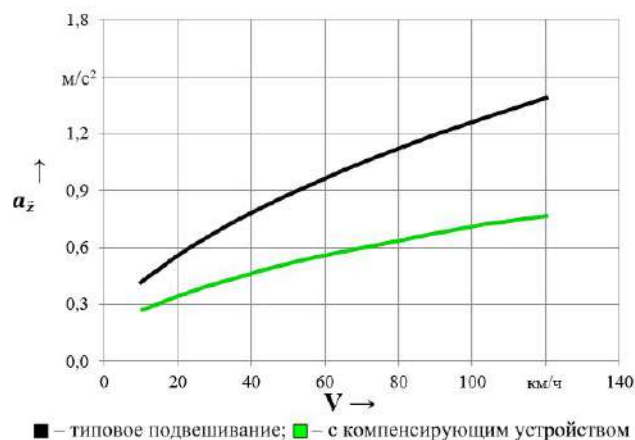


Рисунок 4 – Максимальные вертикальные ускорения тележки

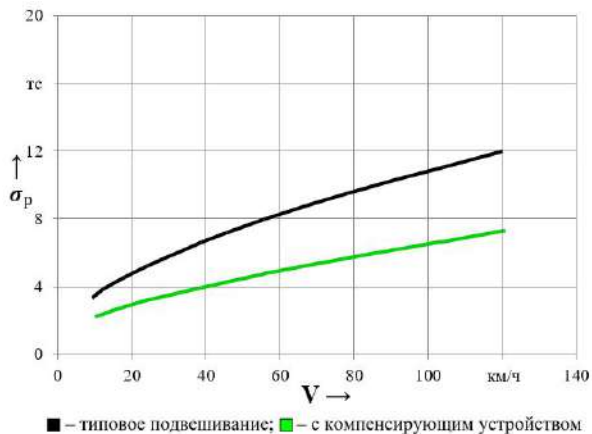


Рисунок 5 – Среднеквадратическое отклонение динамической добавки силы давления на рельс

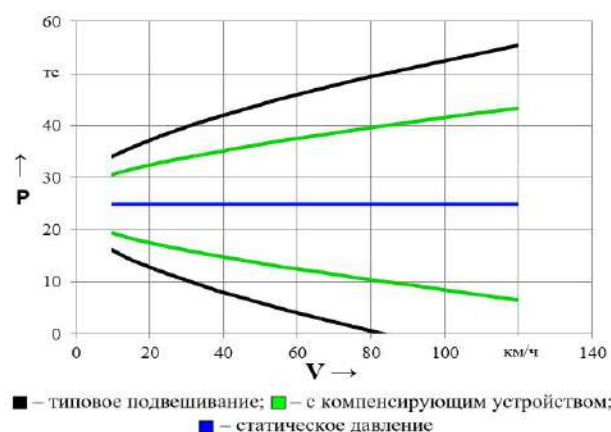


Рисунок 6 – Максимальное и минимальное значения силы давления колесной пары на рельс

Для дальнейшей оптимизации эффективности предлагаемый вариант буксового рессорного подвешивания можно комбинировать с модернизированной подвеской тягового двигателя грузовых магистральных локомотивов.

В ходе анализа неисправностей узлов механической части и конструктивных особенностей системы подвешивания ТЭД к раме тележки электровоза серии 2ЭС6 установлено, что причиной возникновения этих дефектов являются значительные напряжения в поводке подвески ТЭД и в опорных узлах колесно-моторного блока (КМБ) [7]. Чтобы оценить динамическую нагруженность корпуса ТЭД и его опорных узлов, выполнен анализ его напряженного состояния при прохождении кривых и при движении по стыковому рельсовому пути.

Для оценки напряжений в корпусе ТЭД ЭДП810 была разработана его имитационная модель. В результате расчетов установлена картина распределения напряжений в материале корпуса ТЭД (рисунок 7).

Полученные данные показывают, что концентраторами напряжений в корпусе ТЭД являются его опорные узлы, а именно места крепления поводка, моторно-осевые подшипники и болты их корпусов.

Результаты моделирования подтверждают статистические данные отказов механической части (за 2024 год произошел 61 случай выявления неисправностей МОПов на 1 млн км пробега). Имитационная модель ТЭД электровоза 2ЭС6 позволяет наглядно оценить распределение напряжений в корпусе ТЭД в зависимости от его режима работы, скорости движения локомотива и величины зазора стыкового соединения. В результате проведенных расчетов при скорости электровоза 80 км/ч установлено, что значения напряжений в материале опорных узлов ТЭД превысили значения, предусмотренные при проектировании с учетом требований ГОСТ 2582–2013, в среднем более чем на 26 %.

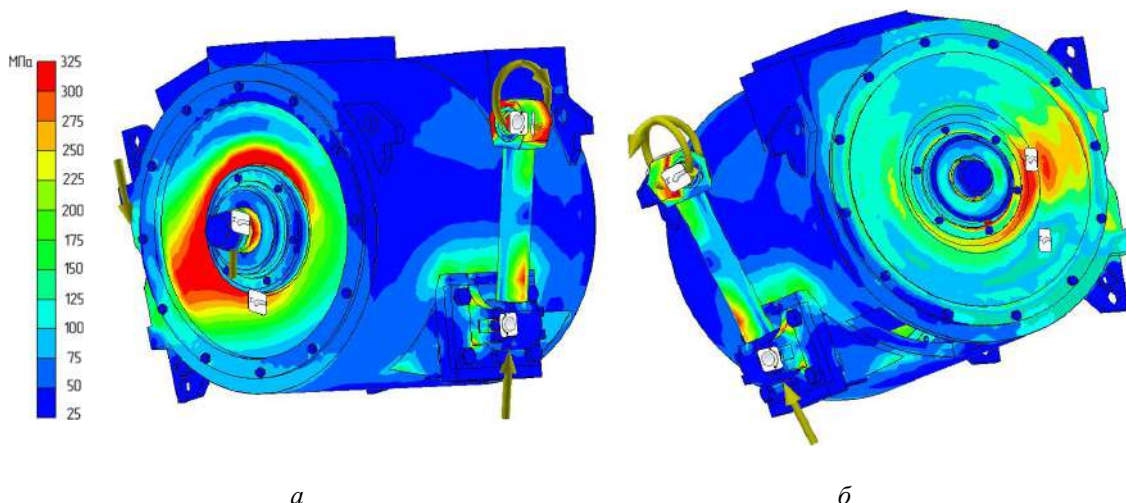


Рисунок 7 – Распределение напряжений в корпусе тягового электродвигателя ЭДП810

Вследствие этого предложена усовершенствованная конструкция системы подвешивания ТЭД к раме тележки электровоза 2ЭС6 для обеспечения снижения негативного воздействия динамических нагрузок на крепежные узлы ТЭД и механическую часть локомотива (пат. на изобретение RU 2783908 C1 от 21.11.2022) [8].

Такая люлечная подвеска при горизонтальных колебаниях рамы тележки относительно колесной пары с установленным на ней ТЭД предотвращает отклонение верхнего узла крепления поводка подвески от вертикали и не создает момент сил, нагружающий остов двигателя и узлы его опирания на ось колесной пары, что в результате снижает динамическую нагруженность поводка, остова ТЭД и узлов крепления его МОПа.

Теоретические исследования усовершенствованной конструкции, проведенные с использованием разработанной математической модели, показали, что при скорости локомотива, равной 80 км/ч, максимальные напряжения в контрольных точках ТЭД снижаются в среднем на 30 % по сравнению с типовой схемой подвешивания (рисунок 8).

Совместная реализация этих технических решений позволит существенно повысить скорость грузовых поездов и провозную способность участков.

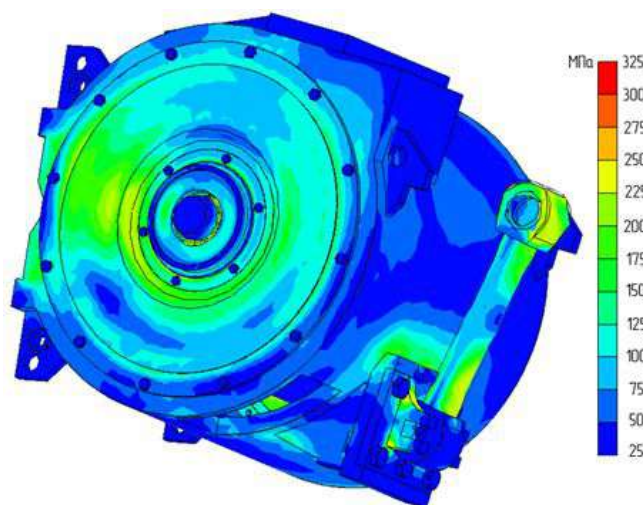


Рисунок 8 – Распределение напряжений в корпусе тягового электродвигателя ЭДП810 с модернизированной схемой подвешивания

Список литературы

1. Галиев, И. И. Методы и средства виброзащиты железнодорожных экипажей : монография / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2010. – 339 с. – Текст : непосредственный. – EDN QBFHUZ.
2. Основы механики подвижного состава / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев, В. Н. Ушак. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2013. – Часть 1. – 202 с. – EDN RUEYVN.
3. Галиев, И. И. Повышение тяговых качеств локомотива за счет совершенствования системы рессорного подвешивания / И. И. Галиев, В. А. Николаев, К. О. Серяков. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции, посвященной Дню российской науки. Омск, 8 февраля 2024 г. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2024. – С. 422–431. – EDN XKWDOQ.
4. Камаев, В. А. Оптимизация параметров ходовых частей железнодорожного подвижного состава / В. А. Камаев. – Москва : Машиностроение, 1980. – 215 с. – Текст : непосредственный.
5. Беляев, А. И. Вероятностные характеристики стохастических колебаний колесной пары тепловоза 2ТЭ10Л / А. И. Беляев, В. К. Белов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 1971. – № 1. – С. 36–40.
6. Беляев, А. И. Повышение надежности экипажной части тепловозов / А. И. Беляев, Б. Б. Бунин, С. М. Голубятников. – Москва : Транспорт, 1984. – 248 с. – Текст : непосредственный.
7. Серяков, К. О. Исследование динамической нагруженности корпуса и опорных узлов тягового электродвигателя подвижного состава в эксплуатации / К. О. Серяков, К. В. Аверков – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 11–18. – EDN PVWLPX.
8. Патент № 2783908 С1 Российская Федерация, МПК В61С 9/50. Узел подвешивания тягового электродвигателя локомотива : № 2022110805 : заявлено 20.04.2022 : опубликовано 21.11.2022 / Николаев В. А., Нехаев В. А., Серяков К. О. ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения». – Текст : непосредственный. – EDN HPTXZJ.

References

1. Galiev I.I., Nekhaev V.A., Nikolaev V.A. *Metody i sredstva vibrozashchity zheleznodorozhnykh ekipazhej : monografiia* [Methods and means of vibration protection of railway vehicles: monograph]. Moscow, Educational and Methodological Center for Railway Transport Education Publ., 2010, 339 p. EDN QBFHUZ. (In Russian).
2. Galiev I.I., Nekhaev V.A., Nikolaev V.A. *Osnovy mekhaniki podvizhnogo sostava* [Fundamentals of rolling stock mechanics]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2013, vol. 1, 202 p. EDN RUEYVN. (In Russian).
3. Galiev I.I., Nikolaev V.A., Seryakov K.O. [Improving the traction qualities of a locomotive by improving the spring suspension system]. *Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: Materialy nauchnoj konferencii, posvyashchennoj Dnyu Rossijskoj nauki* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport: Proceedings of the scientific conference dedicated to the Day of Russian Science]. Omsk, 2024, pp. 422-431. EDN XKWDOQ. (In Russian).
4. Kamaev V.A. *Optimizaciya parametrov hodovykh chastej zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Optimization of the parameters of the running gear of railway rolling stock]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 215 p. (In Russian).

5. Belyaev A.I., Belov V.K. Probabilistic characteristics of stochastic oscillations of the wheelset of the 2TE10L diesel locomotive. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 1971, no. 1, pp. 36-40. (In Russian).

6. Belyaev A.I., Bunin B.B., Golubyatnikov S.M. *Povyshenie nadezhnosti ekipazhnoj chasti teplovozov* [Increasing the reliability of the diesel locomotive crew]. Moscow, Transport Publ., 1984, 248 p. (In Russian).

7. Seryakov K.O., Averkov K.V. Study of dynamic loading of the housing and support units of the traction electric motor of rolling stock in operation. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4(60), pp. 11-18. EDN PVWLXP. (In Russian).

8. Nikolaev V.A., Nekhaev V.A., Seryakov K.O. *Patent RU 2783908 C1*, 21.11.2022.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галиев Ильхам Исламович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, советник при ректорате ОмГУПС, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: Prezident@omgups.ru

Николаев Виктор Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

Серяков Кирилл Олегович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: kirillseryakov@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Галиев, И. И. Улучшение показателей динамических качеств электровоза 2ЭС6 на основе совершенствования механической части / И. И. Галиев, В. А. Николаев, К. О. Серяков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 2 – 10.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galiev Ilkham Islamovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, advisor to the rector's office of OSTU, honored scientist and engineer of the Russian Federation, professor of the department «Theoretical and Applied Mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: Prezident@omgups.ru

Nikolaev Viktor Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Theoretical and Applied Mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

Seryakov Kirill Olegovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Theoretical and Applied Mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: kirillseryakov@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Galiev I.I., Nikolaev V.A., Seryakov K.O. Improvement of the electric locomotive 2ES6 dynamic performance based on improvement of the mechanical part. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 2-10. (In Russian).

Е. Н. Розенберг¹, В. Г. Новиков²

¹Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), г. Москва, Российская Федерация;

²Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению централизованной архитектуры систем управления и обеспечения безопасности движения поездов, использующих цифровой радиоканал передачи данных, централизованной архитектуры, основанной на применении облачных технологий, а также децентрализованной архитектуры. Полноценная идеальная централизованная архитектура использует принцип размещения на центральном сервере всех алгоритмов системы управления и обеспечения безопасности движения поездов. При централизованной архитектуре на сервере имеется база данных линии с информацией обо всех ее параметрах, включая объекты управления, постоянные ограничения скорости, объекты в пути следования: комплексы технических средств контроля за состоянием подвижного состава, контрольно-габаритные устройства, автоматическая переездная сигнализация и др. Архитектура, использующая облачные технологии, также имеет единую базу данных, но все функции сбора, анализа, обработки данных, а также управления движением поездов сосредоточены на центральной серверной платформе, размещенной в специализированных железнодорожных центрах обработки данных и в едином диспетчерском центре, которые могут быть территориально разнесены и объединены между собой единой сетью передачи данных. В статье рассмотрена децентрализованная архитектура, которая предполагает отсутствие каких-либо логических функций, обеспечивающих безопасность движения на стороне стационарных устройств инфраструктуры. Целью данной статьи является разработка архитектур и обоснование целесообразности их применения. Технические решения, разработанные различными компаниями, отличаются друг от друга алгоритмами реализации, применяемыми интерфейсами, структурными и архитектурными решениями и местными условиями эксплуатации, что является большим неудобством для эксплуатирующего персонала, а также для внесения изменений в аппаратно-программную часть систем при изменении путевого развития и элементов инфраструктуры. Практическая значимость статьи заключается в обосновании целесообразности приведения к единой архитектуре и единому формату данных и единым интерфейсам компонентов системы обеспечения безопасности движения поездов.

Ключевые слова: интеллектуальные системы, системы управления, безопасность движения поездов, бортовые устройства безопасности, система интервального регулирования, цифровой радиоканал, архитектура систем.

Efim N. Rosenberg¹, Vyacheslav G. Novikov²

¹Research and Design Institute of Informatisation, Automation and Communication on Railway Transport' (JSC "NIAS"), Moscow, the Russian Federation;

²Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

TRAIN CONTROL AND SAFETY SYSTEM PROMISING ARCHITECTURES

Abstract. The paper is devoted to the consideration of the centralised architecture of control and train safety systems using digital radio data transmission channel, centralised architecture based on the application of cloud technologies and decentralised architecture. A complete ideal centralised architecture uses the principle of placing all the algorithms of the control and safety system on a central server. In a centralised architecture, the server has a database of the line with information on all its parameters, including control objects, permanent speed limits, objects in transit: complexes of technical means of control over the condition of rolling stock, control and dimensional devices, automatic crossing signalling and others. The architecture using cloud technologies also has a single database, but all data collection, analysis, data processing and train traffic control functions are concentrated on a central server platform located in specialised railway data processing centres and in a single dispatch centre, which can be geographically dispersed and interconnected by a single data transmission network. The article considers a decentralised architecture, which assumes the absence of any logical functions ensuring traffic safety on the side of fixed infrastructure devices. The purpose of this article is to develop architectures and justify the feasibility of their application. Technical solutions developed by different companies differ in implementation algorithms, applied interfaces, structural and architectural solutions and local operating conditions, which is a great inconvenience for operating personnel, as well as for making changes to the

hardware and software part of the systems when changing track development and infrastructure elements. The practical significance of the article lies in the justification of the expediency of bringing to a unified architecture and a unified data format and unified interfaces of the train traffic safety system components.

Keywords: intelligent systems, control systems, train traffic safety, on-board safety devices, interval regulation system, digital radiochannel, system architecture.

Развитие современных систем управления и обеспечения безопасности движения железных дорог и метрополитенов в настоящее время тесно связано с использованием цифрового радиоканала передачи данных (РК). Применение цифрового радиоканала передачи данных необходимо для повышения пропускной способности линий, расширения функциональных возможностей технических комплексов при применении новых принципов обеспечения безопасности движения и интервального регулирования [1 – 3].

Стоит отметить, что в настоящее время системы управления движением поездов, использующие РК, внедряются в большинстве проектов нового строительства, а также при модернизации линий пригородного железнодорожного транспорта, метрополитена и других систем городского рельсового транспорта в мире. Технические решения, разработанные различными компаниями, отличаются друг от друга алгоритмами реализации, применяемыми интерфейсами, структурными и архитектурными решениями и местными условиями эксплуатации, что является большим неудобством для эксплуатирующего персонала, а также для внесения изменений в аппаратно-программную часть систем при изменении путевого развития и элементов инфраструктуры.

В связи с этим целесообразным является приведение к единой архитектуре, единому формату данных и единым интерфейсам компонентов систем обеспечения безопасности движения поездов, что имеет большую практическую значимость для этих систем. Цель данной статьи – разработка концепции архитектур систем управления и обеспечения безопасности движения поездов, использующих цифровой радиоканал передачи данных (СУиОБДП РК), и обоснование целесообразности их применения.

Рассмотрим централизованную архитектуру СУиОБДП РК.

Полноценная идеальная централизованная архитектура использует принцип размещения реализации на центральном сервере всех алгоритмов системы управления и обеспечения безопасности движения поездов (рисунок 1).

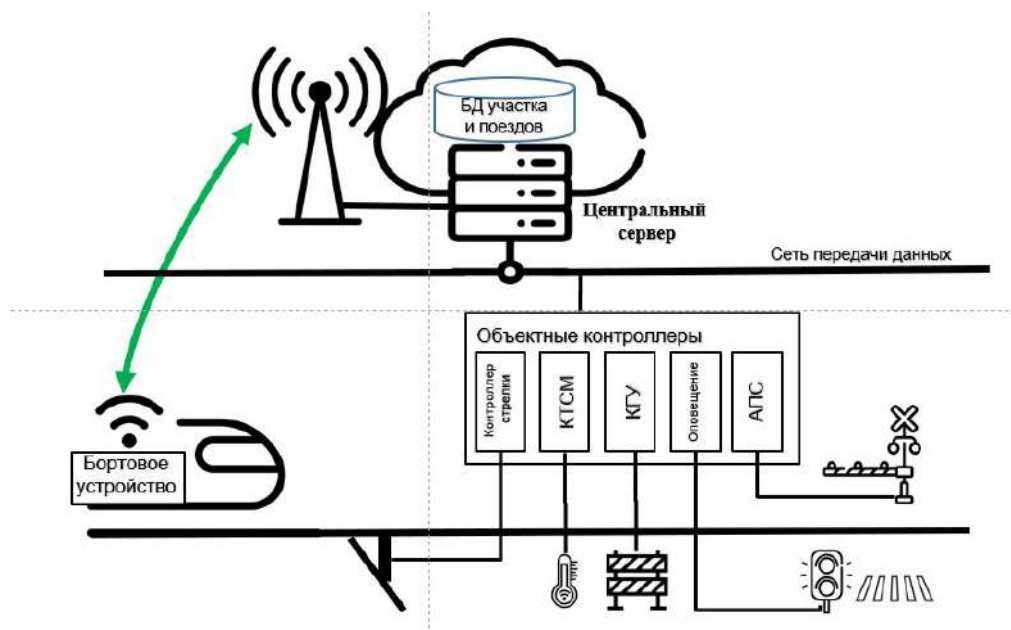


Рисунок 1 – Архитектура идеальной централизованной системы управления и обеспечения безопасности движения поездов, использующая цифровой радиоканал (на примере одного поезда): КТСМ – комплекс технических средств контроля за состоянием подвижного состава; КГУ – контрольно-габаритные устройства; АПС – автоматическая переездная сигнализация

Функции бортового устройства ограничиваются обменом данными по цифровому радиоканалу с центральным сервером, позиционированием поезда по информации датчиков пройденного пути с использованием корректировки напольными датчиками или системой спутниковой навигации, контролем полноты состава поезда, управлением тягой, служебным и экстренным торможением, дверями, системой видеонаблюдения и т. д. Алгоритмы и логика определения местоположения поезда, регулирования и контроля его скорости сосредоточены в центральном сервере. На борту поезда имеется устройство, которое не принимает решение о формировании допустимой скорости, оно лишь обрабатывает полученные сигналы и выполняет управляющие воздействия. База данных линии располагается только в центральном стационарном сервере, который осуществляет контроль и управление всеми напольными устройствами, а также расчетом допустимой скорости движения для каждого поезда. Кроме того, этот сервер включает в себя базу данных параметров всех поездов, курсирующих по линии.

При централизованной архитектуре на сервере имеется база данных (БД) о линии с информацией о всех ее параметрах, включая объекты управления, постоянные ограничения скорости, объекты в пути следования, комплексы технических средств контроля за состоянием подвижного состава (КТСМ), контрольно-габаритные устройства (КГУ), автоматическая переездная сигнализация (АПС) и др.

При наличии на линии устройств контроля свободы релейных цепей возможна организация движения по линии подвижного состава с бортовыми устройствами с функциями обмена данными по цифровому радиоканалу передачи данных и без них. Кроме того, дополнительные напольные датчики позволяют определять местоположение поездов с повышенной точностью.

Еще один тип архитектуры СУиОБДП, которую необходимо выделить, это централизованная архитектура, использующая облачные технологии.

В архитектуре, использующей облачные технологии, все функции сбора, анализа, обработки данных, а также управления движением поездов сосредоточены на центральной серверной платформе, размещенной в специализированных железнодорожных центрах обработки данных (ЦОДах) и в едином диспетчерском центре (ЕДЦ). Эти функции реализованы также в диспетчерской централизации (ДЦ) [4] и микропроцессорной централизации (МПЦ) [5] при взаимодействии с объектными контроллерами посредством сети передачи данных и с бортовыми устройствами посредством цифрового радиоканала передачи данных (рисунок 2).

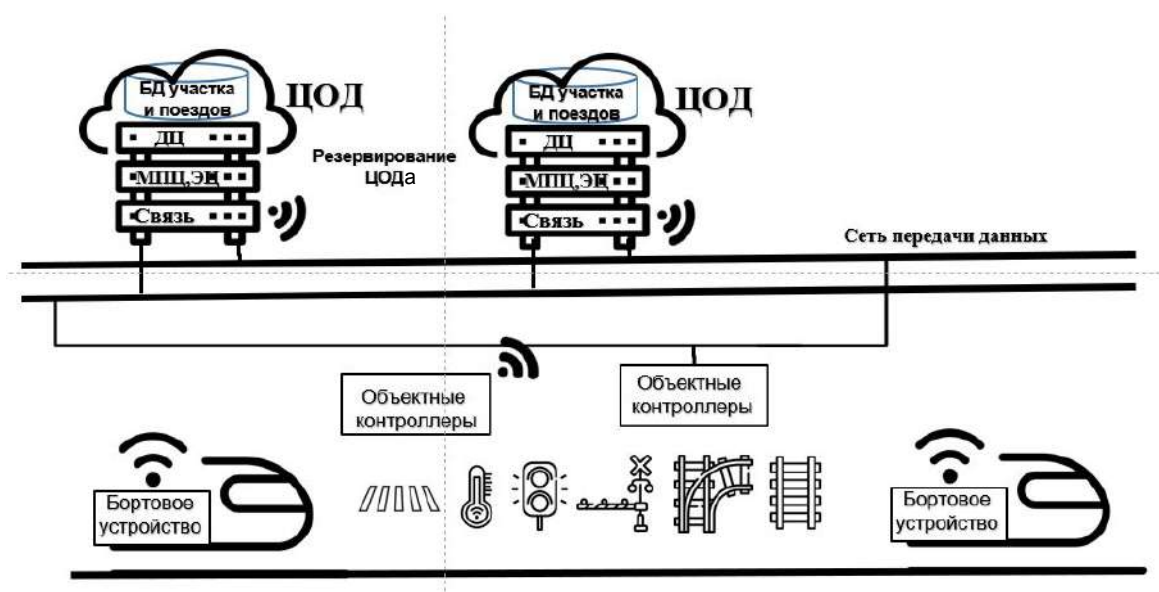


Рисунок 2 – Архитектура централизованной системы, использующей облачные технологии с пространственным резервированием специализированных центров обработки данных

ЦОД представляет собой комплекс физических серверов, объединенных сетью передачи данных. ЦОДы могут быть территориально разнесены между собой и зарезервированы. Каждый центральный сервер представляет собой логический центр обработки данных, аппаратура которого территориально сосредоточена в одном месте.

Подобного рода тенденция наблюдается на железных дорогах Европы [6], где в масштабе всей сети появляются единые центры диспетчерской и микропроцессорной централизации и центры радиосвязи.

Архитектура централизованной системы, использующей облачные технологии, приводит к цифровизации СУиОБДП РК. Стандартные технологии облачных сервисов не обеспечивает выполнения требований уровня функциональной безопасности SIL4 [7, 8]. Поэтому необходимы специализированные аппаратно-программные решения, позволяющие достичь необходимого уровня функциональной безопасности, в том числе и пространственное резервирование систем и их элементов.

Развитие СУиОБДП РК в направлении облачных технологий создает новые условия для повышения уровня автоматизации, цифровизации, интеллектуализации и применения элементов искусственного интеллекта [9 – 12].

Архитектура централизованной системы, использующей облачные технологии для пригородного железнодорожного транспорта, метрополитена и других систем городского рельсового транспорта, дает ряд преимуществ:

- сокращение аппаратуры на линии за счет более высокого уровня централизации и, как следствие, уменьшение площадей в технических помещениях при строительстве новых линий;

- упрощение реализации проектов модернизации существующих линий;

- снижение стоимости и упрощение технического обслуживания оборудования, поскольку обновление программного обеспечения осуществляется централизованно;

- повышение гибкости управления информационной безопасностью (обновление пакетов программного обеспечения, отвечающих за информационную безопасность);

- упрощение решения проблем устаревшего оборудования за счет виртуализации функций, ранее реализуемых физическим оборудованием;

- возможность расширения системы за счет переноса функционала, улучшения вычислительной мощности и наличия стандартных интерфейсов прикладного программирования.

Железнодорожный транспорт испытывает острую потребность в технологиях, которые позволят осуществить быструю и недорогую цифровизацию и интеллектуализацию отрасли [11, 12]. Для этого вместо специализированных аппаратных необходимо использовать многоядерные процессоры и серверы. Построение серверов с уровнем безопасности SIL4 позволяет создавать недорогие и эффективные технические решения, реализующие логику систем централизации и диспетчерского управления движением поездов [9], которые будут работать параллельно с традиционными системами, с потенциальным переходом на управление в качестве основного и единственного средства управления движением.

Архитектура централизованной системы, использующей облачные технологии, реализуя высокий уровень централизации и виртуализации функций напольного оборудования, обеспечивает частичное абстрагирование от аппаратных средств с удовлетворением требований уровня безопасности SIL4. Это может быть достигнуто за счет параллельного контроля и исполнения ответственных команд минимум в двух физических серверах с интеллектуальным мажоритарным сравнением результатов обработки. Пространственное резервирование осуществляется на уровне резервирования специализированных железнодорожных ЦОДов и оптоволоконных линий связи.

Архитектура централизованной системы, использующей облачные технологии, предполагает поэтапный перенос функций систем централизации, диспетчерского управления в специализированный железнодорожный ЦОД, при этом внешние стандартные интерфейсы сохраняются в неизменном виде. Таким образом, становится возможной беспрепятственная эволюция СУиОБДП РК без внесения изменений в основные принципы ее работы. Для

двустороннего обмена информацией с бортовыми устройствами возможно перераспределение функций от поезда к инфраструктуре и обратно.

Еще одним видом перспективной архитектуры СУиОБДП РК является децентрализованная архитектура, которая предполагает отсутствие каких-либо логических функций, обеспечивающих безопасность движения на стороне стационарных устройств инфраструктуры (рисунок 3).

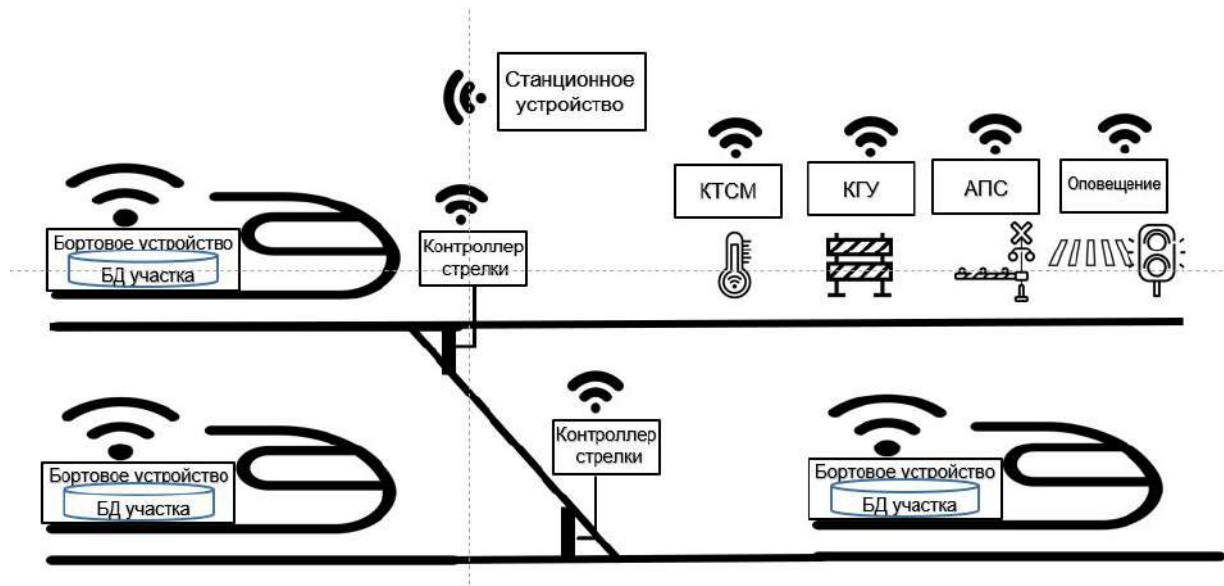


Рисунок 3 – Архитектура идеальной децентрализованной системы управления и обеспечения безопасности движения поездов, использующая цифровой радиоканал

Вся логика обеспечения безопасности поездов при проследовании маршрутов на станции, включая управление переводом стрелок, резервирование и размыкание секций маршрута, интервальное регулирование движения, контроль полносоставности, нагрева букс [13, 14], диагностика исправности узлов, контроль открытия и закрытия дверей, интеллектуальный контроль поведения пассажиров (для пассажирских поездов), реализуется бортовым устройством обеспечения безопасности. Децентрализованные системы управления движением поездов могут использовать технологии блокчейн (Blockchain – цепочка блоков данных) [15]. Блокчейн – непрерывная последовательная цепочка сообщений, содержащих информацию о параметрах поезда. Связь между блоками обеспечивается не только нумерацией, но и тем, что каждый блок содержит свою собственную хеш-сумму и хеш-сумму предыдущего блока [16].

При такой архитектуре в бортовом устройстве каждого поезда имеется база данных о линии с информацией обо всех ее параметрах, включая объекты управления, постоянные ограничения скорости, объекты в пути следования, путевые устройства диагностики подвижного состава, переездные устройства. Каждый поезд, зная свое местоположение [17] напрямую обменивается данными с этими объектами (станционными устройствами, стрелками, устройствами диагностики, устройствами ограждения переезда, устройствами оповещения на переходах и работающих на путях сотрудников и т. п.), а также с соседними поездами.

При движении по линии поезд управляет положением стрелок, которые занесены в базу данных, контролирует их положение и обеспечивает их перевод в требуемом положении (плюсовое или минусовое). Кроме того, поезд учитывает местоположение впереди идущего и идущего следом поездов, их длину и полносоставность, чтобы обеспечить безопасный интервал попутного следования и не допускать следования по враждебным маршрутам. При выполнении всех этих условий поезд самостоятельно формирует значение допустимой скорости движения. После проезда стрелки поезд подтверждает ее освобождение, чтобы дать

возможность другим поездам управлять этой стрелкой. После проезда стрелки она должна быть освобождена поездом для получения возможности ее перевода в другое положение для проезда следующим, приближающимся к ней поездом.

Поезд, отправляющийся со станции, непрерывно обменивается информацией с разными стационарными и путевыми объектами. Одновременно он обменивается информацией с идущим впереди поездом, чтобы контролировать местоположение его хвоста, и поездом, идущим вслед, чтобы сообщать ему о местоположении своего хвоста, а также передавать различную диагностическую и оповещающую информацию. Периодичность обмена данными и состав передаваемой информации определяются в каждом случае индивидуально. С оборудованием на станциях связь поддерживается до момента выхода головы поезда за точку выходного светофора, со стрелкой – до полного освобождения стрелочного участка. Может возникнуть ситуация, при которой, появляется необходимость одновременного обмена информацией об одной стрелке сразу несколькими поездами. Примером может служить ситуация, при которой стрелка связана взаимозависимостями с другими стрелками. При высокой интенсивности движения к одной стрелке могут обращаться сразу несколько поездов – идущий впереди поезд, который выполнил замыкание маршрута, в состав которого входит стрелка, и, например, поезд, идущий следом, который запрашивает состояние стрелки для формирования своего маршрута.

Идеальная децентрализованная архитектура предполагает оснащение всех поездов бортовыми устройствами обеспечения безопасности с радиоканалом. Смешанное движение с участием поездов без таких устройств или с неисправными бортовыми устройствами не допускается.

Список литературы

1. Патент № 2828493 С1 Российская Федерация, МПК В61L 27/20, В61L 23/18. Способ интервального регулирования движения поездов с использованием подвижных координатных отрезков на участках без путевых светофоров : № 2024108788 : заявлено 02.04.2024 : опубликовано 14.10.2024 / Батраев В. В., Бояринова Н. А., Воронин В. А., Гринфельд И. Н., Кисельгоф Г. К., Куваев С. И., Лобанова В. С., Марков А. В., Озеров А. В., Розенберг Е. Н., Шухина Е. Е.; заявитель Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте». – Текст : непосредственный. – EDN FFKAMC.
2. Бестемьянов, П. Ф. Алгоритмы управления и математическое моделирование интервального движения поездов / П. Ф. Бестемьянов, Л. А. Баранов. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2023. – № 9. – С. 2–5. – DOI 10.53891/00135860_2023_9_2. – EDN IRPYRA.
3. Баранов, Л. А. Повышение провозной способности городского пассажирского транспорта путем внедрения интеллектуальных систем управления движением / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные транспортные системы : материалы IV международной научно-практической конференции. Москва, 22 мая 2025 г. / Российский университет транспорта (МИИТ). – Москва, 2025. – С. 70–80. – DOI 10.30932/9785002587582-2025-70-80. – EDN HQBSRV.
4. Диспетчерская централизация Московского метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Новиков, А. Ю. Ярославцев [и др.]. – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2019. – 130 с. – Текст : непосредственный. – EDN CJRQLC.
5. Новиков, В. Микропроцессорные системы централизации Московского метрополитена / В. Новиков, А. Бахарев, В. Хорошев. – Москва : Белый Ветер, 2024. – 200 с. – Текст : непосредственный. – EDN CQODKT.
6. Ефремов, А. Ю. Безопасная вычислительная платформа для центров обработки данных / А. Ю. Ефремов. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2022. – № 2. – С. 56–59. – EDN CBTHDE.

7. Горшков, А. С. Построение технологической связи на железной дороге с применением пакетной коммутации каналов и облачных технологий / А. С. Горшков, С. М. Куценко, Д. Ю. Сонин. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2016. – Т. 1. – С. 254–257. – EDN WGBSYN.

8. Долгий, А. И. Облачные технологии для ответственных систем железнодорожного транспорта / А. И. Долгий, Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 11. – С. 20–25. – EDN NHZYEB.

9. Баранов, Л. А. Информационная безопасность систем диспетчерского управления на железнодорожном транспорте / Л. А. Баранов, А. Е. Ермакова, С. Е. Иконников. – Текст : непосредственный // Проблемы управления безопасностью сложных систем : материалы XXXI международной конференции. Москва, 13 декабря 2023 г. / Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – Москва, 2023. – С. 244–249. – DOI 10.25728/icss.2023.50.49.032. – EDN VNAVSI.

10. Патент № 2791353 С1 Российская Федерация, МПК В61L 27/04, В61L 27/60. Интеллектуальный комплекс управления перевозочным процессом городской рельсовой транспортной системы (ГРТС) : № 2022113881 : заявлено 24.05.2022 : опубликовано 07.03.2023 / Балакина Е. П., Баранов Л. А., Ершов А. В., Кулагин М. А., Логинова Л. Н., Сафронов А. И., Сидоренко В. Г. ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта». – Текст : непосредственный. – EDN FUBFXG.

11. Сафронов, А. И. Настройка параметров интеллектуального управления ходом автоматизированного построения плановых графиков движения пассажирских поездов / А. И. Сафронов, Д. В. Беспрозванных. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные транспортные системы : материалы II Международной научно-практической конференции. Москва, 25 мая 2023 г. / Российский университет транспорта (МИИТ). – Москва, 2023. – С. 348–358. – DOI 10.30932/9785002182794-2023-348-358. – EDN MJTYBW.

12. Интеллектуализация управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов, Е. В. Копылова [и др.]. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные транспортные системы : материалы II международной научно-практической конференции. Москва, 25 мая 2023 г. / Российский университет транспорта (МИИТ). – Москва, 2023. – С. 368–377. – DOI 10.30932/9785002182794-2023-368-377. – EDN MKXIPX.

13. Системы автоматического бесконтактного выявления перегрева букс подвижного состава Московского метрополитена / В. Г. Новиков, К. Л. Шляховский, Е. А. Перепелов [и др.]. – Москва : Белый ветер, 2022. – 152 с. – Текст : непосредственный. – EDN BHVOMT.

14. Системы автоматического бесконтактного выявления перегрева букс подвижного состава Московского метрополитена / Г. И. Костинский, К. Л. Шляховский, В. Г. Новиков, Л. Н. Логинова. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 1. – С. 52–56. – EDN HJDYCY.

15. Блокчейн на цифровой железной дороге Германии / О. Н. Покусаев, В. П. Куприяновский, Д. Е. Намиот [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – № 2. – С. 43–53. – EDN YNIREX.

16. Видюков, А. М. Применение блокчейн на железной дороге / А. М. Видюков. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы транспортной отрасли в России и за рубежом : материалы IV всероссийской студенческой научно-практической конференции на иностранных языках. Новосибирск, 03 ноября 2022 г. / Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск, 2023. – С. 85–90. – EDN DJDABA.

17. Ефремов, А. Ю. Применение технологии UWB для высокоточного определения местоположения поездов / А. Ю. Ефремов. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2023. – № 1. – С. 52–56. – EDN SUHBNA.

References

1. Batraev V.V., Boyarinova N.A., Voronin V.A., Grinfel'd I.N., Kisel'gof G.K., Kuvaev S.I., Lobanova V.S., Markov A.V., Ozerov A.V., Rozenberg E.N., Shukhina E.E. *Patent RU 2828493 C1*, 14.10.2024. EDN FFKAMC.
2. Bestemyanov P.F., Baranov L.A. Control algorithms and mathematical modeling of interval train movement. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2023, no. 9, pp. 2-5. DOI 10.53891/00135860_2023_9_2. EDN IRPYRA. (In Russian).
3. Baranov L.A., Balakina E.P. [Increasing the carrying capacity of urban passenger transportation through the introduction of intelligent traffic management systems]. *Intellektual'nye transportnye sistemy : materialy IV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Moskva, 22 maia 2025 goda* [Intelligent transport systems: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 22, 2025]. Moscow, 2025, pp. 70-80. DOI 10.30932/9785002587582-2025-70-80. EDN HQBSRV. (In Russian).
4. Safronov A.I., Novikov V.G., Yaroslavtsev A.Yu., Valvenkin A.A., Gorelyshev B.V., Zosimov V.P. *Dispetcherskaia tsentralizatsiia Moskovskogo metropolitena* [Dispatching centralization of the Moscow Metro]. Moscow, Russian University of Transport Publ., 2019, 130 p. EDN CJRQLC. (In Russian).
5. Novikov V., Bakharev A., Khoroshev V. *Mikroprotsessornye sistemy tsentralizatsii Moskovskogo metropolitena* [Microprocessor-based centralization systems of the Moscow metro]. Moscow, White Wind Publ., 2024, 200 p. EDN CQODKT. (In Russian).
6. Efremov A.Yu. Safe computing platform for data centers. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world*, 2022, no. 2, pp. 56-59. EDN CBTHDE. (In Russian).
7. Gorshkov A.S., Kutsenko S.M., Sonin D.Yu. Building technological communication on the railway using packet channel switching and cloud technologies. *Transportnaia infrastruktura Sibirskogo regiona – Transport infrastructure of the Siberian region*, 2016, vol. 1, pp. 254-257. EDN WGBSYN. (In Russian).
8. Dolgy A.I., Rozenberg E.N., Ozerov A.V. Cloud technology for critical railway systems. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2023, no. 11, pp. 20-25. EDN HHZYEB. (In Russian).
9. Baranov L.A., Ermakova A.E., Ikonnikov S.E. [Information security of dispatch control systems in railway transport]. *Problemy upravleniia bezopasnost'iu slozhnykh sistem : materialy XXXI mezhdunarodnoi konferentsii. Moskva, 13 dekabria 2023 goda* [Problems of security management of complex systems: Proceedings of the XXXI international conference, Moscow, December 13, 2023]. Moscow, 2023, pp. 244-249. DOI 10.25728/iccss.2023.50.49.032. EDN VNAVSJ. (In Russian).
10. Balakina E.P., Baranov L.A., Ershov A.V., Kulagin M.A., Loginova L.N., Safronov A.I., Sidorenko V.G. *Patent RU 2791353 C1*, 07.03.2023. EDN FUBFXG.
11. Safronov A.I., Besprozvannykh D.V. [Passenger trains planned schedule automated construction process intelligent control parameters tuning]. *Intellektual'nye transportnye sistemy : materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Moskva, 25 maia 2023 goda* [Intelligent transport systems : proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 25, 2023]. Moscow, 2023, pp. 348-358. DOI 10.30932/9785002182794-2023-348-358. EDN MJTYBW. (In Russian).
12. Sidorenko V.G., Safronov A.I., Kopylova E.V., Tumanov M.A., Tsyulina A.A. [Urban agglomerations rapid transport movement process management intellectualization]. *Intellektual'nye transportnye sistemy : materialy II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Moskva, 25*

maia 2023 goda [Intelligent transport systems : proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 25, 2023]. Moscow, 2023. pp. 368-377. DOI 10.30932/9785002182794-2023-368-377. EDN MKXIPX. (In Russian).

13. Novikov V.G., Shlyakhovsky K.L., Perepelov E.A., Sviridov A.M., Shlyakhovsky E.K., Kuzyukov V.A. *Sistemy avtomaticheskogo beskontaktnogo vyivleniia peregreva buks podvizhnogo sostava Moskovskogo metropolitena* [Systems of automatic contactless detection of overheating of axle boxes of rolling stock of the Moscow Metro]. Moscow, White Wind Publ., 2022, 152 p. EDN BHVOMT. (In Russian).

14. Kostinsky G.I., Shlyakhovsky K.L., Novikov V.G., Loginova L.N. Automatic contactless detection systems for axle-box overheating of moscow metro rolling stock. *Nauka i tekhnika transporta – Science and Technology in Transport*, 2022, no. 1, pp. 52-56. EDN HJDYCY. (In Russian).

15. Pokusaev O., Kupriyanovsky V., Namiot D., Lazutkina V., Zazhigalkin A., Kupriyanovsky P. Blockchain on the digital railway in Germany. *International Journal of Open Information Technologies*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 43-53. EDN YNIREX. (In Russian).

16. Vidyukov A.M. [Blockchain technology application at railway]. *Aktual'nye problemy transportnoi otrasli v Rossii i za rubezhom : materialy IV vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii na inostrannykh iazykakh. Novosibirsk, 03 noyabrya 2022 goda* [Actual problems of the transport industry in Russia and abroad : Proceedings of the IV All-Russian Student Scientific and Practical Conference in Foreign languages, Novosibirsk, November 03, 2022]. Novosibirsk, 2023, pp. 85-90. EDN DJDABA. (In Russian).

17. Efremov A.Yu. Adopting UWB technology for high-precision train positioning. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world*, 2023, no. 1, pp. 52-56. EDN SUHBNA. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Розенберг Ефим Наумович

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»).

Нижегородская ул., д. 27, стр. 1, г. Москва, 109029, Российская Федерация.

Первый заместитель генерального директора АО «НИИАС», доктор технических наук, профессор.

Тел.: +7 (985) 769-16-71.

E-mail: S.Lavruhina@vniias.ru

Новиков Вячеслав Геннадьевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, ГСП-4, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и информатика в технических системах» и кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», РУТ(МИИТ).

Тел.: +7 (926) 888-88-05.

E-mail: 9268888805@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Розенберг, Е. Н. Перспективные архитектуры систем управления и обеспечения безопасности движения поездов / Е. Н. Розенберг, В. Г. Новиков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 11 – 19.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rosenberg Efim Naumovich

Research and Design Institute of Informatisation, Automation and Communication on Railway Transport' (JSC "NIAS").

27, p. 1. 1., Nizhegorodskaya st., Moscow, 109029, the Russian Federation.

First deputy director general of JSC "NIAS", Doctor of Sciences in Engineering, professor.

Phone: +7 (985) 769-16-71.

E-mail: S.Lavruhina@vniias.ru

Novikov Vyacheslav Gennadievich

Russian University of Transport RUT(MIIT),

9, b. 9, Obraztsova st., Moscow, 127994, GSP-4, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department "Management and Informatics in Technical Systems" and the department "Automation, Telemechanics and Communication on Railway Transport", RUT (MIIT).

Phone: +7 (926) 888-88-05.

E-mail: 9268888805@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Rosenberg E.N., Novikov V.G. Train control and safety system promising architectures. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 11-19. (In Russian).

Р. А. Овчинников

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА НА РАЗМЕРЫ ПОТЕРЬ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ УГЛЕЙ ОТ ВЫДУВАНИЯ

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению вопроса обеспечения сохранности перевозимых на открытом подвижном составе мелкодисперсных углей за счет минимизации их потерь от выдувания. Разработана и исследована аэродинамическая модель процесса выдувания угля при его перевозке в полувагонах с применением специализированных программных комплексов в области исследования гидрогазодинамики (CFD), которая позволила численно оценить размеры потерь угля от выдувания с использованием данных об аэродинамических параметрах воздушных потоков, обтекающих поверхность груза.

Исследование влияния скорости движения поезда на размеры потерь мелкодисперсных углей от выдувания производилось путем моделирования процесса выдувания при варьировании значения скорости поезда от 20 до 140 км/ч, что также позволило установить скорость начала выдувания мелких частиц груза – 40 км/ч. Данное значение скорости согласуется с полученным учеными НИИЖТа в ходе массовых опытных перевозок сыпучих грузов в 60-е – 70-е гг. прошлого столетия, что говорит об адекватности получаемых в ходе моделирования процесса выдувания результатов.

Результаты исследования позволили получить численные зависимости размера потерь мелкодисперсных углей от выдувания при изменении скорости движения поезда, что является важным при выборе наиболее эффективных профилактических мероприятий. Дальнейшее уточнение полученных зависимостей для других мелкодисперсных сыпучих грузов видится возможным с использованием разработанной аэродинамической модели процесса выдувания как за счет конкретизации значения критической скорости выдувания отдельного сыпучего груза, так и за счет формирования соответствующей формы поверхности груза, характерной для определенного способа погрузки и параметров модели полувагона, влияющих на высоту погрузки, – не менее важный фактор, определяющий размеры потерь от выдувания.

Ключевые слова: потери от выдувания, мелкодисперсные угли, открытый подвижной состав, перевозка угля, сохранность грузов при перевозке, аэродинамика полувагона с грузом.

Roman A. Ovchinnikov

Siberian State Transport University (STU), Novosibirsk, the Russian Federation

INFLUENCE OF TRAIN SPEED ON THE LOSS OF FINE COALS DUE TO BLOW-OUT

Abstract. The article focuses on the consideration of the issue of ensuring the safety of fine coals transported on open-top rolling stock in the matter of minimizing their losses due to blow-out. An aerodynamic model of the coal blow-out process during its transportation by open-top cars was created and studied in specialized software in the field of fluid dynamics research (CFD), which provided an opportunity to numerically estimate the size of coal losses from blow-out using data on the aerodynamic parameters of air flows flowing around the cargo surface.

The study of the influence of train speed on the size of losses of fine coals from blowing was carried out by modeling the blowing process with varying train speeds from 20 to 140 km/h, which also allowed us to establish the speed of the beginning of the intensive blowing-out of small cargo particles – 40 km/h. This speed value is consistent with that obtained by scientists from the Siberian Transport University during mass experimental transportation of bulk cargo in the 60-70s of the last century, which indicates the adequacy of the results obtained during the modeling of the blowing process.

The results of the study made it possible to estimate numerical dependences of the size of losses of coal fine particles due to blow-out from changes in train speed, which is important to consider when choosing coal-dust mitigation measures to reduce the size of losses from blow-out. Further refinement of the obtained dependencies for other fine-grained bulk cargo seems possible using the developed aerodynamic model of the blowing process, both by specifying the value of the critical blowing speed of an individual bulk cargo, and also due to the formation of the corresponding shape of the cargo surface, characteristic of a certain loading method and the parameters of the open-top car model, which affect the loading height, is an equally important factor determining the size of losses from blowing.

Keywords: losses due to blow-out, fine coals, open-top rolling stock, coal transportation, cargo safety during transportation, aerodynamics of an open-top car with cargo.

Транспортировка каменного угля занимает значительную долю в общем объеме погрузки (более 28 % по итогам 2024 г. [1]), а также в грузообороте по сети железных дорог России. Вместе с тем тенденции последних лет свидетельствуют о существенной переориентации направлений транспортировки углей с запада на восток, что связано, с одной стороны, с влиянием геополитических событий на экономический курс стран Запада, а с другой стороны, с развитием партнерских отношений с такими странами Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР), как Китай, Индия и Южная Корея, являющимися крупнейшими потребителями российского угля (45, 17 и 12 % российского экспорта угля в 2023 г. соответственно) [2].

Вследствие нарастающей нагрузки на Восточный полигон в марте 2022 г. были введены правила приоритета перевозок грузов с высокой добавленной стоимостью, к которым уголь не относится. Даже с учетом данного сдерживающего фактора транспортировки угля его объем экспорта через Восточный полигон составил 70 % от всего объема перевозок на полигоне по итогам 1-го квартала 2023 г. [2]. Приоритетными к транспортировке на экспорт остались угли марок антрацит и коксующийся, что отражается на динамике добычи угля в 2021 – 2023 гг. (рисунок 1 [2]). Согласно рисунку 1 объемы добычи антрацита и коксующегося (с учетом обогащения) угля имеют положительную динамику, а производство прочих марок углей снизилось. На фоне данной тенденции экспорта российского угля его внутреннее потребление имеет положительную динамику (на 4 % в 2023 г.) за счет повышения производственных мощностей металлургических предприятий (коксующийся уголь), а также топливной энергетики и химической промышленности (лигнит).

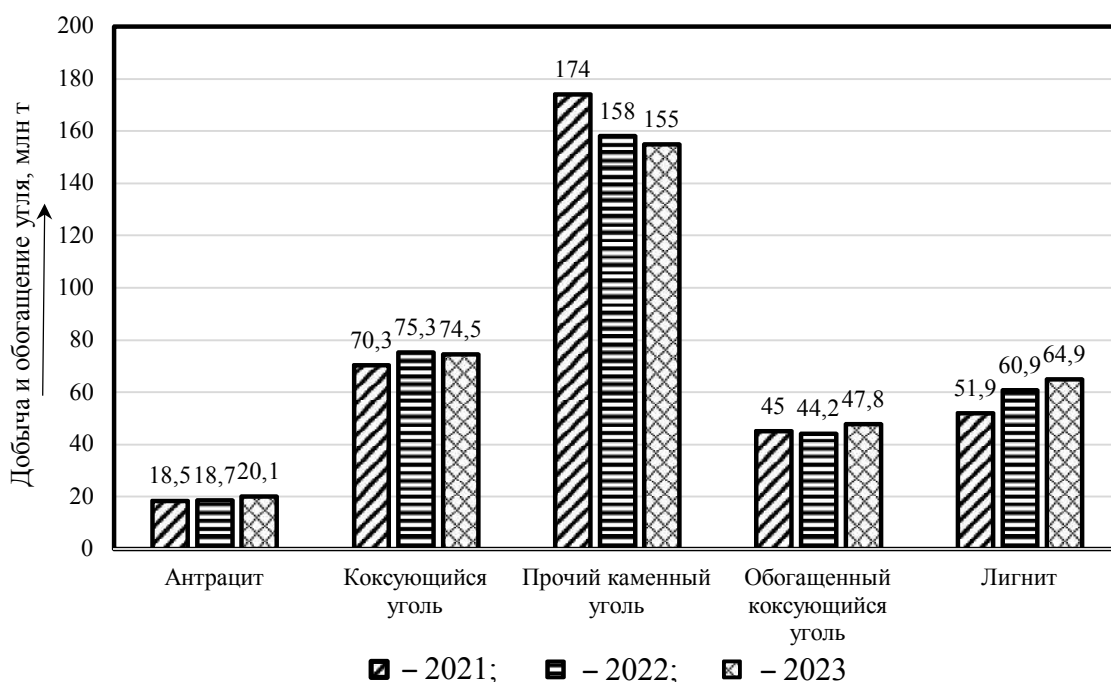


Рисунок 1 – Динамика добычи угля в России за январь – сентябрь с 2021 по 2023 г., млн т [2]

С учетом обозначенных выше тенденций роста загруженности Восточного полигона Российских железных дорог транспортировкой экспортного угля на открытом подвижном составе (ОПС) в адрес стран АТР необходимо отметить, что данный рост пропорционально будет сопровождаться увеличением негативного влияния выдуваемой угольной пыли как на инфраструктуру железных дорог (загрязнение балласта), так и на окружающую среду, что в условиях существенных ограничений пропускной способности железных дорог Восточной Сибири и Дальнего Востока приведет к снижению надежности функционирования железных дорог и, как следствие, к ухудшению ритмичности поставок экспортного угля конечным потребителям. Данное положение свидетельствует о необходимости развития и широкомас-

штабного применения профилактических мероприятий, направленных на снижение потерь угля от выдувания при транспортировке на ОПС.

Ввиду того, что размеры потерь углей от выдувания, как было установлено учеными НИИЖТа в ходе массовых опытных перевозок, существенно определяются скоростью движения поезда [3, 4], в рамках рассматриваемого исследования были проанализированы данные о реализуемых в настоящее время и перспективных скоростях движения грузовых поездов. Следует отметить, что в настоящее время максимально допускаемое значение скорости движения грузовых поездов, установленное ПТЭ, составляет 90 км/ч, в то время как на большинстве двухпутных участков железных дорог России фактически реализуется значение только 80 км/ч, а на однопутных – 60 км/ч, что связано с существующими ограничениями по состоянию инфраструктуры [5]. В свою очередь обозначенный в Стратегии развития железнодорожного транспорта до 2030 г. перспективный рост скоростей движения грузовых поездов до 140 км/ч (как один из целевых параметров грузовых вагонов [6]) создает основу не только для совершенствования конструкции и состояния верхнего строения пути и подвижного состава, но и для развития мероприятий по снижению потерь мелкодисперсных сыпучих грузов от выдувания при их перевозке в полувагонах. Таким образом, обозначенные значения скорости движения поезда были учтены при дальнейшем моделировании процесса выдувания, что позволило численно оценить влияние роста скорости движения поезда на величину потерь углей мелких фракций от выдувания в современных условиях перевозки.

Для исследования воздействия различных факторов перевозки, в том числе скорости движения поезда, на величину потерь мелкодисперсных углей от выдувания была разработана аэродинамическая модель процесса выдувания с применением специализированного ПО в области исследования гидрогазодинамики, описанная в исследовании [7]. Указанная модель представляет собой аэродинамическую трубу, на входе которой задается значение скорости обтекающих состав поезда воздушных потоков (равна скорости движения поезда), а на выходе – нулевое давление, что соответствует условию свободного выхода воздуха.

Модель позволяет получать как качественные характеристики обтекающих поверхность груза воздушных потоков (эпюры скоростей воздуха, области разрежений и повышенных давлений, завихрений воздушных потоков и др.), так и численные зависимости значений их параметров от условий движения полувагона в составе поезда. Необходимость уточнения этих экспериментальных данных была отмечена еще в исследованиях ученых НИИЖТа, которые получали их при помощи натурных наблюдений в процессе перевозки сыпучих грузов в полувагонах [8, с. 5]. В основе разработанной модели лежит 3D-модель кузова полувагона, заполненного грузом, имеющим разровненную поверхность, что как показали результаты исследований, приведенные в работе [7], является оптимальной формой его поверхности при погрузке ниже уровня стен полувагона с точки зрения снижения потерь от выдувания и соответствует погрузке углей мелких фракций в инновационные полувагоны. В качестве экспериментальной модели для исследования аэродинамических характеристик при варьировании значений скорости движения поезда был принят кузов полувагона 12-119, заполненный углем марки АШ (0 – 6 мм). Высота погрузки, порядок расчета которой приведен в работе [7], для данного полувагона и данной марки мелкодисперсного угля составляет 395 мм ниже уровня стен. Для сравнения был произведен расчет высоты погрузки и в другие современные модели полувагонов (рассмотрено 186 моделей [8]) углей марок АШ, АС (6 – 13 мм), АМ (13 – 25 мм), АО (25 – 50 мм), результаты для некоторых из них приведены в таблице 1.

Численно оценить размер потерь угля мелкой фракции от выдувания Q , кг, можно с использованием эмпирических зависимостей, полученных в ходе массовых опытных перевозок [9]:

$$Q = \rho v_b St (0,10837 \frac{\rho v_b^2}{\gamma_0 d} + 0,1703 \frac{j_b}{g} - 0,3217 \omega - 0,3546) \cdot 10^{-2}, \quad (1)$$

где S – площадь поверхности груза в полувагоне, m^2 ; v_b – скорость воздуха вблизи поверхности груза, m/s , определяемая в ходе моделирования процесса выдувания; ρ – плотность воздуха $1,2041 \text{ кг}/m^3$, t – продолжительность перевозки, $ч$; γ_0 – действительная плотность материала частиц угля, для антрацита можно принять $1300 \text{ кг}/m^3$; d – диаметр частиц груза, m ; j_b – ускорения вертикальных колебаний на поверхности груза, которые в современных условиях перевозки могут достигать значения $1,01 \text{ м}/с^2$ [10]; ω – влажность груза, принимается равной 3 %; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м}/с^2$.

Таблица 1 – Расчет высоты погрузки угля марки А различных фракций в модели полувагонов, эксплуатирующихся на железных дорогах колеи 1520 мм (фрагмент, «←» – погрузка ниже уровня стен) [7, 8]

№ п/п	Модель	Грузо-подъемность, т	Объем кузова, m^3	Внутренние размеры кузова, мм			Высота погрузки, мм, по фракциям			
				длина	ширина	высота	АО	АМ	АС	АШ
1	12-515	65	71	12056	2826	2060	325	184	–30	–401
2	12-127	70	76	12700	2878	2060	334	193	–23	–395
3	12-295	70	75,2	12690	2890	2050	336	196	–19	–390
4	12-600-02	70,6	77	12700	2878	2060	354	212	–5	–380
5	12-753-02	69	74	12490	2660	2228	368	215	–19	–422
6	12-141	71	77	12700	2878	2060	368	225	7	–371
7	12-119	71	76	12700	2878	2060	368	225	7	–395

Стоит отметить, что при расчете потерь угля от выдувания по выражению (1) площадь выдувания принимается равной площади поверхности груза в полувагоне S , что, как показали результаты моделирования, не совсем точно отражает данный процесс. Более того, зависимости значений v_b от скорости движения поезда, полученные в ходе опытных перевозок, учитывают только вариант погрузки выше уровня стен на 200 мм, тогда как в современных условиях перевозки мелкодисперсных углей в инновационных полувагонах такая погрузка встречается все реже: из рассмотренных 186 моделей в большинстве случаев погрузка осуществляется ниже уровня стен, что приведено в таблице 2 и было рассмотрено в данном исследовании.

Таблица 2 – Распределение моделей современных полувагонов, в которые угли марки А различных фракций загружаются ниже уровня стен

Доля моделей полувагонов, загружаемых ниже уровня стен углем марки А фракций			
25 – 50 мм 29,03 %	13 – 25 мм 53,76 %	6 – 13 мм 85,48 %	0 – 6 мм 99,46 %

Для уточнения значения площади выдувания с поверхности груза, как показал анализ положений механики выдувания сыпучих материалов, необходимы данные о так называемой критической скорости выдувания частиц угля $v_{кр}$, при превышении значения которой начинается интенсивное выдувание. Согласно результатам исследования устойчивости мелкодисперсных углей к выдуванию значение $v_{кр}$ в ряде случаев составляет $2,65 \text{ м}/с$ для частиц размером $0,25 \text{ мм}$ [11]. Таким образом, с учетом получаемых в ходе моделирования процесса выдувания значений v_b над различными областями поверхности груза и значения $v_{кр}$ создается возможность для определения зон выдувания частиц угля с его поверхности и их площади, над которой значения скорости обтекающих воздушных потоков превышают $v_{кр}$, следовательно, наблюдается интенсивное выдувание.

Результаты моделирования процесса выдувания позволили установить значения v_b при перевозке угля марки АШ ниже уровня стен на 395 мм (рисунок 2, пример при скорости движения поезда $90 \text{ км}/ч$). Говоря о характере протекания воздушных потоков вблизи

поверхности груза, важно отметить, что зоны наибольшей турбулентности возникают в передней части кузова в области от передней торцевой стены до первой стойки кузова, что вызывает местное существенное увеличение значения скорости воздуха до 6,87 м/с и свидетельствует о наибольшей интенсивности выдувания в данной зоне.

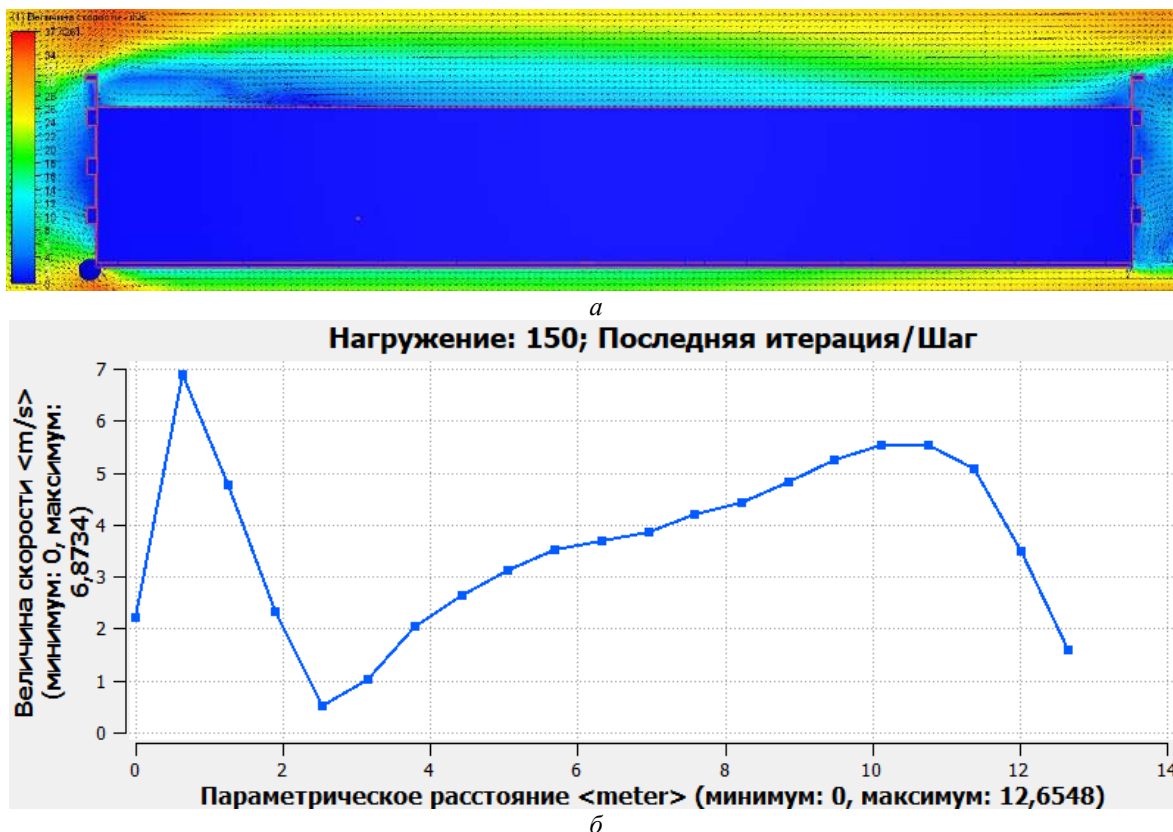


Рисунок 2 – Качественная и количественная характеристика обтекающих поверхность груза воздушных потоков (направление движения полувагона справа налево при скорости движения поезда 90 км/ч): распределение эпюры скоростей воздушных потоков, обтекающих поверхность груза с областями завихрений (а) и изменение значений v_b по длине кузова вагона (б)

Дальнейшее моделирование процесса выдувания позволило установить зависимость значений v_b при варьировании скорости движения поезда от 20 до 140 км/ч (рисунок 3).

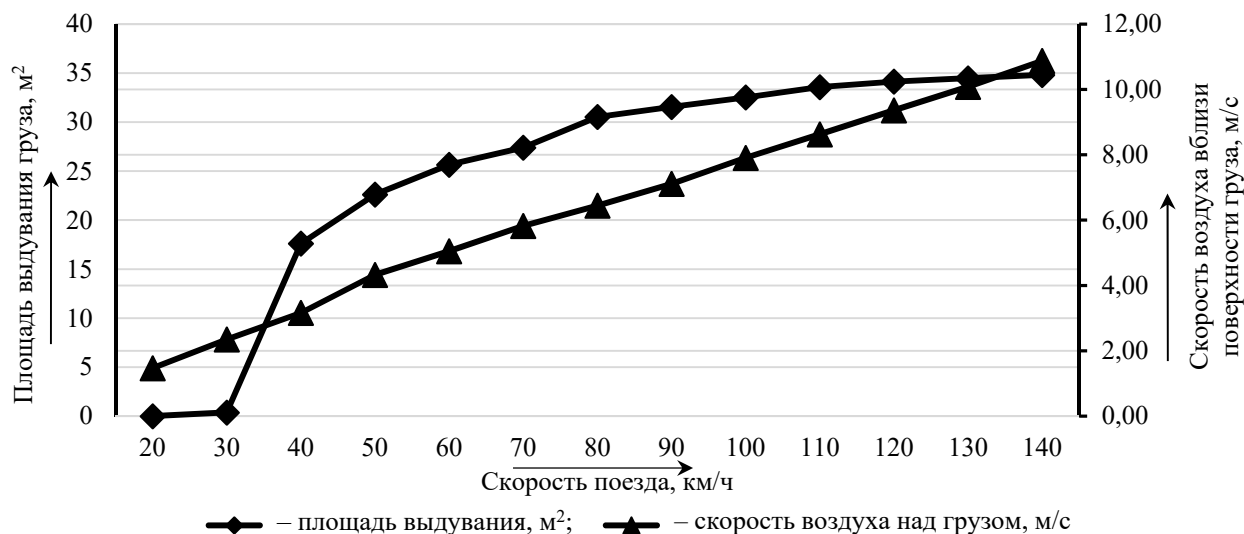


Рисунок 3 – Зависимости скорости воздушных потоков над поверхностью груза и площади выдувания от изменения скорости движения поезда, полученные в результате моделирования процесса выдувания

Кроме того, были определены значения площади выдувания S_B при каждом варианте скорости поезда. Конфигурация некоторых из них приведена на рисунке 4.

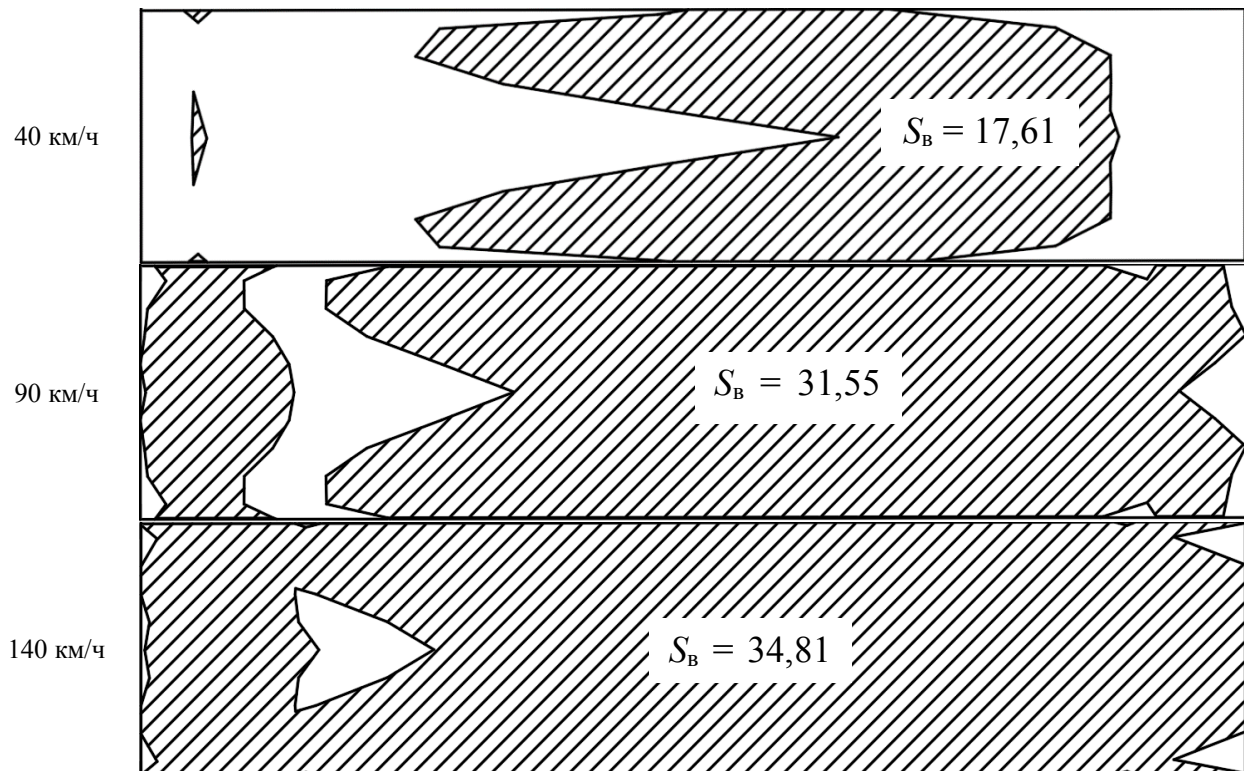


Рисунок 4 – Конфигурация площади выдувания груза с поверхности в полувагоне модели 12-119 при некоторых значениях скорости движения поезда (погрузка угля марки АШ ниже стен на 395 мм, вид сверху, направление движения вагона справа налево)

Согласно полученным результатам можно установить:

а) интенсивное выдувание мелких частиц груза с его поверхности начинается при скорости движения поезда 40 км/ч (площадь выдувания при скорости движения поезда 30 км/ч составляет всего $0,37 \text{ м}^2$, а при скорости 40 км/ч – уже $17,61 \text{ м}^2$), что соответствует полученным в ходе опытных перевозок результатам [9, с. 15];

б) при любом значении скорости движения поезда в области за первой по ходу движения стойкой кузова полувагона наблюдается зона «штиля», обусловленная влиянием возвышения передней торцевой стены, когда обтекающие состав поезда воздушные потоки перенаправляются в заднюю часть поверхности груза (так называемый эффект «фальшборта»);

в) при изменении скорости движения поезда от 20 до 140 км/ч значения S_B подчиняются логарифмическому закону, зависимость которой при аппроксимации полученных значений приведена в выражении (2), а значения v_B – линейной зависимости, аппроксимация по которой приведена в выражении (3) (см. рисунок 3):

$$S_B = 16,506 \ln(v_{\pi}) - 44,474; \quad (2)$$

$$v_B = 0,0796v_{\pi} + 0,0713. \quad (3)$$

Полученные в ходе моделирования процесса выдувания результаты позволяют уточнить расчет потерь мелкодисперсных углей от выдувания при их погрузке ниже уровня стен и варьировании значений скорости движения поезда. Расчет производится следующим образом:

а) определяется среднее значение скорости воздушных потоков над поверхностью груза по рисунку 3 или выражению (3): при скорости движения поезда 90 км/ч данное значение составляет 7,11 м/с;

б) определяется площадь выдувания мелких частиц с поверхности груза по рисунку 3 или выражению (2): при скорости движения поезда 90 км/ч данная величина составит 31,55 м²;

в) определяется время транспортировки груза t на заданное расстояние: например, при расстоянии перевозки 2000 км:

$$t = \frac{2000}{90} = 22,22 \text{ ч};$$

г) с использованием выражения (1) и полученных в ходе моделирования значений определяются возможные потери груза от выдувания (при допущении непрерывной перевозки с рассматриваемой скоростью на заданное расстояние, в реальности необходимы данные о распределении времени следования поезда с соответствующей скоростью на всем протяжении перевозки):

$$Q = 1,2041 \cdot 7,11 \cdot 31,55 \cdot 22,22 \cdot (0,10837 \cdot \frac{1,2041 \cdot 7,11^2}{1300 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} + 0,1703 \frac{1,01}{9,81} - 0,3217 \cdot 3 - 0,3546) \cdot 10^{-2} = 1140,12 \text{ кг}.$$

Результаты моделирования процесса выдувания в виде величины потерь мелкодисперсного угля марки АШ при других значениях v_n приведены на рисунке 5.

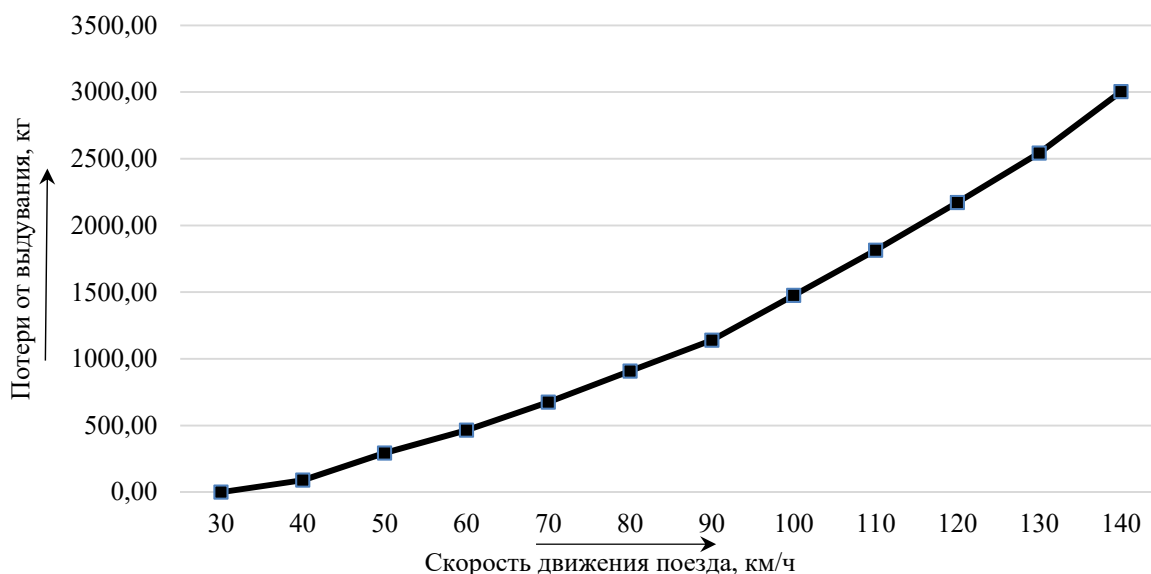


Рисунок 5 – Зависимость величины потерь угля марки АШ при увеличении скорости движения поезда с 30 до 140 км/ч при перевозке на расстояние 2000 км

Регрессионный анализ полученной зависимости позволил установить, что при перевозке на 2000 км размеры потерь наиболее точно аппроксимируются полиномом второй степени:

$$Q = 0,1517v_n^2 + 1,3609v_n - 177,09. \quad (4)$$

Анализ полученных зависимостей, приведенных на рисунке 3, позволил установить, что при скорости движения поезда свыше 120 км/ч снижается интенсивность увеличения площади выдувания груза, в то время как скорость воздуха над грузом v_b продолжает расти. Кроме того, несмотря на то, что с увеличением скорости движения поезда сокращается общее время нахождения груза в движении, потери от выдувания только растут, что говорит о наибольшем влиянии скорости движения поезда на интенсивность выдувания мелких частиц груза в соответствующих областях его поверхности в полувагоне.

Анализ полученных в ходе моделирования процесса выдувания мелкодисперсных углей в зависимости от скорости движения поезда позволил установить следующие положения:

а) при погрузке ниже уровня стен полувагона интенсивное выдувание мелких частиц угля начинается при скорости движения поезда 40 км/ч, когда значения скорости воздушных потоков вблизи поверхности груза начинают превышать критическое значение (для мелких углей 2,65 м/с);

б) скорость движения поезда оказывает существенное влияние на величину потерь мелкодисперсных грузов от выдувания, которая описывается полиномом второй степени, что соответствует результатам опытных перевозок углей в полувагонах;

в) полученные в ходе моделирования зависимости площади выдувания, скорости воздуха вблизи поверхности груза и величины потерь мелкодисперсных углей от скорости движения поезда позволяют актуализировать имеющиеся научные разработки по снижению потерь от выдувания с учетом сложившихся современных условий перевозки, когда погрузка углей мелких фракций осуществляется ниже уровня стен кузова полувагона;

г) дальнейшая актуализация зависимостей величины потерь других мелкодисперсных сыпучих грузов (углей других марок и фракций, иных сыпучих грузов) от выдувания возможна, во-первых, за счет уточнения значения критической скорости выдувания каждого сыпучего груза, определяемой их физико-механическими свойствами, во-вторых, путем уточнения конфигурации поверхности, которая зависит от способа погрузки данных сыпучих грузов, в-третьих, путем выбора соответствующих моделей полувагонов, так как при их загрузке до полной грузоподъемности будет отличаться высота погрузки, что согласно результатам моделирования также существенно влияет на величину потерь от выдувания.

Список литературы

1. Объем погрузки основных видов грузов на железнодорожном транспорте (с 2005 г.) // Федеральная служба государственной статистики : rosstat.gov.ru : сайт – Текст : электронный. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 23.04.2025).
2. Угольная отрасль России в 2023 году : delprof.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/ugolnaya-otrasl-rossii-v-2023-godu/?ysclid=mcivjje9ec198429254> (дата обращения: 25.04.2025).
3. Бешкетов, В. К. Пути обеспечения сохранности сыпучих грузов в условиях роста скоростей движения поездов : специальность 434 «Эксплуатация железнодорожного транспорта» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Бешкетов Всеволод Киприянович ; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта. – Москва, 1968. – 38 с. – Текст : непосредственный.
4. Бешкетов, В. К. Перевозка без потерь / В. К. Бешкетов. – Москва : Знание, 1975. – 64 с. – Текст : непосредственный.
5. Маскин, А. А. Проблемы повышения ходовой скорости движения грузовых поездов / А. А. Маскин, В. П. Могила. – Текст : непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2011. – Т. 2. – С. 51–55. – EDN RYLOFX.
6. Распоряжение от 17 июня 2008 года №877-р. О Стратегии развития железнодорожного транспорта до 2030 года // government.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://government.ru/docs/19759/> (дата обращения 27.04.2025).
7. Псеровская, Е. Д. Исследование влияния формы поверхности навалочных грузов на выдувание при транспортировке / Е. Д. Псеровская, Р. А. Овчинников. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (63). – С. 53–61. – DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_53. – EDN HUQJBE.
8. Справочник моделей грузовых железнодорожных вагонов // xn--1520-u4d3ahgsb9pe.xn--p1ai/wagon/search/ : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://xn--1520-u4d3ahgsb9pe.xn--p1ai/wagon/search/> (дата обращения: 23.06.2025).

9. Щапов, В. И. Исследование динамики и аэродинамики груженого вагона с целью совершенствования условий перевозок сыпучих грузов : специальность 05.22.08 «Эксплуатация железнодорожного транспорта» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Щапов Валерий Иванович ; Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Новосибирск, 1972. – 21 с. – Текст : непосредственный.

10. Исследование характеристик колебаний железнодорожных грузовых вагонов с целью определения технических требований к конструкции автономных пьезоэлектрических генераторов тока / И. Васильев, С. Генералов, О. Краснобаев, А. Чуприн. – Текст : непосредственный // Наноиндустрия. – 2016. – № 3 (65). – С. 72–77. – EDN VWXHFB.

11. Валиев, Н. Г. Разработка технологии закрепления пылящей поверхности отвалов угольных разрезов : Специальность 05.15.03 «Открытая разработка месторождений полезных ископаемых»; 11.00.11 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Валиев Нияз Гадым-оглы ; Уральская государственная горно-геологическая академия. – Екатеринбург, 1994. – 165 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Ob'ëm pogruzki osnovnykh vidov грузов na zheleznodorozhnom transporte (s 2005 g.). Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki* [Volume of loading of main types of cargo by rail transport (since 2005). Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (accessed 23.04.2025).

2. *Ugol'naya otasl' Rossii v 2023 godu* [Coal industry of Russia in 2023]. Available at: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/ugolnaya-otasl-rossii-v-2023-godu/?ysclid=mcivjje9ec198429254> (accessed 25.04.2025).

3. Beshketo V. K. *Puti obespecheniya sokhrannosti sypuchikh грузов v usloviakh rosta skorostei dvizheniya poezdov* (Ways to ensure the safety of bulk cargo under conditions of increasing train speeds). Author's abstract of doctor's thesis, Moscow, VNIIZhT, 1968, 38 p. (In Russian).

4. Beshketo V.K. *Perevozka bez poter'* [Transportation without losses]. Moscow, Knowledge Publ., 1975, 64 p. (In Russian).

5. Maskin A.A., Mogila V.P. Problems of increasing the running speed of freight trains. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke – Scientifically technical and economical cooperation in Asia-Pacific countries in the 21st century*, 2011, vol. 2, pp. 51-55. EDN RYLOFX. (In Russian).

6. *Rasporiazhenie ot 17 iyunia 2008 goda №877-r. O Strategii razvitiia zheleznodorozhnogo transporta do 2030 goda* [Order of June 17, 2008 No. 877-r. On the Strategy for the Development of Railway Transport until 2030]. Available at: <http://government.ru/docs/19759/> (accessed 27.04.2025).

7. Pserovskaya E.D., Ovchinnikov R.A. Influence investigation of bulk cargo surface shape on blowing during transportation. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya – The Siberian Transport University Bulletin*, 2022, no. 4(63), pp. 53-61. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_53. EDN HUQJBE. (In Russian).

8. *Spravochnik modelei грузовых zheleznodorozhnykh vagonov* [Handbook of models of freight railway cars]. Available at: <https://xn--1520-u4d3ahgsb9pe.xn--plai/wagon/search/> (accessed 23.06.2025).

9. Shchapov V.I. *Issledovanie dinamiki i aerodinamiki gruzhenogo vagona s tsel'iu sovershenstvovaniia uslovii perevozok sypuchikh грузов* (Study of the dynamics and aerodynamics of a loaded wagon in order to improve the conditions for transporting bulk cargo). Author's abstract of doctor's thesis. Novosibirsk, SGUPS, 1972, 21 p. (In Russian).

10. Vasiliev I., Generalov S., Krasnobayev O., Chuprin A. Study of vibration characteristics of railroad freight cars to determine technical design requirements to self-contained piezoelectric generators. *Nanoindustriia – Nanoindustry*, 2016, no. 3(65), pp. 72-77. EDN VWXHFB. (In Russian).

11. Valiev N. G. *Razrabotka tekhnologii zakrepleniia pyliashchei poverkhnosti otvalov ugol'nykh razrezov* (Development of technology for fixing the dusty surface of open-pit coal dumps). Doctor's thesis, Ekaterinburg, Ural State Mining and Geological Academy, 1994, 165 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Овчинников Роман Андреевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Аспирант, преподаватель кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав», СГУПС.

Тел.: +7 (953) 858-75-82.

E-mail: roma.r1999@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ovchinnikov Roman Andreevich

Siberian State Transport University (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Postgraduate student, lecturer of the department «Logistics, commercial work and rolling stock», STU.

Phone: +7 (953) 858-75-82.

E-mail: roma.r1999@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Овчинников, Р. А. Влияние скорости движения поезда на размеры потерь мелкодисперсных углей от выдувания / Р. А. Овчинников. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 20 – 29.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ovchinnikov R.A. Influence of train speed on the loss of fine coals due to blow-out. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 20-29. (In Russian).

УДК 656.21

К. М. Тимухин¹, А. А. Пархоменко², В. В. Лесных¹

¹Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
г. Екатеринбург, Российская Федерация;

²Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре (ПКБ И) – филиал ОАО «РЖД»,
г. Москва, Российская Федерация

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ – ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. В статье рассматривается проблема несоответствия инвестиционных вложений в реконструктивные мероприятия и новые проекты развития железнодорожных станций. Непосредственное устранение инфраструктурных ошибок требует серьезных материальных затрат. Авторы предлагают способ снижения негативных последствий от структурных дисбалансов при проектировании станций с помощью имитационного моделирования.

В имитационной модели наиболее корректно отображается структура станции и гармонично накладывается технология работы станции, а также учитываются взаимодействие случайных технологических процессов и диспетчерское управление. Это перспективный подход к исследованию транспортных объектов с использованием отечественных разработок в данной отрасли.

Так как стоимость транспортной инфраструктуры крайне высока, возникают повышенные требования к методикам расчетов и планирования. В статье описывается важность использования имитационных моделей при проектировании транспортных объектов.

Приводятся примеры экспериментов на модели, доказывающие корректность результатов расчетов.

Важным моментом является автоматизация процесса построения имитационной модели, благодаря этому исключаются случайные ошибки и неточности, ведущие к некорректным финансовым затратам.

Ключевые слова: железнодорожная станция, полигон, технология, имитационное моделирование, проектирование станций.

Kirill M. Timukhin¹, Andrej A. Parhomenko², Vladislav V. Lesnykh¹

¹Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, the Russian Federation;

²Infrastructure Design and Engineering Bureau (PKB I) – a branch of PJSC "Russian Railways",
Moscow, the Russian Federation

SIMULATION MODELLING – A TOOL FOR EVALUATING THE DESIGN OF TRANSPORTATION OBJECTS

Abstract. The article considers the problem of inconsistency between investment in reconstruction measures and new projects for the development of railway stations. Direct elimination of infrastructural errors requires serious material

costs. The authors propose a way to reduce the negative consequences of structural imbalances in station design by means of simulation modeling.

The simulation model most correctly displays the structure and harmoniously superimposes the technology of station operation, as well as takes into account the interaction of random technological processes and dispatch control. This is a promising approach using domestic developments in this industry.

Since the cost of transportation infrastructure is extremely high, there are increased requirements for calculation and planning methods. The article describes the importance of using simulation models in the design of transportation objects.

Examples of experiments on the model are given, proving the correctness of the calculation results.

An important point is the automation of the process of building a simulation model, thanks to which random errors and inaccuracies leading to incorrect financial costs are excluded.

Keywords: railway station, polygon, technology, simulation modeling, station design.

В Транспортной стратегии РФ до 2035 г. предусматривается «ускоренное развитие отраслей экономики и сфер жизнедеятельности за счет опережающего развития транспортной инфраструктуры и видов транспорта» [1].

Для реализации этой цели потребуется значительный объем инвестиций. Поэтому требования к корректности методов расчета транспортной инфраструктуры должны быть высокими.

Анализ показывает, что существующие методики расчета объектов железнодорожного транспорта имеют существенные недостатки и приводят к возникновению рисков в проектах развития транспортной инфраструктуры (рисунок 1). Это является следствием ошибок в теоретических положениях, на которых базируются эти методики. Например, в инструкции о расчете пропускной способности станционных горловин говорится, что структурный элемент (путь или стрелочный перевод) можно загрузить на 100 %. Однако при имитационном моделировании выявлено, что стрелочный перевод загрузить на 100 % практически невозможно, так как возникнут структурные и функциональные потери [2]. Поэтому исследование и корректировка теоретических основ построения корректных методов расчета являются весьма важной задачей.

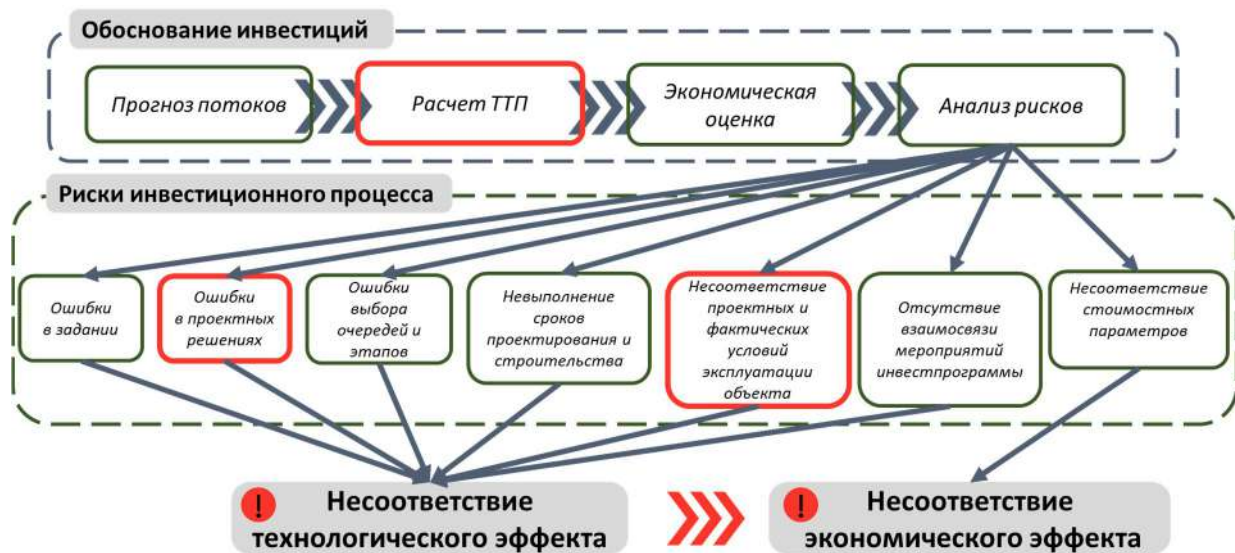


Рисунок 1 – Риски в проектах развития транспортной инфраструктуры

Интенсивное развитие экономики требует опережающего развития транспорта и, в частности, транспортной инфраструктуры. Но инфраструктура железнодорожного транспорта в стране по сравнению с этим показателем в странах с большой территорией существенно недоразвита и не соответствует растущему грузообороту по сети железных дорог.

На рисунке 2 представлена схема путевого развития железных дорог по оценке института экономики и развития транспорта. 26 % сети составляют «узкие места».

Развитие инфраструктуры потребует значительных инвестиций. Поэтому возрастают требования к корректности методов расчета и к научным основам, на базе которых они строятся.



Рисунок 2 – «Узкие места» в схеме путевого развития железных дорог

В настоящее время актуален вопрос автоматизированного построения корректных имитационных моделей транспортных объектов.

В случае построения имитационной модели технологу придется задавать достаточно большое количество параметров, описывающих структуру и технологию станции. В свою очередь для исключения возможных ошибок технолога система моделирования должна максимально автоматизировать процесс построения модели [2].

В начале развития метода имитационного моделирования пользователь сам выполнял основную работу по построению модели, задавал схему путевого развития и подробно описывал последовательность операций в технологическом процессе, но при этом возникали значительные трудности:

- а) введение большого количества данных повышало вероятность возникновения ошибок;
- б) большая трудоемкость создания модели.

На первом этапе развития системы «ИСТРА» имитационная модель строилась технологом на уровне элементов, практически вручную (рисунок 3).



Рисунок 3 – Технология построения имитационной модели на уровне элементов

Технолог вынужден был задавать не только последовательность операций в технологическом процессе, но и последовательность элементов с параметрами использования.

На современном этапе система «ИСТРА» способна строить модели на уровне операций, при этом подсистема САПР (система автоматизированного создания модели) берет на себя трудоемкую часть работы (рисунок 4).



Рисунок 4 – Технология построения имитационной модели на уровне операций

Во-первых, подсистема САПР дает возможность удобно задавать схему путевого развития.

Во-вторых, она проверяет правильность логической схемы технологического процесса.

В-третьих, подсистема самостоятельно находит на схеме путевого развития все возможные вариантные маршруты выполнения каждой операции с параметрами. Это составляет порядка 90 % всего массива исходной информации.

Кроме этого имитационная система «ИСТРА» позволяет строить модели и на уровне процессов.

В этом случае подсистема берет на себя не только трудоемкую рутинную работу, но и часть интеллектуальной работы технолога (рисунок 5).



Рисунок 5 – Технология построения имитационной модели на уровне процессов

Очевидно, что для исключения возможных ошибок технолога имитационная система должна позволять строить модели как на уровне операций, так и на уровне процессов.

На следующем этапе разработаем примерную структуру современной имитационной системы. Рассмотрим определенные принципы построения имитационной системы на примере системы «ИСТРА» [3].

Современная имитационная система должна иметь следующие подсистемы (рисунок 6):

- 1) автоматизированного построения модели;
- 2) имитации;
- 3) интеллектуальной обработки результатов моделирования.

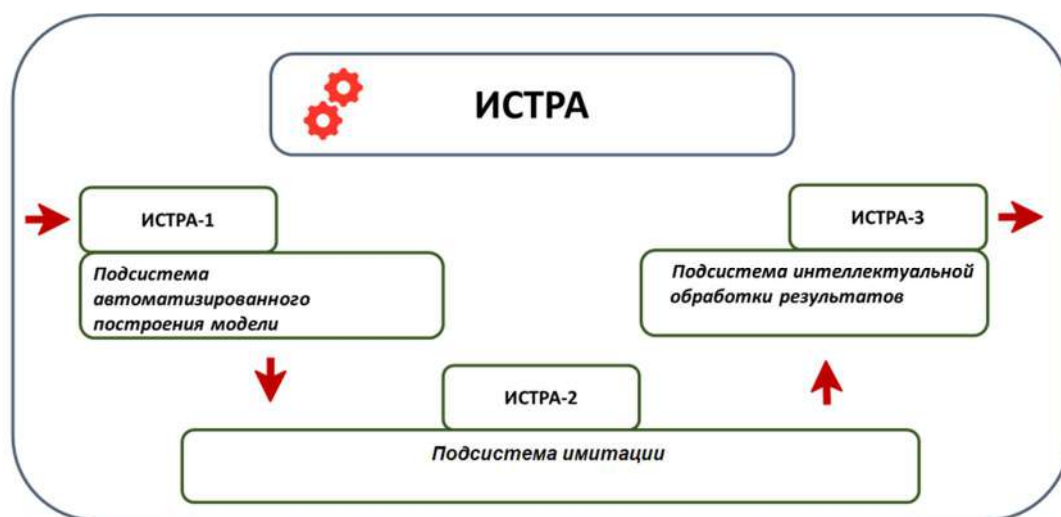


Рисунок 6 – Структурная схема имитационной системы «ИСТРА»

Подсистема автоматизированного построения крайне важна, потому что массив полного описания сложной структуры, многовариантной технологии, адаптивного управления и случайных процессов составляет для крупной станции 600 – 700 тыс. строк. В системе «ИСТРА» порядка 95 % данного описания выполняется автоматически.

Подсистема САПР выполняет также и основную часть работы по построению модели. При этом ее функции значительно сложнее (рисунок 7).



Рисунок 7 – Функции подсистемы САПР

Подсистема автоматизированного построения должна иметь хороший сервис для работы с моделью, потому что до 90 % всех затрат на создание корректной модели связано с отладкой. Поэтому системе САПР нужны соответствующие функциональные блоки.

Блок «Дизайнер» строит правильную схему путевого развития и последовательность операций в технологическом процессе.

Блок «Мультипликатор» определяет все возможные маршруты выполнения операций и заносит все параметры работы элементов.

Блок «Советник» накапливает опыт построения и отладки сложных имитационных моделей, в особенности управляемую адаптивность. Он контролирует работу неопытного исследователя и подсказывает возможные решения.

Электронный справочник должен знать правила построения схем различного вида станций, их технологические процессы, нормативные параметры выполнения типовых операций и др.

Функция блока «Контролер» – находить ошибки технолога при отображении технологического процесса и задании параметров выполнения операций.

Подсистема имитации реализует процесс моделирования и создает массив результатов, динамическую очередь операций, реализует процесс выполнения очередной операции по наилучшему варианту, фиксирует занятость всех структурных элементов, а также локомотивов и бригад пункта технического осмотра (ПТО). После окончания процесса подсистема формирует массив результатов.

Подсистема интеллектуальной обработки результатов позволяет формировать массив тщательно обработанных результатов (рисунок 8).



Рисунок 8 – Структура подсистемы формирования результатов

Для крупной станции массив результатов может составлять 50 – 60 страниц текста. В зависимости от задачи исследования результаты могут быть представлены по-разному.

Расчет пропускной и перерабатывающей способности станции, рациональное размещение грузовых фронтов, улучшение путевого развития, расчет нужного количества локомотивов – это разные задачи, поэтому форма результатов будет различаться. Подсистема должна позволять формирование готовых отчетов.

Таким образом, имитационное моделирование превосходит другие методы расчета по всем позициям (рисунок 9).

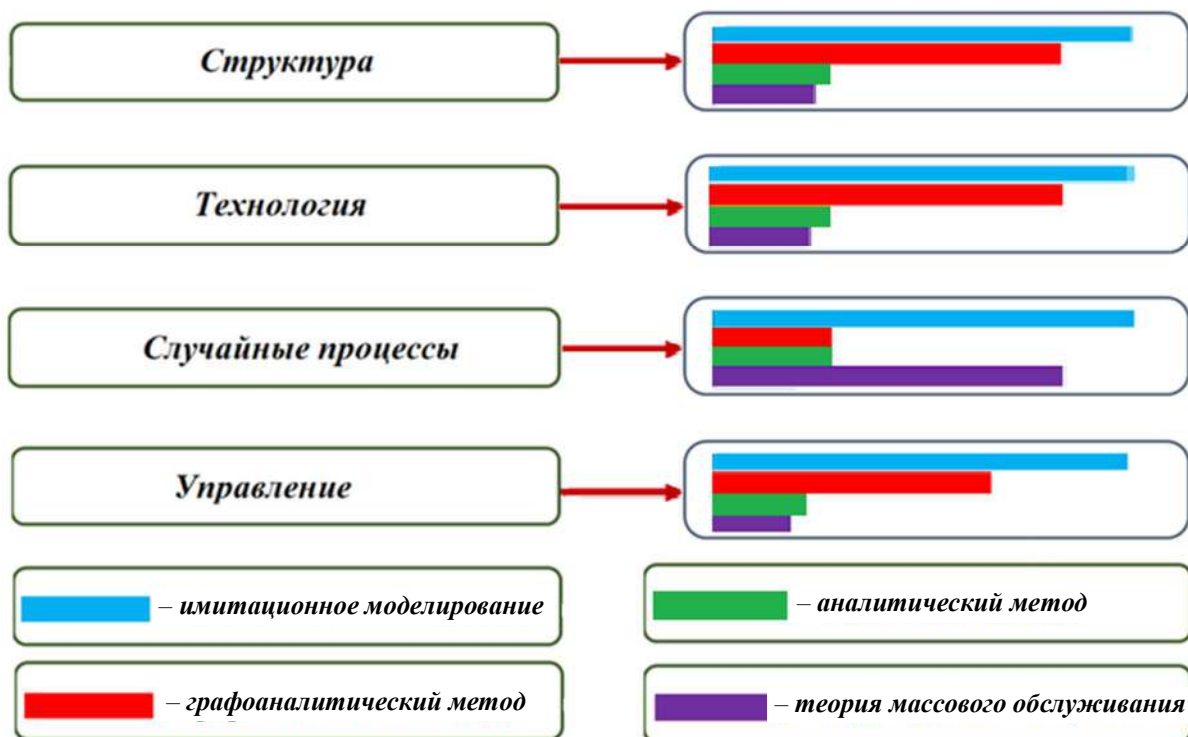


Рисунок 9 – Отображение в модели свойств транспортной системы методами расчета

Важно отметить, что все элементы станции находятся в структурной взаимосвязи и в функциональном взаимодействии с другими элементами. Отсюда следует вывод принципиальной важности.

Минимальным расчетным объектом для определения пропускной способности любого структурного элемента станции является сама станция.

Тот объем работы, который выполнил структурный элемент при полной загрузке станции, и будет его реальная пропускная способность на этой станции при этой технологии. Рассчитать пропускную способность таким образом по некоторой формуле не представляется возможным. Единственным корректным методом расчета является имитационное моделирование. Только правильно построенная имитационная модель может отобразить структурные и функциональные связи, случайные процессы и диспетчерское управление. Поэтому имитационным моделированием можно проверять и корректность других методов расчета (аналитического метода, теории массового обслуживания и т. п.), т. е. выполнять имитационную экспертизу [4].

Набор технологических операций должен позволять имитировать любой технологический процесс рассматриваемых объектов. В системе «ИСТРА» предусмотрены десятки технологических операций, каждая со своим алгоритмом выполнения, в отличие от некоторых имитационных систем, таких как Anylogic (Энилоджик), в которых описывается лишь движение некоторой материальной точки по дуге графа [5].

Естественно, система должна быть способна имитировать случайные процессы и диспетчерское управление.

Построенная модель должна обеспечивать всесторонний анализ моделируемого объекта, оценивать общую пропускную способность, определять общий и распределенный простой вагонов, а также проводить структурный анализ – оценивать загрузку путей и стрелок и задержки из-за них (рисунок 10).



ИСТРА

*Возможность
проведения
структурного анализа
путей и стрелок (в т.ч.
анализ задержек)*

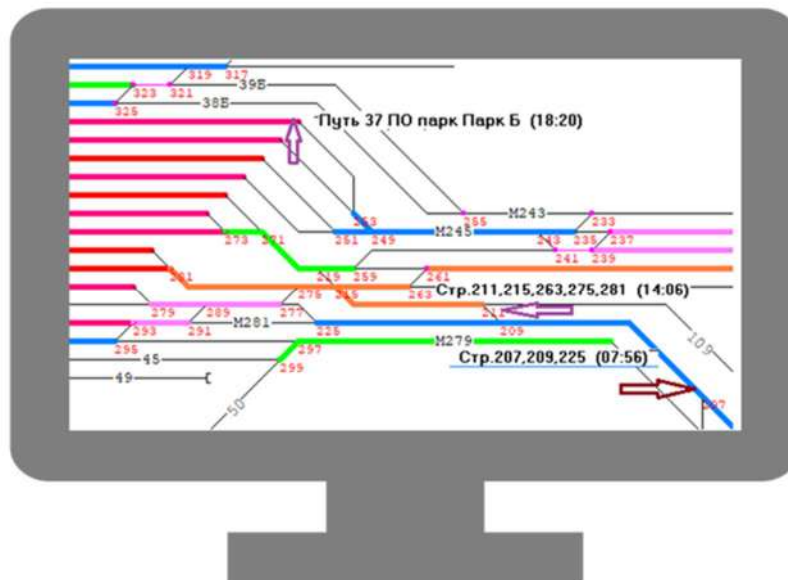


Рисунок 10 – Отображение загрузки путей и стрелочных переводов в имитационной системе

Модель должна обеспечивать также структурно-функциональный анализ – в каких операциях и насколько занят структурный элемент (рисунок 11) и функционально-структурный анализ. В модели технологический процесс представляется в виде логической последовательности операций (рисунок 12). При реализации технологического процесса в имитационной модели видно, в каких операциях возникали задержки и из-за каких структурных элементов [6].



ИСТРА

*Анализ занятости
структурных
элементов*

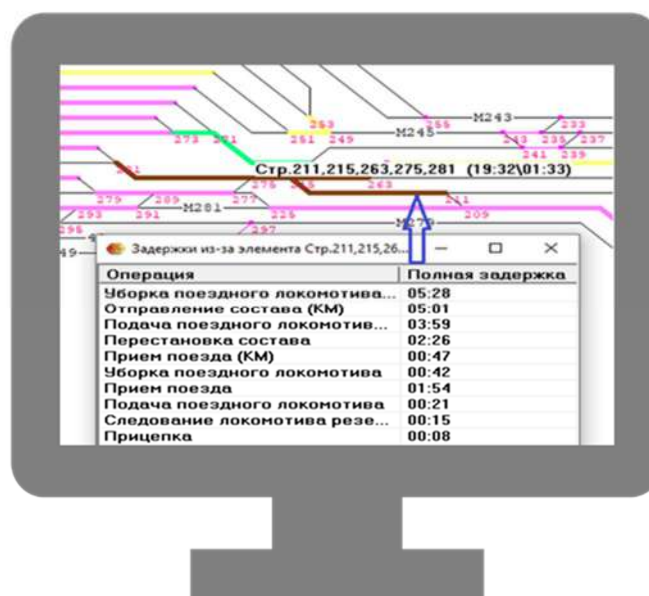


Рисунок 11 – Отображение занятости структурных элементов по времени

Управление процессами перевозок

В имитационных системах «ИСТРА» и «ИМЕТРА» уже реализован принцип открытости модели. Заказчик должен видеть не только результаты моделирования, но и процессы создания модели и реализации технологического процесса. Тогда он может больше доверять полученным результатам.

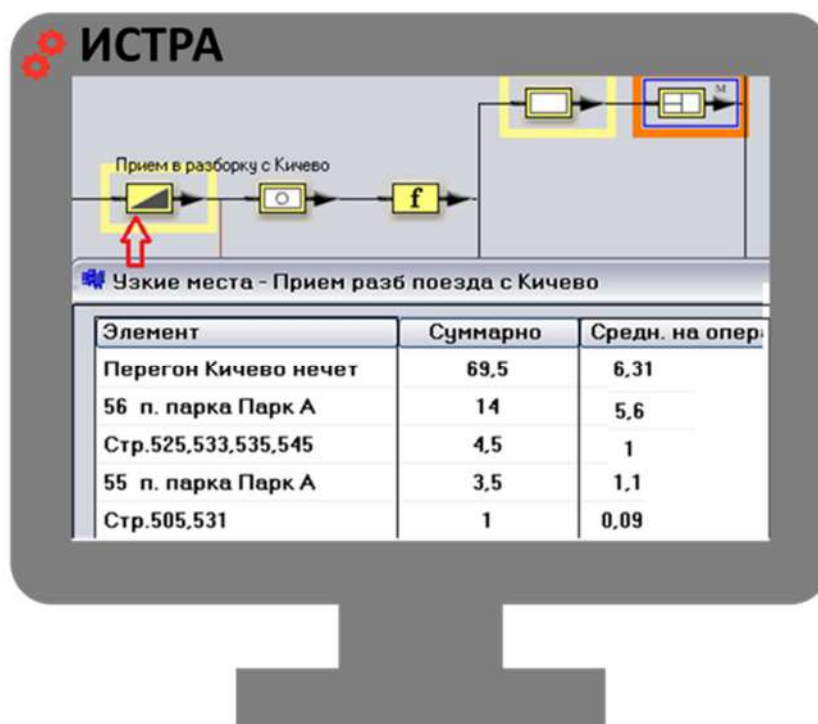


Рисунок 12 – Отображение задержек операций из-за элементов

Схему путевого развития можно посмотреть на экране. При подведении курсора к пути выдается его номер, название парка и вместимость пути в условных вагонах.

Реализацию технологического процесса можно увидеть в зафиксированном виде и в динамике. Фиксированный вариант – это график исполненной работы. При подведении курсора к выполняемой операции высвечивается ее название, время выполнения, задержка и состав поезда (рисунок 13).

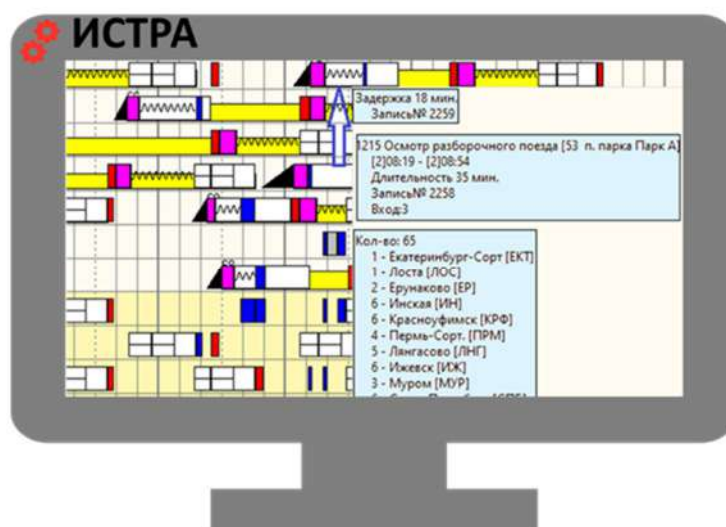


Рисунок 13 – Суточный график исполненной работы

Приведем пример имитационной экспертизы по станции Н-П. В таблице 1 представлена расчетная перерабатывающая способность, определенная по единому технологическому процессу (ЕТП), в таблице 2 – при использовании системы «ИСТРА».

Таблица 1 – Расчетная перерабатывающая способность фронтов по видам груза (ЕТП)

Род груза	Суточная перерабатывающая способность, ваг.
Черные металлы	335
Цветные металлы	168
Удобрения	47
Прочие	50
Контейнеры	106

Таблица 2 – Расчетная перерабатывающая способность погрузочно-выгрузочных фронтов по видам груза (имитационная модель)

Род груза	Суточная перерабатывающая способность, ваг.
Черные металлы	160
Цветные металлы	70
Удобрения	50
Прочие	45
Контейнеры	49

В ЕТП расчет перерабатывающей способности грузовых фронтов производится по наиболее загруженному элементу, участвующему в его работе, по формуле:

$$N = \frac{n}{k}, \quad (1)$$

где N – пропускная способность грузового фронта;

n – число погруженных/выгруженных вагонов на грузовом фронте, ваг.;

k – коэффициент пропускной (перерабатывающей) способности наиболее загруженного элемента.

В данном случае необходимо выделить два важных момента:

1) рассмотрение каждого фронта производится изолированно, в отрыве от работы узла;

2) самый загруженный элемент, обычно фронт, может быть загружен на 100 %, это именно полезная, производительная загрузка.

Очевидно, что суточная перерабатывающая способность грузовых фронтов, определенная с использованием ЕТП, будет намного больше, чем в имитационной модели.

Связано это с двумя причинами:

В теории массового обслуживания говорится, что на степень возникающих задержек оказывают влияние параметры случайного разброса во входящем вагонопотоке, а также в длительности обслуживания, в то время как в ЕТП время занятости стрелочных переводов устанавливается по формуле:

$$T = \frac{n_1 n_2 (t_1 + t_2)^2}{2 \cdot 1440}, \quad (2)$$

где n_1, n_2 – размеры передвижений по соответствующим маршрутам за сутки;

t_1, t_2 – время занятия пересечения поездом соответствующего маршрута, мин;

1440 – число минут в сутках.

Подсчитать задержки и произвести корректный расчет вручную – достаточно трудоемкая задача. Возникает вероятность не учесть занятость определенных стрелочных переводов в каких-либо операциях. Есть также вероятность некорректного указания времени занятости различными операциями. И, конечно, всегда в ручных подсчетах есть вероятность ошибки.

Вот пример различия в задержках в расчетах по ЕТП (рисунок 14).

название стрелочных переводов	графическое обозначение	ЕТП		Модель	
		заятность	задержка	заятность	задержка
Стр.215,217,219,225,227,229,231,245,247,249,251,253,255		10.56	0.48	8:36	6:27
Стр.211,213,221,223		7.44	1.44	7:45	4:16

Рисунок 14 – Параметры работы стрелочных переводов по ЕТП и в имитационной модели (скриншот из системы «ИСТРА»)

Таким образом, при проектных расчетах транспортных объектов необходимо использовать результаты имитационного моделирования, выступающие и в виде имитационной экспертизы [7]. Технология отображается в виде последовательности операций и логических условий их осуществления. В связи с этим минимальными структурными элементами в горловинах будут структурно-функциональные элементы.

Логические условия описывают взаимное влияние одних структурных элементов на другие.

В имитационной модели наиболее полно описываются структура и технология работы станции и наиболее корректно отображаются взаимодействие случайных процессов и диспетчерское управление.

Весомым фактором является автоматизация процесса построения модели, благодаря этому значительно снижается вероятность появления случайных ошибок.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р (ред. от 06.11.2024) «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» – Москва : ЦентрМАГ, 2025. – 256 с. – Текст : непосредственный.
2. Функциональное исследование структуры горловин железнодорожных станций / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. В. Якушев, К. М. Тимухин. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2024. – № 3 (82). – С. 11–14. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-3-11-14. – EDN SKUMSE.
3. Козлов, П. А. Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов / П. А. Козлов, В. Ю. Пермикин, В. С. Колокольников. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2013. – № 2 (37). – С. 3–5. – EDN QCXSPF.
4. Козлов, П. А. Оптимизация развития транспортных узлов и полигонов на основе имитационного моделирования / П. А. Козлов. – Текст : непосредственный // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». – 2023. – № 8-2. – С. 30–40. – EDN GEIEHV.
5. Adamko, N., Klima, V., & Marton, P. (2010). Designing railway terminals using simulation techniques. *International Journal of Civil Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 57-67.
6. Владимирская, И. П. Структурно-функциональный подход в зонах транспортного взаимодействия / И. П. Владимирская, К. М. Тимухин. – Текст : непосредственный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2024. – № 4 (41). – С. 26–29. – EDN WJTD RD.
7. Пархоменко, А. А. Имитационная экспертиза инфраструктурных проектов на транспорте / А. А. Пархоменко, О. В. Осокин, П. А. Козлов. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2022. – № 6 (103). – С. 19–23. – EDN CHWQSZ.

References

1. Order of the Government of the Russian Federation from 27.11.2021 N 3363-r (ed. from 06.11.2024) “On the Transport Strategy of the Russian Federation up to 2030 with a forecast for the period up to 2035”. Moscow, TsentrMAG Publ., 2025. 256 p. (In Russian).

2. Kozlov P.A., Kolokolnikov V.S., Yakushev N.V., Timukhin K.M. Functional research of the yard neck structure of railway stations. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2024, no. 3(82), pp. 11-14. DOI 10.20291/1815-9400-2024-3-11-14. EDN CKUMSE. (In Russian).
3. Kozlov P.A., Permikin V.Yu., Kolokolnikov V.S. Computer aided construction of simulation models of major transport facilities. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2013, no. 2(37), pp. 3-5. EDN QCXSPF. (In Russian).
4. Kozlov P.A. Development optimization of transport hubs and polygons based on simulation modeling. *Biulleten' uchenogo soveta AO «IERT» – Bulletin of the academic council of JSC "Institute of economics and transport development"*, 2023, no. 8-2, pp. 30-40. EDN GEIEHV. (In Russian).
5. Adamko, N., Klima, V., & Marton, P. (2010). Designing railway terminals using simulation techniques. *International Journal of Civil Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 57-67.
6. Vladimirskaia I.P., Timukhin K.M. Structural-and-functional approach in zones of transport interaction. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona – Pacific Rim countries transportation system*, 2024, no. 4(41), pp. 26-29. EDN WJTDRD. (In Russian).
7. Parhomenko A.A., Osokin O.V., Kozlov P.A. Simulation examination of infrastructure projects in transport. *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike – Transport of the Russian Federation*, 2022, no. 6(103), pp. 19-23. EDN CHWQSZ. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тимухин Кирилл Максимович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа», УрГУПС.

Тел.: +7 (343) 221-24-36.

E-mail: KTimuhin@usurt.ru

Пархоменко Андрей Александрович

Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре (ПКБ И) – филиал ОАО «РЖД».

Космонавта Волкова ул., д. 6, г. Москва, 127299, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, ведущий технолог.

Тел.: +7 (499) 260-67-89.

E-mail: parxom.87@bk.ru

Лесных Владислав Владиславович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Управление эксплуатационной работой», УрГУПС.

Тел.: +7 (343) 221-24-36.

E-mail: VLesnyh@usurt.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Тимухин, К. М. Имитационное моделирование – инструмент оценки проектирования транспортных объектов / К. М. Тимухин, А. А. Пархоменко, В. В. Лесных. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 29 – 40.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Timukhin Kirill Maksimovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Stations, hubs and cargo work», USURT.

Phone: +7 (343) 221-24-36.

E-mail: KTimuhin@usurt.ru

Parhomenko Andrej Aleksandrovich

Infrastructure Design and Engineering Bureau (PKB I) – a branch of PJSC "Russian Railways".

6, Kosmonavta Volkova st., Moscow, 127299, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, leading technologist.

Phone: +7 (499) 260-67-89.

E-mail: parxom.87@bk.ru

Lesnykh Vladislav Vladislavovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Assistant professor of the department «Operations Management», USURT.

Phone: +7 (343) 221-24-36.

E-mail: VLesnyh@usurt.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Timukhin K.M., Parhomenko A.A., Lesnykh V.V. Simulation modelling – a tool for evaluating the design of transportation objects. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 29-40. (In Russian).

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОГО ЭЛЕМЕНТА, ВКЛЮЧЕННОГО В СИСТЕМУ МАСС УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ, НА ЕГО ЖЕСТКОСТЬ

Аннотация. Предмет исследований – подрельсовое основание, содержащее вязкий элемент. Цель исследования – оценка влияния на общую жесткость железнодорожного пути включения в его упругую систему (рельсы, шпалы, балласт и т. д.) вязкого элемента. Конструкция подрельсового основания с вязким элементом описывается обобщенной моделью Максвелла и содержит оболочку, наполняемую ньютоновой жидкостью, в частности, воздухом. Рассматривались пневматические оболочки с разной толщиной. Моделирование проводилось в среде конечно-элементного анализа. Построены математические модели участка пути с подрельсовым устройством, содержащим пневмооболочку.

Результаты расчетов показали отсутствие резкого увеличения внутренних силовых факторов и концентрации напряжений в характерных сечениях пути при укладке подрельсового основания с пневматическим элементом. Изменение общей жесткости в вертикальной плоскости не привело к существенному изменению изгибных напряжений в кромках рельсов. При малой толщине оболочки изгибные напряжения в верхней области шпалы уменьшаются до 35 %, а в нижней области шпалы на 15 %. Максимальный рост изгибных напряжений в оболочках до 8 % наблюдается при резком перепаде толщин оболочек. Сжимающие напряжения на шпале в подрельсовой зоне увеличиваются при малой толщине оболочки устройства из-за перераспределения усилий на меньшее количество подрельсовых опор при изменении общей жесткости конструкции. Увеличение толщины оболочек до 40 см приводит к росту механических напряжений до 20 %, что является допустимым значением с большим запасом. Применение подрельсовых оснований с вязким элементом рекомендуется для временного железнодорожного пути при его укладке взамен балласта и шпал, что позволяет оперативно уложить путь и также оперативно демонтировать его.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельс, подрельсовое устройство, моделирование, конечно-элементный анализ.

Anna V. Sycheva¹, Dmitry V. Ovchinnikov², Vyacheslav P. Sychev¹

¹Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation;

²Volga State Transport University (VSTU), Samara, the Russian Federation

THE INFLUENCE OF A VISCOUS ELEMENT INCLUDED IN THE SYSTEM OF MASSES OF ELASTIC ELEMENTS OF A RAILWAY TRACK ON ITS RIGIDITY

Abstract. The subject of the research is a sub-rail foundation containing a viscous element. The purpose of the study is to evaluate the effect of including a viscous element in the elastic system (rails, sleepers, ballast, etc.) on the overall rigidity of a railway track. The design of a sub-rail foundation with a viscous element is described by the generalized Maxwell model and contains a shell filled with a Newtonian fluid, in particular air. Pneumatic shells with different thicknesses were considered. The modeling was carried out in the finite element analysis environment. Mathematical models of a track section with a sub-rail device containing a pneumatic shell were constructed. The calculation results showed the absence of a sharp increase in internal force factors and stress concentration in typical track sections when laying a sub-rail foundation with a pneumatic element. A change in the overall rigidity in the vertical plane did not lead to a significant change in bending stresses in the edges of the rails. With a small shell thickness, the bending stresses in the upper area of the sleeper decrease to 35 %, and in the lower area by 15 %. The maximum increase of up to 8 % is observed with a sharp difference in the shell thicknesses. Compressive stresses on the sleeper in the under-rail zone increase with a small shell thickness of the device due to the redistribution of forces to a smaller number of under-rail supports when the overall rigidity of the structure changes. Increasing the shell thickness to 40 cm leads to an increase in mechanical stresses of up to 20 %, which is an acceptable value with a large margin. The use of under-rail foundations with a viscous element is recommended for temporary railway tracks when laying them instead of ballast and sleepers, which allows for the track to be quickly laid and also quickly dismantled.

Keywords: track, rail, under-rail device, modeling, finite element analysis.

Взаимодействие пути и подвижного состава описывается [1, 2] в виде колебаний системы, состоящей из упругих элементов, определяющих жесткость пути. Общая жесткость пути

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

зависит от материалов, из которых эти элементы изготовлены, а также от физико-механических свойств данных материалов: модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность материала [3]. Наиболее распространенные в железнодорожном пути материалы и их свойства приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства материалов элементов конструкции железнодорожного пути

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Рельсы (сталь)	7850	$2,1 \cdot 10^5$	0,3
Полимерные материалы	1100	7500	0,35
Прокладка (резина)	1000	75	0,4
Шпала (бетон)	2500	32500	0,2

Рассмотрена типовая конструкция пути с рельсами Р65 на железобетонных шпалах с промежуточными рельсовыми скреплениями ЖБР-Ш и толщиной балластного слоя 30 см, эксплуатируемая на сети дорог ОАО «РЖД», в виде трехмерной геометрической модели, приведенной на рисунке 1.

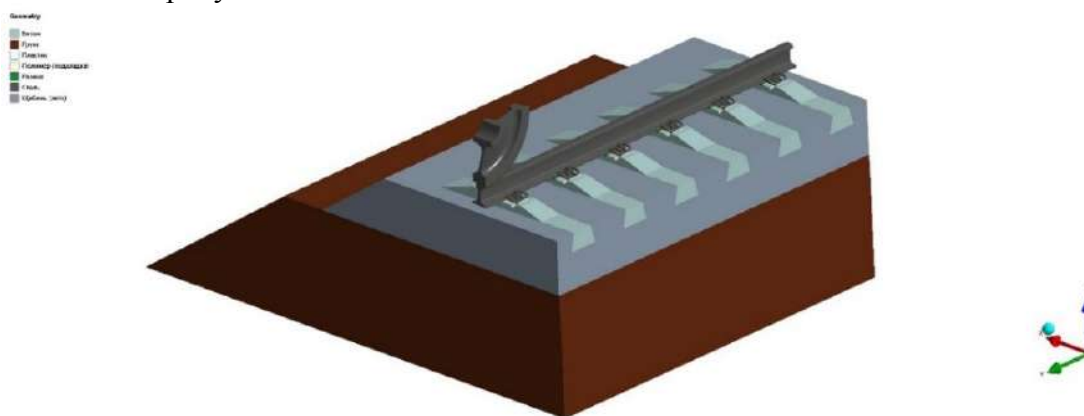


Рисунок 1 – Трехмерная геометрическая модель эксплуатируемого участка пути (ЖБР-Ш, 1840 шп./км)

На основе трехмерной геометрической модели с применением алгоритмов конечно-элементного анализа [4 – 6] с мощностью 2,3 млн узлов с использованием тетраэдров второго порядка с 10 узлами на элемент построены математические модели взаимодействия колеса и рельса. Качественный параметр сетки (Element Quality) имеет значение моды, близкой к 0,8 – 0,9, что позволяет получить незначительную разницу выходных данных в узлах, относящихся в одному элементу (Nodal Difference). Это достигается сгущением сетки элементов в местах концентрации деформаций и напряжений. Причем с целью уменьшения узлов и элементов модели можно применить свойства симметрии модели. Нелинейные свойства слоистой структуры балластной призмы и земляного полотна описываются моделью пластичности Мора – Кулона. Модель строится для конкретного железнодорожного пути со следующими характеристиками и свойствами материалов элементов железнодорожного пути.

Б а л л а с т н а я п р и з м а. Щебень фракции 25 – 60 мм в уплотненном состоянии при эксплуатации в зимний период с плотностью 1,8 т/м³, модулем упругости 260 МПа, коэффициентом Пуассона 0,29; в летний период – с плотностью 1,6 т/м³, модулем упругости 200 МПа, коэффициентом Пуассона 0,26. Удельное сопротивление от 0,15 до 0,18 кг/см², угол внутреннего трения от 40° до 43°, угол дилатансии 15°.

Г р у н т з е м л я н о г о п о л о т н а. Сыпучий материал с плотностью 1,7 т/м³, модулем упругости 110 МПа, коэффициентом Пуассона 0,38.

Усилия на рельсы от колес подвижного состава, кН:

- вертикальные – 29,42; 115,23; 122,58; 132,39 и 147,1;
- боковые – 0 и 14,71.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Передача нагрузки от колеса на рельсы в зоне взаимодействия колеса с рельсом. При расчетах принималось движение по участку вагона с нагрузкой на ось 25 тс. Параметры жесткости упругих элементов верхнего строения пути получены из справочных данных.

На рисунках 2 и 3 приведены сетка элементов модели участка пути с описанными выше характеристиками и качественные параметры сетки, близкие по моде к 0,9, что говорит о высоком качестве построения сетки конечных элементов.



Рисунок 2 – Сетка элементов участка пути исследуемого участка

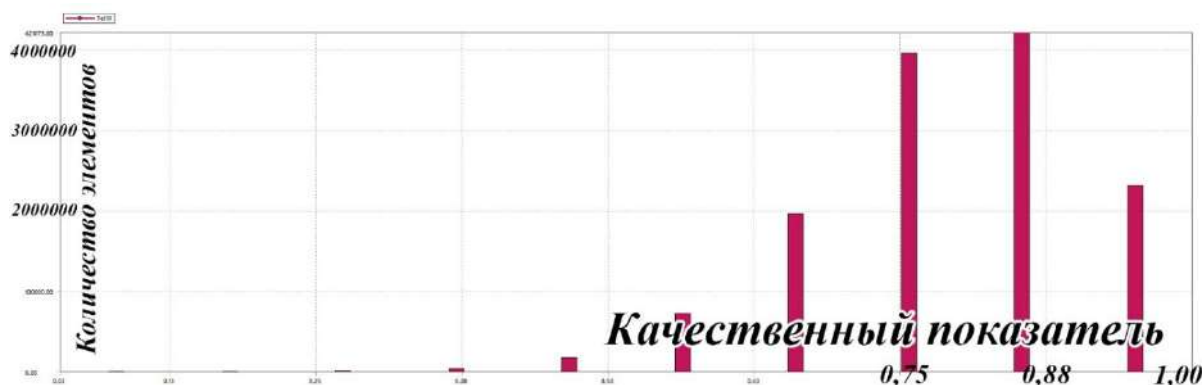


Рисунок 3 – Качественная характеристика сетки элементов исследуемого участка пути

Такая конфигурация конечно-элементной модели железнодорожного пути позволяет учитывать при моделировании следующие особенности: перемещение колеса по головке рельса при изменении угла раскантировки; затяжку крепежителей с учетом силы трения между клеммой и рельсом; отрыв прокладки от подкладки при значительной раскантировке рельса со смещением усилий, передаваемых через подошву рельса на нижележащие элементы; опирание рельса в реборду подкладки при боковом смещении.

В результате моделирования получены величины напряжений в элементах верхнего строения пути, контуры которых при максимальной нагрузке изображены на рисунках 4 и 5.

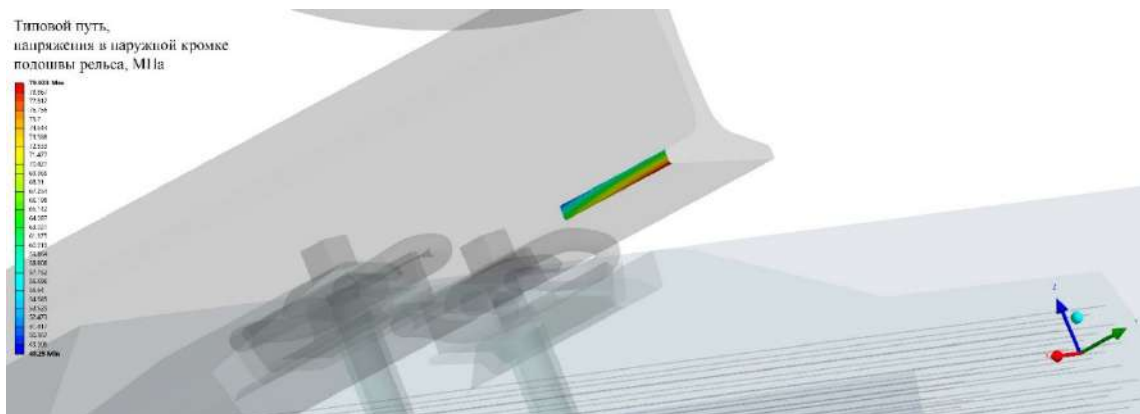


Рисунок 4 – Напряжения в наружной кромке подошвы рельса эксплуатируемого пути

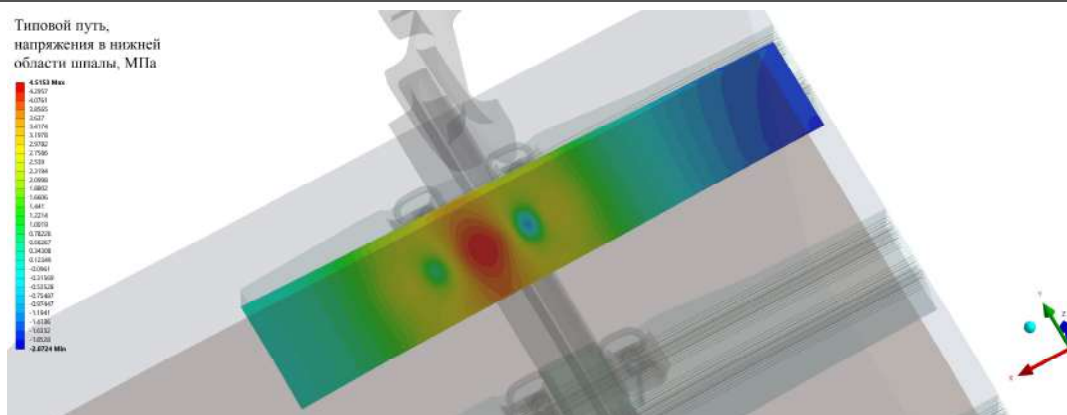


Рисунок 5 – Напряжения в нижней области шпалы эксплуатируемого пути

Анализ полученных материалов позволил оценить возможность изменения жесткости пути в относительно широком диапазоне за счет повышения эластичности подкладок, шпал, других элементов пути с изменением их конструкции и материалов. Однако регулировать жесткость участка в этом случае можно исключительно при замене элементов пути. Предлагается в конструкцию пути, как «скелета» последовательно соединенных упругих элементов (рисунок 6, а), добавить составляющую на основе ньютоновой жидкости (рисунок 6, б) [7]. Например, конструкцию подрельсового основания в виде оболочки из резинокордового износостойкого ролик-мешка с коническими торцами и резьбовыми втулками на них с узлом контроля давления и вентилем для подачи в оболочку сжатого воздуха, рым-болтом для перемещения устройства при эксплуатации и армированным каркасом.



Рисунок 6 – Схемы упругого и упруговязкого «скелетов» пути из упругих элементов (а) и по модели Максвелла (б)

Таким образом, получаем вязкоупругий «скелет» железнодорожного пути, в котором динамическая деформация разных элементов в вязкоупругом «скелете» пути восстанавливается с разной скоростью – упругие элементы быстрее, вязкие – медленнее [8]. В этом случае из-за разности фаз циклической нагрузки механическая энергия рассеивается, жесткость пути уменьшается и гасятся ударные воздействия колеса о рельс [9].

Моделирование железнодорожного пути с подрельсовыми основаниями на основе подрельсовых устройств, содержащими оболочки разных конструкций, осуществлялось следующим образом. Оболочка, уложенная под шпалы, наполнялась воздухом таким образом, чтобы обеспечить разную ее толщину, а именно: 10, 20, 30 и 40 см, а также разные сочетания толщин: резкий перепад толщины с 10 до 40 см; резкий перепад толщины с 40 до 10 см; плавный переход толщины от 40 к 10 см. Варианты моделирования иллюстрируются рисунком 7.

Свойства изотропных линейно-упругих материалов элементов пути аналогичны типовой конструкции. Свойства с подрельсовыми устройствами с регулируемым модулем упругости и уровнем рельсовой нити, содержащими оболочку, наполняемую воздухом, на первом этапе подобраны сопоставимо с жесткостью балластного слоя без учета нелинейных сыпучих свойств – жесткость составляет от 400 до 1500 МН/м в зависимости от толщины. Сетка элементов, сгущение в местах концентрации напряжений для модели с плавным переходом толщины оболочки показаны на рисунке 8. На рисунках 9 и 10 представлены полученные

контуры механических напряжений для участка с плавным изменением толщины пневматического подпального основания при максимальной нагрузке.

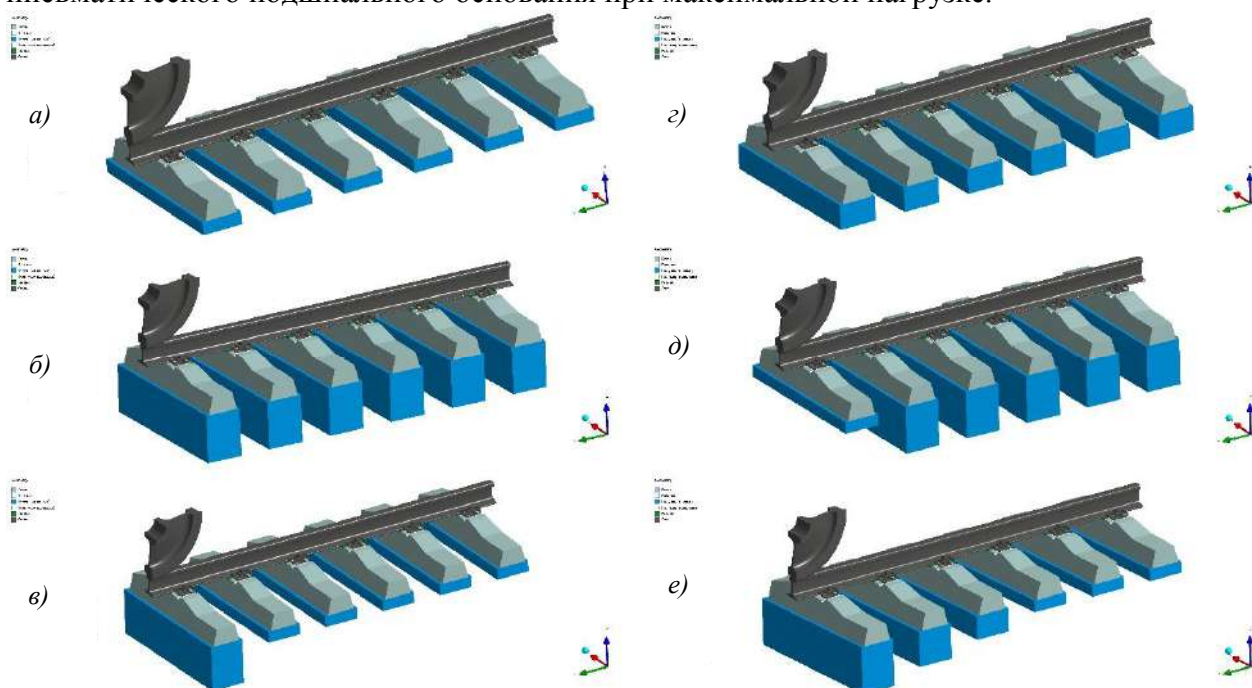


Рисунок 7 – Трехмерные геометрические модели пути с подрельсовыми устройствами с регулируемым модулем упругости и уровнем рельсовой нити с оболочкой, наполняемой воздухом

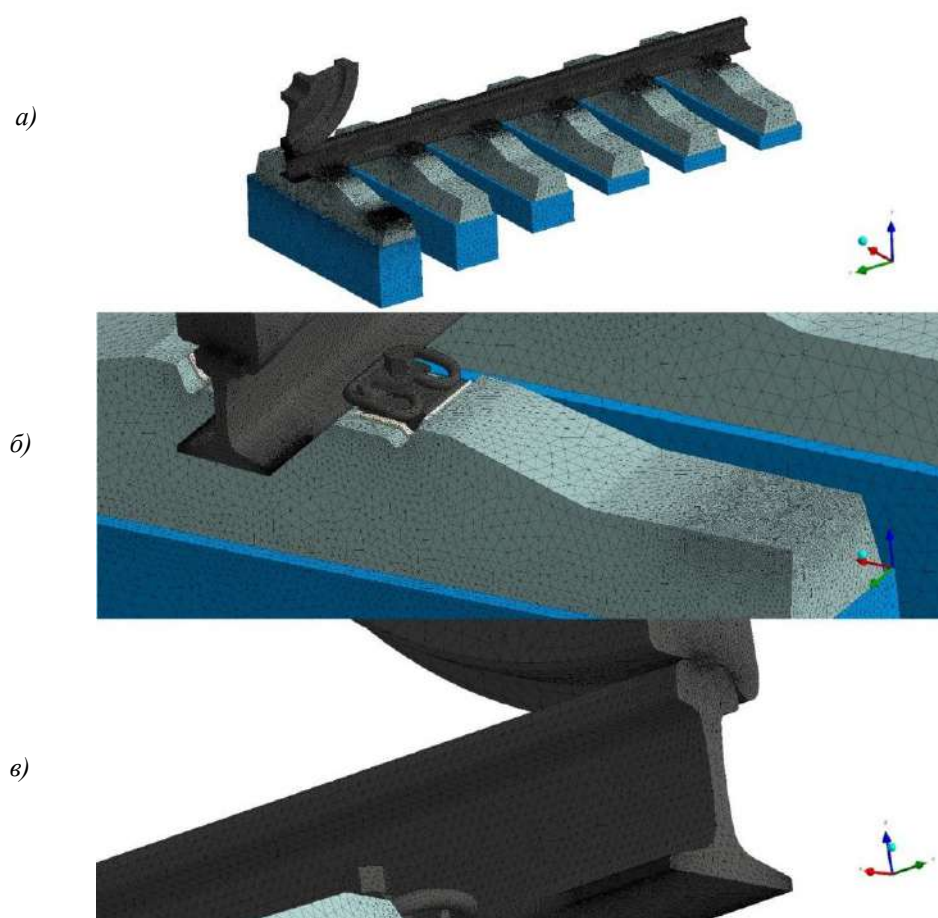


Рисунок 8 – Сетка элементов экспериментального участка пути с пневмоэлементами (а), и сгущение в областях оценки напряженно-деформированного состояния (б, в)

Путь переменной жесткости,
напряжения в наружной кромке
подошвы рельса, МПа

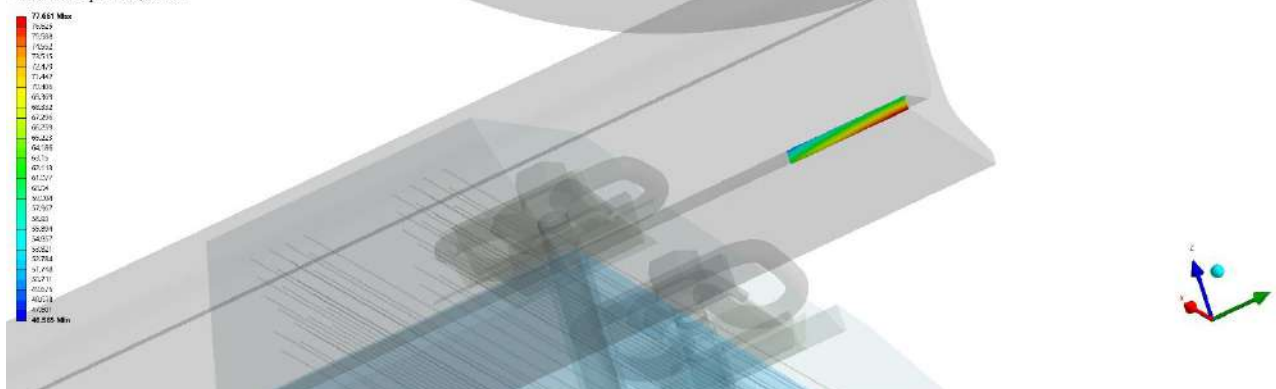


Рисунок 9 – Напряжения в наружной кромке подошвы рельса железнодорожного пути переменной жесткости

Путь переменной жесткости,
напряжения в нижней
области шпалы, МПа

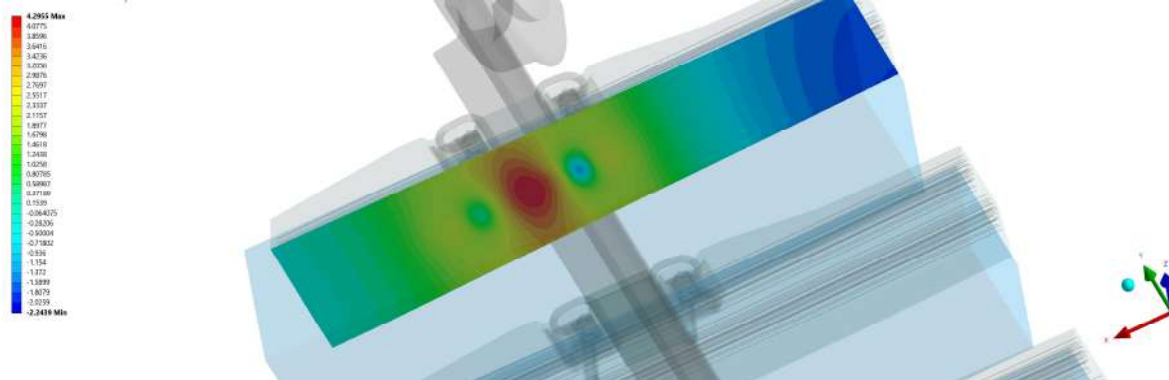


Рисунок 10 – Напряжения в нижней области шпалы железнодорожного пути переменной жесткости

Сравнение напряженного состояния элементов типовой конструкции пути и конструкции, уложенной на подрельсовые основания с вязкоупругими характеристиками, показало отсутствие резкого увеличения внутренних силовых факторов и концентрации напряжений в характерных сечениях пути. Изменение общей жесткости в вертикальной плоскости не привело к изменению изгибающих напряжений в кромках рельсов при условии достаточной жесткости пневматических устройств (не менее жесткости балластного слоя типовой конструкции пути).

Сжимающие напряжения на шпале в подрельсовой зоне увеличиваются при малой толщине оболочки устройства вследствие перераспределения усилий на меньшее количество подрельсовых опор при изменении общей жесткости конструкции. Максимальный рост напряжений до 8 % наблюдается при резком перепаде толщин оболочек.

При малой толщине оболочки изгибные напряжения в верхней области шпалы в подрельсовой зоне уменьшаются до 35 %, а в нижней области – на 15 %. В свою очередь увеличение толщины оболочек до 40 см приводит к росту механических напряжений до 20 %, что не является предельно допустимым значением с большим запасом.

Список литературы

1. Расчеты и проектирование железнодорожного пути / В. В. Виноградов, А. М. Никонов, Т. Г. Яковлева [и др.]; под ред. В. В. Виноградова и А. М. Никонова. – Москва : Маршрут, 2003. – 486 с. – Текст : непосредственный. – EDN QNQWZR.

2. Вериго, М. Ф. Имитационное моделирование сил взаимодействия экипажа и пути / М. Ф. Вериго, Г. И. Петров, В. В. Хусидов. – Текст: непосредственный // Бюллетень ОСЖД. – Варшава, 1995. – № 6/93(212). – С. 3–8.
3. Сычева, А. В. Управление жесткостью пути на переходных участках / А. В. Сычева, А. А. Локтев, В. П. Сычев. – Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 2. – С. 16–20. – EDN BDXXXI.
4. Овчинников, Д. В. 3D-моделирование напряженно-деформированного состояния элементов пути / Д. В. Овчинников. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 3. – С. 50–53. – EDN YIKCZQ.
5. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при различных условиях эксплуатации на основе моделирования методом конечных элементов / А. Ю. Абдурашитов, Д. В. Овчинников, В. П. Сычев, А. В. Сычева. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 62–73. – EDN BIARZU.
6. Sychev, V. P., Ovchinnikov, D. V., Abdurashitov, A. Y., Pokatsky, V. A., & Sycheva, A. V. (2023, May). Rails life cycle evaluation depending on the operating conditions. In *International scientific conference "International transport scientific innovation": ITSI-2021* (Vol. 2476, No. 1, p. 020010). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0104545>.
7. Патент № 2750544 Российская Федерация, МПК E01B 23/00(2006.01). Способ оперативного развертывания железнодорожного пути и устройство подрельсового основания: № 2020132129: заявлено 29.09.2020 : опубликовано 29.06.2021, бюл. №19 / Сычева А. В.; патентообладатель ООО «Вагонпутьмаш». – Текст : непосредственный.
8. Кристенсен, Р. Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен. – Москва : Мир, 1974. – 228 с. – Текст : непосредственный.
9. Сычева, А. В. Энергетический подход к решению задачи взаимодействия колеса и рельса для железнодорожного пути оперативного развертывания / А. В. Сычева, А. А. Локтев, В. П. Сычев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 96–105. – EDN RVPXUW.

References

1. Vinogradov V.V. and Nikonov A.M. ed. *Raschety i proektirovanie zheleznodorozhnogo puti* [Calculations and design of a railway track]. Moscow : Marshrut Publ., 2003, 486 p. EDN QNQWZR. (In Russian).
2. Verigo M.F., Petrov G.I., Khusidov V.V. Simulation of the forces of interaction between the crew and the path. *Biulleten' OSZhD – OSZhD Bulletin*, 1995, no. 6/93(212), pp. 3-8. (In Russian).
3. Sycheva A., Loktev A., Sychev V. Railway track stiffness control on transitional sections. *Put' i putevoe khoziaistvo – Railway Track and Facilities*, 2021, no. 2, pp. 16-20. EDN BDXXXI. (In Russian).
4. Ovchinnikov D.V. 3D-modeling of the stress-strain state of track elements. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2023, no. 3, pp. 50-53. EDN YIKCZQ. (In Russian).
5. Abdurashitov A.Yu., Ovchinnikov D.V., Sychev V.P., Sycheva A.V. Estimation of the stress-strain state of rails under various operating conditions based on finite element modeling. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1(53), pp. 62-73. EDN BIARZU. (In Russian).
6. Sychev, V. P., Ovchinnikov, D. V., Abdurashitov, A. Y., Pokatsky, V. A., & Sycheva, A. V. (2023, May). Rails life cycle evaluation depending on the operating conditions. In *International scientific conference "International transport scientific innovation": ITSI-2021* (Vol. 2476, No. 1, p. 020010). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0104545>.
7. Sycheva A.V. *Patent RU 2750544*, 29.06.2021.
8. Christensen, R. *Vvedenie v teoriyu viazkouprugosti* [Introduction to the theory of viscoelasticity]. Moscow, Mir Publ., 1974, 228 p. (In Russian).

9. Sycheva A.V., Loktev A.A., Sychev V.P. Energy approach to solving the problem of interaction between a wheel and a rail for an operational deployment railway track. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4(52), pp. 96-105. EDN RVPXUW. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сычева Анна Вячеславовна

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, ГСП-4, 125190, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (925) 506-87-69.

E-mail: anna@vpm770.ru

Овчинников Дмитрий Владиславович

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС).

Свободы ул., д. 2 в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Управления научных работ, ПривГУПС.

Тел.: +7 (846) 255-68-62.

E-mail: ovchinnikov@samgups.ru

Сычев Вячеслав Петрович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, ГСП-4, 125190, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортное строительство», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (985) 774-26-84.

E-mail: vp@vpm770.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сычева, А. В. Влияние вязкого элемента, включенного в систему масс упругих элементов железнодорожного пути, на его жесткость / А. В. Сычева, Д. В. Овчинников, В. П. Сычев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 41 – 48.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sycheva Anna Vyacheslavovna

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obraztsova st., Moscow, GSP-4, 125190, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport construction», RUT (MIIT).

Phone: +7 (925) 506-87-69.

E-mail: anna@vpm770.ru

Ovchinnikov Dmitriy Vladislavovich

Volga State Transport University (VSTU).

2 v, Svoboda st., Samara, 443066, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, docent, senior researcher of the Department of Scientific Works, VSTU.

Phone: +7 (846) 255-68-62.

E-mail: ovchinnikov@samgups.ru

Sychev Vyacheslav Petrovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obraztsova st., Moscow, GSP-4, 125190, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Transport construction», RUT (MIIT).

Phone: +7 (985) 774-26-84.

E-mail: vp@vpm770.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sycheva A.V., Ovchinnikov D.V., Sychev V.P. The influence of a viscous element included in the system of masses of elastic elements of a railway track on its rigidity. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 41-48. (In Russian).

УДК 625.042.3

В. А. Нейман

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация

ОХЛАЖДЕНИЕ РЕЛЬСОВ: КАК ИЗБЕЖАТЬ «ГОРЯЧЕЙ СЕРДЦЕВИНЫ» ДЛЯ ТОЧНОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Аннотация. Предметом исследования является проблема возникновения «горячей сердцевины» при интенсивном охлаждении железнодорожных рельсов, что является критически важным при подготовке рельсов к закреплению в летний период. В работе выполнено научное обоснование предложенных методов минимизации

явления «горячей сердцевины» и методы минимизации данного явления для обеспечения равномерного температурного поля по сечению рельса. Методология исследования включает в себя анализ влияния ограниченной теплопроводности стали на формирование температурного градиента и его негативное воздействие на геометрию рельса, внутренние напряжения и точность закрепления. В ходе работы предложены и обоснованы методы снижения эффекта «горячей сердцевины», включающие в себя управление режимами охлаждения (каскадное и поэтапное снижение интенсивности), расширение зон активного теплоотвода путем многостороннего охлаждения, а также применение комплексного численного моделирования. Результаты исследований показывают, что каскадное охлаждение с паузами позволяет эффективно перераспределить тепло из сердцевины к поверхности, значительно снижая температурные градиенты по сечению рельса, что подтверждается результатами численного моделирования. Поэтапное снижение интенсивности охлаждения предотвращает чрезмерные градиенты на поздних стадиях охлаждения. Комплексное численное моделирование позволяет не только прогнозировать деформации и напряжения, но и визуализировать оптимальные температурные поля, оптимизируя параметры охлаждения для достижения равномерной температуры закрепления. Предложенные методы обеспечивают стабильность и долговечность бесстыкового пути. Эффективное управление внешним теплообменом является ключевым для решения проблемы «горячей сердцевины». Внедрение предложенных стратегий позволяет минимизировать температурные градиенты, снизить риск внутренних дефектов и повысить точность закрепления рельсов, что напрямую влияет на их эксплуатационную прочность и безопасность.

Ключевые слова: охлаждение рельсов, вынужденная конвекция, горячая сердцевина, температурный градиент, теплопроводность стали.

Vyacheslav A. Neyman

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

COOLING OF RAILS: HOW TO AVOID A "HOT CORE" FOR PRECISE FIXATION IN THE SUMMER

Abstract. The subject of the research is the problem of "hot core" occurrence during intensive cooling of railway rails, which is critically important when preparing rails for fastening in the summer period. The aim of the work is to scientifically substantiate and propose methods for minimizing this phenomenon to ensure a uniform temperature field across the rail section. The research methodology includes an analysis of the influence of the limited thermal conductivity of steel on the formation of a temperature gradient and its negative impact on rail geometry, internal stresses, and fastening accuracy. The work proposes and substantiates methods for reducing the "hot core" effect, including cooling mode management (cascaded and phased intensity reduction), expanding active heat dissipation zones through multi-sided cooling, and applying comprehensive numerical modeling. The research results show that cascaded cooling with pauses effectively redistributes heat from the core to the surface, significantly reducing temperature gradients across the rail section, which is confirmed by numerical simulation results. Phased cooling intensity reduction prevents excessive gradients in later stages. Comprehensive numerical modeling allows not only to predict deformations and stresses but also to visualize optimal temperature fields, optimizing cooling parameters to achieve a uniform fastening temperature. The proposed methods ensure the stability and durability of continuous welded tracks. Effective external heat exchange management is key to solving the "hot core" problem. The implementation of the proposed strategies minimizes temperature gradients, reduces the risk of internal defects, and improves the accuracy of rail fastening, which directly affects their operational strength and safety.

Keywords: cooling of rails, forced convection, hot core, temperature gradient, thermal conductivity of steel.

В условиях строительства и ремонта железнодорожного пути ввод рельсов в температуру закрепления является критически важной операцией для обеспечения стабильности и долговечности бесстыкового пути [2, 4]. Согласно нормативным документам, таким как ТУ-2000 [2], температура закрепления плетей бесстыкового пути устанавливается в зависимости от климатических условий региона, обычно находясь в диапазоне от +25 до +35°C. Это требование обусловлено необходимостью минимизации температурных напряжений в рельсах при эксплуатации. Однако при использовании высокоинтенсивных методов охлаждения для ввода их в температуру закрепления, таких как вынужденная конвекция, возникает проблема «горячей сердцевины» – значительного перепада температур между поверхностью рельса и его центральной частью. Этот температурный градиент не только препятствует достижению равномерной температуры по всему сечению, необходимой для точного закрепления [1, 2], но и может приводить к возникновению внутренних напряжений и структурных дефектов. В

данной статье рассмотрены причины возникновения «горячей сердцевины» и предложены научно обоснованные подходы к ее минимизации, обеспечивающие стабильность температуры для успешного закрепления рельсовых плетей.

Научная новизна данной работы заключается в разработке и систематизации комплексных методов управления режимами внешнего теплообмена, которые позволяют эффективно нивелировать проблему «горячей сердцевины» при интенсивном охлаждении железнодорожных рельсов без изменения внутренних свойств стали. Впервые обоснована эффективность применения каскадного (импульсного) охлаждения с теоретическим объяснением процессов перераспределения тепла в паузах, а также предложена концепция поэтапного снижения интенсивности охлаждения с учетом изменяющегося температурного напора. Предложенные модели и схемы многостороннего охлаждения с оптимизированной конструкцией форсуночных систем представляют собой новый подход к равномерному теплоотводу, минимизируя путь теплопередачи. Кроме того, доказана критическая роль комплексного численного моделирования как ключевого инструмента для прогнозирования деформаций и напряжений, что позволяет оптимизировать параметры охлаждения и повысить точность закрепления рельсов.

Для ввода рельсовых плетей в заданную температуру закрепления, особенно в жаркий период, когда температура рельсов значительно превышает требуемую, применяются методы принудительного охлаждения. Одним из распространенных способов является использование устройств, создающих направленный поток холодного воздуха или мелкодисперсной водяной взвеси (тумана) на поверхность рельса. Например, могут использоваться специальные установки с форсунками или соплами, которые обдувают или орошают рельс, находящийся на пути, до достижения необходимой температуры, которые описаны в патентах SU1668518A1 и SU1615270A1 [10, 11].

Суть проблемы «горячей сердцевины» при таком интенсивном охлаждении заключается в конечной теплопроводности стали. Тепло от центра рельса к его поверхности передается с определенной скоростью. Если скорость отвода тепла от поверхности (за счет интенсивного внешнего охлаждения) значительно превышает скорость передачи тепла изнутри, то на поверхности образуется относительно холодный слой, в то время как сердцевина остается значительно горячей. Это явление особенно актуально для рельсов с большим поперечным сечением [1, 6], таких как Р65, где время для теплопередачи от центра к поверхности становится более продолжительным.

В результате температурный градиент может достигать критических значений, препятствуя достижению равномерной температуры закрепления и потенциально вызывая следующие явления:

искажение геометрии рельса: неравномерное охлаждение приводит к разной термической усадке различных частей рельса, что может вызвать его искривление и усложнить процесс точного закрепления [5];

возникновение остаточных напряжений: большие температурные градиенты создают внутренние напряжения, которые могут снизить усталостную прочность рельса и его сопротивление разрушению [5, 7]. Возникающие температурные градиенты приводят к неравномерной термической усадке различных слоев материала. Более охлажденные поверхностные слои сокращаются, в то время как более горячая сердцевина оказывает сопротивление этому сжатию, что приводит к возникновению опасных внутренних термических напряжений. Эти напряжения могут превышать предел текучести материала, вызывая пластические деформации и, как следствие, остаточные напряжения и искажения геометрии рельса;

неточность закрепления: цель охлаждения до температуры закрепления (например, +30 °С) – ввести рельс в состояние, при котором он будет испытывать минимальные термические напряжения в течение года [4]. Горячая сердцевина означает, что фактическая средняя температура рельса выше целевой, и при закреплении существует риск того, что рельс

будет неверно «натянут» или «сжат», что приведет к нежелательным напряжениям в эксплуатации и потенциальному короблению пути в жаркий период [4, 7].

Поскольку изменить теплопроводность самой стали Р65 невозможно, решение проблемы лежит в управлении динамикой процесса охлаждения и оптимизации геометрии теплоотвода, чтобы обеспечить максимально равномерное распределение температуры по всему сечению рельса к моменту закрепления.

Решение проблемы «горячей сердцевины» при интенсивном охлаждении рельсов требует комплексного подхода, направленного на достижение баланса между скоростью охлаждения и равномерностью температурного поля, что особенно важно для точного ввода в температуру закрепления в теплое время года.

1. Управление скоростью и режимом охлаждения.

Каскадное (прерывистое) охлаждение.

Принцип этого метода заключается в чередовании коротких, интенсивных фаз охлаждения с паузами. Во время импульса быстро охлаждается поверхность. В период выдержки, когда прекращается активное охлаждение, тепло от сердцевины рельса эффективно передается к его поверхности благодаря внутренней теплопроводности материала [8]. После этого цикл повторяется. Такой подход позволяет поддерживать высокую общую скорость охлаждения, при этом минимизируя температурный градиент и обеспечивая более равномерное распределение температуры по сечению рельса, что критически важно для его последующего закрепления. Для эффективной реализации каскадного (прерывистого) охлаждения требуется прецизионная система управления подачей охлаждающего агента (воздуха, воды).

Поэтапное снижение интенсивности охлаждения.

Этот подход предполагает начало охлаждения с высокой интенсивности, особенно когда рельс имеет высокую температуру. По мере снижения температуры рельса и уменьшения температурного напора (разницы между температурой рельса и охлаждающей среды) интенсивность охлаждения постепенно снижается [9]. Это можно реализовать путем регулирования расхода охлаждающей среды (воздуха, воды) или изменением параметров распыления. Такая стратегия предотвращает чрезмерные температурные градиенты на поздних стадиях охлаждения, когда температура рельса приближается к целевой, и скорость теплопередачи внутри материала становится доминирующим фактором.

Оптимизация температуры охлаждающей среды $T_{\text{вт}}$.

Температура охлаждающей среды играет ключевую роль. Слишком низкая температура может создавать чрезмерно резкий температурный перепад на начальных этапах процесса охлаждения. Оптимизация температуры охлаждающей среды может быть частью поэтапной стратегии, где на разных этапах охлаждения используются различные температуры хладагента для более плавного и равномерного снижения температуры до целевых значений.

2. Расширение зоны охлаждения.

Если тепло отводится только с одной поверхности рельса [10], а остальные остаются горячими, это существенно замедляет выход тепла из объема. Расширение площади активного теплообмена является одним из наиболее эффективных способов борьбы с «горячей сердцевиной».

Многостороннее охлаждение.

Активное охлаждение нескольких поверхностей рельса (боковые поверхности головки, шейки, подошвы) одновременно значительно уменьшает путь теплопередачи от центра к охлаждаемым поверхностям. Это позволяет теплу быстрее покидать объем рельса, снижая внутренний температурный градиент [5]. Для реализации этого подхода требуется специально разработанная конструкция корпуса охлаждающей установки, которая эффективно направляет потоки холодного воздуха или водяного тумана на все необходимые поверхности.

Конструкция корпуса и форсуночных систем.

Разработка оптимальной геометрии корпуса и расположения форсунок, обеспечивающих равномерное и интенсивное охлаждение по всему периметру рельса, является первостепенной

задачей. Это включает в себя выбор не только типа форсунок (например, вихревые трубы, распылители), но и их плотности, угла наклона и давления подачи охлаждающей среды [9].

3. Комплексное численное моделирование и оптимизация.

Наиболее эффективным инструментом для разработки и оптимизации режимов охлаждения является комплексное численное моделирование. Современные программные комплексы (например, SolidWorks Simulation, ANSYS) позволяют осуществлять следующее [5, 9]:

моделировать различные конфигурации охлаждения, анализировать влияние различных конструкций корпуса, количества и расположения форсунок на температурное поле рельса;

изучать временные режимы охлаждения, моделировать каскадные режимы или режимы с изменяющейся интенсивностью охлаждения для определения оптимальных параметров, обеспечивающих достижение равномерной температуры закрепления;

анализировать температурные градиенты: визуализация и количественная оценка температурных градиентов по сечению рельса позволяет выявить «проблемные» зоны, где тепло не успевает отводиться и где могут возникать внутренние напряжения, препятствующие точному закреплению;

прогнозировать деформации и напряжения: численное моделирование позволяет оценить остаточные напряжения и деформации, возникающие в рельсе после охлаждения, что критически важно для оценки его эксплуатационных характеристик и точности закрепления.

Математическое моделирование процесса теплообмена и управление режимами охлаждения. Процесс нестационарного теплообмена в рельсе, который является трехмерным объектом, описывается дифференциальным уравнением теплопроводности [12]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

где T – температура, К; τ – время, с; α – коэффициент температуропроводности материала, м²/с,

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); ρ – плотность материала, кг/м³.

Граничные условия для конвективного теплообмена на поверхности рельса описываются уравнением Ньютона – Рихмана [12]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_S = \alpha (T_S - T_f), \quad (3)$$

где $\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_S$ – производная температуры по нормали к поверхности рельса S ; T_S – температура

поверхности рельса, К; T_f – температура охлаждающей среды, К.

Для численного решения задачи поперечное сечение рельса дискретизируется на сетку с узлами (i, j) , где i – индекс по оси x , j – индекс по оси y . Шаги дискретизации по осям обозначаются Δx и Δy соответственно. В данной модели для упрощения предполагается, что $\Delta x = \Delta y = h$.

1. Уравнение для определения внутреннего узла $(0 < i < N_x; 0 < j < N_y)$.

Температура внутреннего узла $T_{i,j}$ в следующий момент времени $k + 1$ (после $\Delta \tau$) определяется исходя из температур соседних узлов в текущий момент времени k :

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \alpha \Delta \tau \left(\frac{T_{i+1,j}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i-1,j}^k}{h^2} + \frac{T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k}{h^2} \right), \quad (4)$$

где $T_{i,j}^k$ – температура в узле (i, j) в момент времени k ; $T_{i,j}^{k+1}$ – температура в узле (i, j) в момент времени $k+1$; $\Delta \tau$ – временной шаг; h – пространственный шаг, $h = \Delta x = \Delta y$.

2. Уравнение для определения узлов с поверхностным конвективным теплообменом.

Для узлов, расположенных на границе расчетной области и взаимодействующих с охлаждающей средой, граничные условия учитываются с помощью фиктивных узлов или энергетического баланса. Рассмотрим случай узла на верхней поверхности (например, $j = N_y, 0 < i < N_x$).

Пусть T_{i,N_y+1}^k – температура фиктивного узла, расположенного за пределами тела рельса. Условие теплообмена на поверхности через уравнение Ньютона – Рихмана аппроксимируется так:

$$-\lambda \frac{T_{i,N_y+1}^k - T_{i,N_y-1}^k}{2\Delta y} = \alpha (T_{i,N_y}^k - T_f^k). \quad (5)$$

Отсюда выражаем фиктивный узел:

$$T_{i,N_y+1}^k = T_{i,N_y-1}^k - \frac{2\alpha\Delta y}{\lambda} (T_{i,N_y}^k - T_f^k). \quad (6)$$

Общая формула для определения внутреннего узла явной конечно-разностной схемы для двумерного уравнения теплопроводности имеет вид:

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \frac{\alpha\Delta\tau}{h^2} (T_{i+1,j}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i-1,j}^k + T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k). \quad (7)$$

Подставляя выражение для фиктивного узла в эту общую формулу для поверхностного узла (для верхней поверхности, где $j = N_y$), и заменяя T_{i,N_y+1}^k модифицированным членом в аппроксимации второй производной по y , модифицируем уравнение для определения поверхностного узла:

$$T_{i,N_y}^{k+1} = T_{i,N_y}^k + \frac{\alpha\Delta\tau}{h^2} \left((T_{i+1,N_y}^k - 2T_{i,N_y}^k + T_{i-1,N_y}^k) + \left(2T_{i,N_y-1}^k - 2T_{i,N_y}^k + T_{i,N_y+1}^k - 2\frac{ah}{\lambda} (T_{i,N_y}^k - T_f^k) \right) \right). \quad (8)$$

Аналогичные выражения выводятся для узлов на нижней, левой и правой поверхностях.

3. Уравнения для определения угловых узлов.

Угловые узлы (например, верхний правый T_{N_x}, T_{N_y}) находятся на пересечении двух поверхностей, подверженных конвективному теплообмену. Правый верхний узел (T_{N_x}, T_{N_y}) обменивается теплом через правую ($x = N_x$) и верхнюю ($y = N_y$) границы.

Используем фиктивный узел $T_{N_x+1,j}^k$ (за пределами рельса справа) и T_{N_x,N_y+1}^k (за пределами рельса сверху).

Граничные условия Ньютона – Рихмана для каждой стороны:

$$-\lambda \frac{T_{N_x+1,N_y}^k - T_{N_x-1,N_y}^k}{2\Delta x} = \alpha_{\text{правая}} (T_{N_x,N_y}^k - T_{f,\text{правая}}^k); \quad (9)$$

$$-\lambda \frac{T_{N_x, N_y+1}^k - T_{N_x, N_y-1}^k}{2\Delta y} = \alpha_{\text{верхняя}} (T_{N_x, N_y}^k - T_{f, \text{верхняя}}^k). \quad (10)$$

Отсюда выражаем фиктивные узлы T_{N_x+1, N_y}^k и T_{N_x, N_y+1}^k :

$$T_{N_x+1, N_y}^k = T_{N_x-1, N_y}^k - \frac{2\alpha_{\text{правая}}\Delta x}{\lambda} (T_{N_x, N_y}^k - T_{f, \text{правая}}^k); \quad (11)$$

$$T_{N_x, N_y+1}^k = T_{N_x, N_y-1}^k - \frac{2\alpha_{\text{верхняя}}\Delta y}{\lambda} (T_{N_x, N_y}^k - T_{f, \text{верхняя}}^k). \quad (12)$$

Подставляя выражения для фиктивных узлов (11) и (12) в общее явное уравнение теплопроводности для узла T_{N_x, N_y} , получим:

$$T_{i, N_y}^{k+1} = T_{i, N_y}^k + \frac{2\alpha\Delta\tau}{h^2} \left[\begin{aligned} &2(T_{N_x-1, N_y}^k + T_{N_x, N_y-1}^k) - 4T_{N_x, N_y}^k - \frac{4\alpha_{\text{правая}}\Delta x}{\lambda} (T_{N_x, N_y}^k - T_{f, \text{правая}}^k) - \\ &-\frac{2\alpha_{\text{верхняя}}\Delta y}{\lambda} (T_{N_x, N_y}^k - T_{f, \text{верхняя}}^k) \end{aligned} \right]. \quad (13)$$

Уравнение (13) описывает изменение температуры углового узла T_{N_x, N_y} во времени, учитывая внутреннюю теплопроводность и конвективный теплообмен с двух граничных поверхностей.

Аналогичные уравнения выводятся для других угловых узлов (верхнего левого, нижнего левого, нижнего правого) с соответствующими изменениями индексов и коэффициентов теплоотдачи/температур охлаждающей среды.

4. Отражение режимов охлаждения.

В рамках данной математической модели управление режимами охлаждения осуществляется через изменение параметров граничных условий, а именно коэффициента теплоотдачи (α) и температуры охлаждающей среды (T_f).

Во время активной фазы охлаждения (например, обдув холодным воздухом или распыление водяной взвеси) для соответствующих поверхностных и угловых узлов применяются следующие параметры:

$\alpha = \alpha_{\text{охл}}$ – высокий коэффициент теплоотдачи, соответствующий вынужденной конвекции;

$T_f = T_{f, \text{охл}}$ – температура хладагента, например, холодного воздуха или воды, во время фазы выдержки (пауза или снижение интенсивности):

$\alpha = \alpha_{\text{выд}}$ – пониженный коэффициент теплоотдачи, соответствующий естественной конвекции или даже нулю при полном прекращении активного охлаждения;

$T_f = T_{f, \text{окр}}$ – температура окружающей среды, например, воздуха;

Моделирование каскадного (прерывистого) охлаждения включает в себя чередование временных интервалов, в течение которых используются параметры фаз охлаждения и выдержки. Поэтапное снижение интенсивности охлаждения реализуется через плавное или ступенчатое уменьшение значения α и (или) изменение T_f по мере того, как температура рельса приближается к целевой.

Результаты численного моделирования. График интенсивного многостороннего охлаждения (рисунок 1) демонстрирует линейное снижение температуры как для поверхности катания, так и для середины головки рельса. Наблюдается постоянный и значительный перепад

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

температур между сердцевинной (серединой головки) и поверхностью рельса на протяжении всего процесса охлаждения, что указывает на эффект «горячей сердцевины». Линии для сердцевины и поверхности с одинаковой начальной температурой (например, 45, 50, 55 °C) идут практически параллельно, сохраняя температурный градиент. Красные пунктирные линии обозначают целевой диапазон температуры закрепления (25 – 35 °C).

Несмотря на интенсивность охлаждения, данный метод не обеспечивает равномерного температурного поля по сечению рельса. Температура сердцевины остается существенно выше, чем на поверхности, когда последняя достигает целевых значений. При интенсивном охлаждении максимальный температурный градиент по сечению рельса может достигать значительных величин, например, до 10 °C/см на начальных этапах охлаждения. Это создает внутренние напряжения и может привести к неточному закреплению рельса.

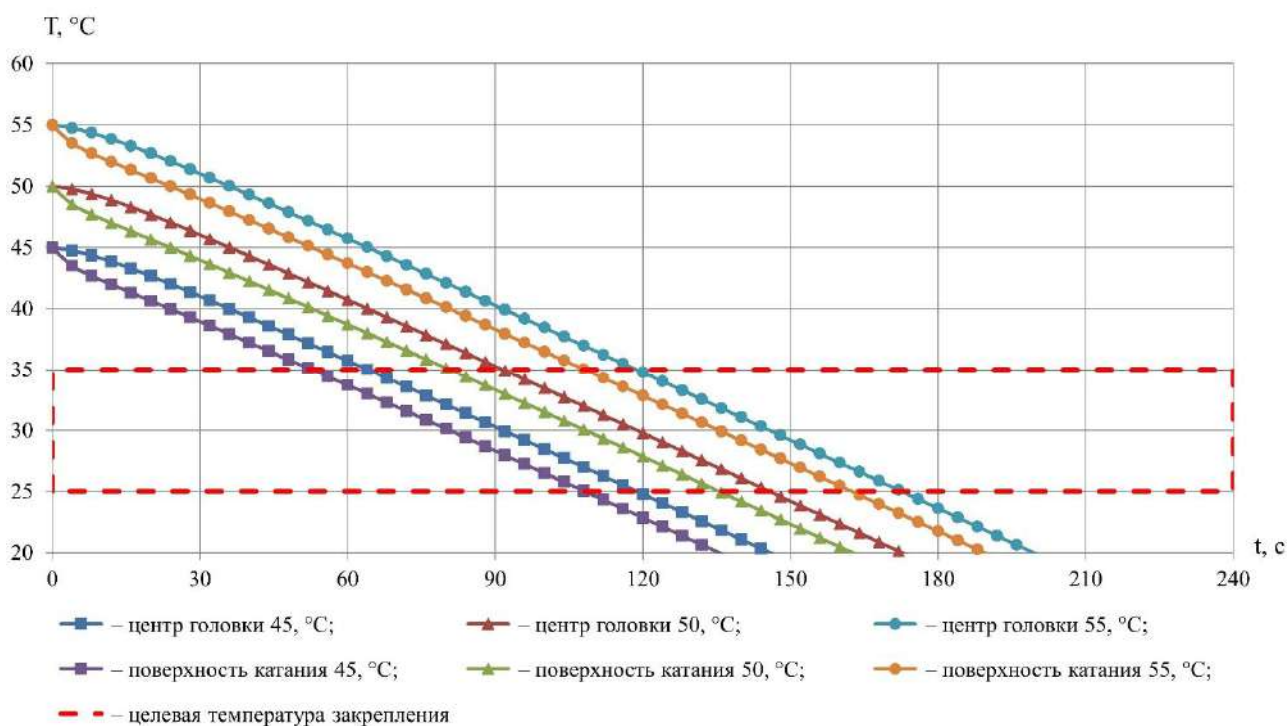


Рисунок 1 – Интенсивное многостороннее охлаждение

График каскадного охлаждения (рисунок 2) также показывает общее снижение температуры, но с характерными волнообразными или осциллирующими колебаниями для обеих кривых (середины головки и поверхности катания). Эти колебания являются результатом чередования фаз активного охлаждения и пауз (каскадный режим). Во время пауз (когда температура поверхности временно повышается или стабилизируется) наблюдается уменьшение разницы температур между серединой головки и поверхностью. Кривые для сердцевины и поверхности сближаются по мере достижения целевой температуры, в том числе и за пределами нижней границы целевой температуры в 25 °C, что указывает на эффективное перераспределение тепла и снижение температурного градиента даже при достижении более низких температур. В данном случае расчет производился по принципу 5 – 10 с (5 с охлаждения и 10 с выдержки).

Каскадный режим охлаждения значительно эффективнее снижает температурные градиенты. Паузы позволяют теплу перераспределяться из более горячей сердцевины к поверхности, способствуя более равномерному температурному полю. В отличие от интенсивного охлаждения применение каскадного режима позволяет снизить максимальный температурный градиент до 2,5 °C/см (или уменьшить его на Z % в сравнении с интенсивным методом), что демонстрирует его высокую эффективность в достижении температурной

однородности. Это минимизирует эффект «горячей сердцевины» и обеспечивает достижение более однородной температуры по всему сечению рельса к моменту закрепления, но значительно увеличивает время охлаждения.

Численное моделирование, проведенное с использованием программного обеспечения SolidWorks Simulation (для иллюстрации результатов которого представлена тепловая карта на рисунке 3), позволяет оценить влияние температурных градиентов на возникновение внутренних напряжений и деформаций в материале рельса.

Большая часть сечения рельса на представленной эпюре (см. рисунок 3) характеризуется низкими значениями градиента (синий цвет, около 0,002 C/см), что свидетельствует о достижении высокой степени температурной однородности к концу процесса выдержки при каскадном охлаждении. Это является ключевым фактором для снижения остаточных напряжений и минимизации деформаций рельса, что критически важно для точности его закрепления и обеспечения долговечности железнодорожного пути.

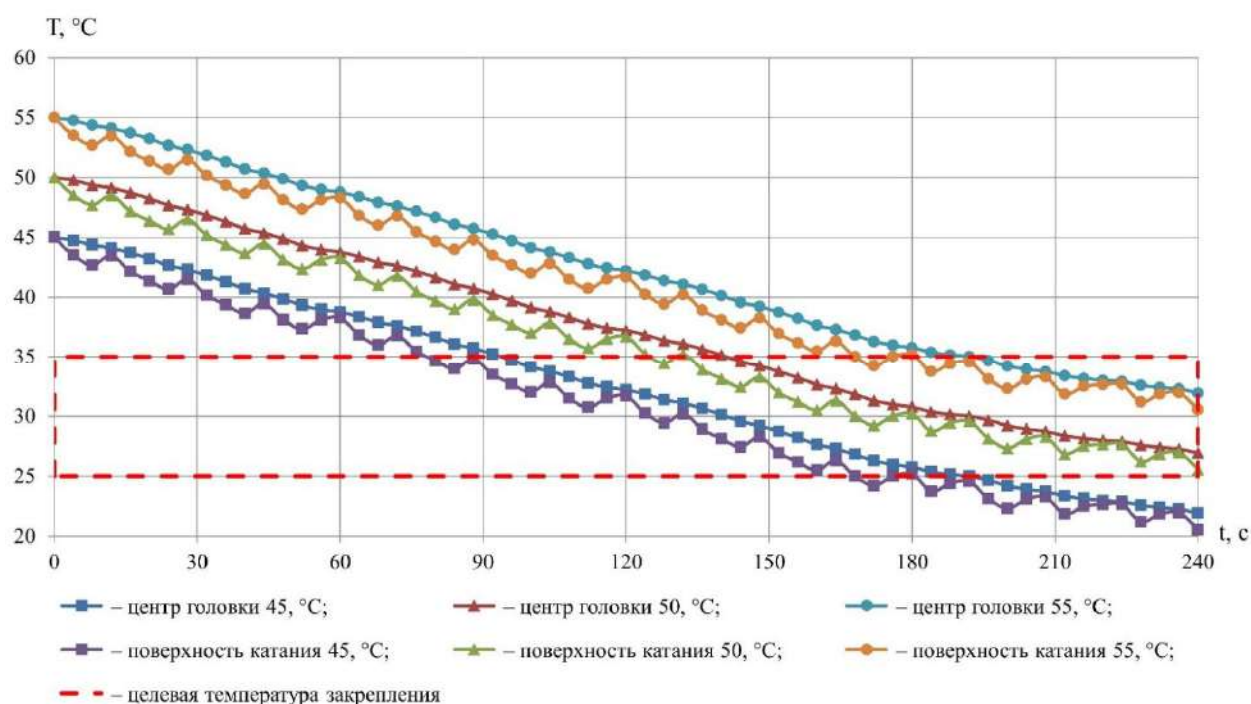


Рисунок 2 – Каскадное многостороннее охлаждение

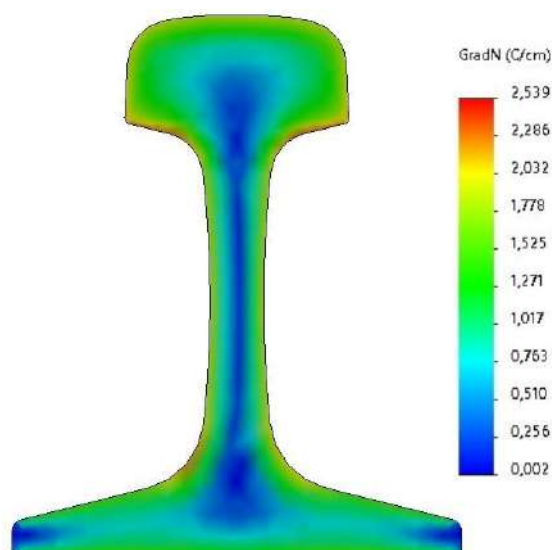


Рисунок 3 – Градиент температуры каскадного многостороннего охлаждения

Для обеспечения стабильности и долговечности бесстыкового пути критически важно минимизировать внутренние термические напряжения в рельсах, особенно при их закреплении в летний период.

Проблема «горячей сердцевины», обусловленная фундаментальным ограничением теплопроводности стали, приводит к значительному температурному градиенту, вызывая искажение геометрии рельса, возникновение остаточных напряжений и неточность закрепления, что в конечном итоге снижает усталостную прочность и сопротивление разрушению. Однако, как показано в исследовании, данная проблема успешно решается не путем изменения внутренних свойств материала, а за счет грамотного управления режимами внешнего теплообмена.

Предложенные методы управления режимами внешнего теплообмена, включающие в себя каскадное (прерывистое) охлаждение с паузами и поэтапное снижение интенсивности, позволяют эффективно перераспределять тепло из сердцевины к поверхности, значительно снижая температурные градиенты по сечению рельса.

Расширение зон активного теплоотвода путем многостороннего охлаждения и оптимизация конструкции форсуночных систем значительно уменьшают путь теплопередачи, способствуя более равномерному распределению температуры.

Комплексное численное моделирование с использованием программных комплексов, таких как SolidWorks Simulation и ANSYS, является ключевым инструментом для прогнозирования деформаций и напряжений, позволяя оптимизировать параметры охлаждения и повысить точность закрепления рельсов.

Список литературы

1. ГОСТ 51685–2000. Рельсы железнодорожные. – Москва : Стандартинформ, 2000. – 23 с. – Текст : непосредственный.
2. ТУ–2000. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути (с дополнениями и изменениями) // docs.cntd.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200069932/titles/7EA0KE> (дата обращения: 17.05.2025).
3. Рекомендации по конструкции, укладке и содержанию бесстыкового пути. Р 778 / Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). – II изд.. – Варшава : Комитет ОСЖД, 2020.
4. FRA Guidance on Continuous Welded Rail (CWR) Plan Requirement Background and Example Generic Plan // railroads.dot.gov : сайт. – Текст : электронный – URL: https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2021-08/FRA%20CWR%20Generic%20Plan%20-%20Effective_July%202021%5B67%5D.pdf (дата обращения: 17.05.2025).
5. Ильиных, А. С. Технологические особенности процесса шлифования рельсов в пути и их влияние на эксплуатационную стойкость рельсов / А. С. Ильиных, Л. Б. Тихомирова, С. И. Тепляков. – Текст : непосредственный // Вестник СГУПС. – 2005. – № 11. – С. 63–69.
6. Зяблицева, Е. О. Расчет температурных полей при прокатке рельсов / Е. О. Зяблицева, Р. А. Литвинов, В. А. Шилов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2011. – № 5. – С. 51–53. – EDN QCFGXH.
7. Температурная работа рельсов. Факторы, влияющие на температуру рельсов // rail.uzdk.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://rail.uzdk.ru/kak-ustroen-i-rabotaet-besstykovoj-put/temperaturnaya-rabota-relsov-factory-vliyajushhie-na-temperaturu-relsov> (дата обращения: 17.05.2025).
8. Патент WO2012064223A1 Всемирная организация интеллектуальной собственности, МПК C21D 9/02 (2006.01). Способ и устройство термической обработки рельсов : № WO2012064223A1 : заявлено 10.11.2011 : опубликовано 18.05.2012 / Космачев В. А., Мельник В. А., Мельник А. В., Тихонов В. М., Денисов Ю. Ф. – Текст : электронный.

9. Нейман, В. А. Моделирование процесса охлаждения рельсовой плети при естественных условиях / В. А. Нейман, Д. С. Воронцов. – Текст : непосредственный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2024. – № 5. – С. 108–117. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-5-108-117. – EDN VXKGAI.

10. Патент SU1668518A1 СССР, МПК C21D 9/02 (1985.01). Способ охлаждения рельсовой плети : № 4038167/22 : заявлено 07.12.1985 : опубликовано 07.08.1991 / Воронцов Д. С., Зайцев С. В., Иванов А. С. – Текст : электронный.

11. Патент SU1615270A1 СССР, МПК B23K 11/00 (1985.01). Устройство для термообработки рельсовых плетей : № 4015671/22 : заявлено 20.08.1985 : опубликовано 23.12.1990 / Петров И. В., Сидоров А. П. – Текст : электронный.

12. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Москва : МЭИ, 2011. – 416 с. – Текст : непосредственный.

References

1. National Standard 51685-2000. Railway rails. Moscow, Standardinform Publ., 2000, 23 p. (In Russian).

2. TU-2000. *Tekhnicheskie ukazaniya po ustroystvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besстыkovogo puti (s dopolnениями i Izmenenиями)* [Technical guidelines for the construction, laying, maintenance and repair of jointless track (with additions and amendments)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200069932/titles/7EA0KE> (accessed 17.05.2025). (In Russian).

3. *Organizatsiya sotrudnichestva zheleznыkh dorog. R 778* [Organization for Cooperation of Railways. P 778]. Available at: <https://osjd.org/api/media/resources/1685379?action=download> (accessed 17.05.2025). (In Russian).

4. FRA Guidance on Continuous Welded Rail (CWR) Plan Requirement Background and Example Generic Plan. Available at: https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2021-08/FRA%20CWR%20Generic%20Plan%20-%20Effective_July%202021%5B67%5D.pdf (accessed 17.05.2025).

5. Il'inykh A.S., Tikhomirova L.B., Teplyakov S.I. Technological features of the rail grinding process in track and their influence on the operational durability of rails. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – The Siberian Transport University Bulletin*, 2005, no. 11, pp. 63-69. (In Russian).

6. Zyablitseva E.O., Litvinov R.A., Shilov V.A. Modeling of temperature fields during rail rolling. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaia metallurgiiа – Izvestiya. Ferrous metallurgy*, 2011, no. 5, pp. 51-53. EDN QCFGXH. (In Russian).

7. *Temperaturnaya rabota rel'sov. Fакtory, vliyayushchie na temperaturu rel'sov* [Temperature operation of rails. Factors influencing rail temperature]. Available at: <http://rail.uzdk.ru/kak-ustroeni-rabotaet-besстыkovoj-put/temperaturnaya-rabota-rel'sov-fакtory-vliyayushhie-na-temperaturu-rel'sov> (accessed 17.05.2025). (In Russian).

8. Kosmachev V.A., Mel'nik V.A., Mel'nik A.V., Tikhonov V.M., Denisov Yu.F. *Patent WO2012064223A1*, 18.05.2012.

9. Neyman V., Vorontsov D. Simulation of the cooling process of railways under natural conditions. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V. G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2024, no. 5, pp. 108-117. DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-5-108-117. EDN VXKGAI. (In Russian).

10. Vorontsov D.S., Zaitsev S.V., Ivanov A.S. *Patent USSR SU1668518A1*, 07.08.1991.

11. Petrov I.V., Sidorov A.P. *Patent USSR SU1615270A1*, 23.12.1990.

12. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teplotperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publ., 2011, 416 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Нейман Вячеслав Александрович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование», СГУПС.

Тел.: +7 (923) 188-16-44.

E-mail: Flinston154@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Neyman Vyacheslav Alexandrovich

Siberian Transport University (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Postgraduate student at the Department of Lifting, Transport, Track, Construction and Road Machinery, STU.

Phone: 7 (923) 188-16-44.

E-mail: Flinston154@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Нейман, В. А. Охлаждение рельсов: как избежать «горячей сердцевинки» для точного закрепления в летний период / В. А. Нейман. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 48 – 59.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Neyman V.A. Cooling of rails: how to avoid a "hot core" for precise fixation in the summer. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 48-59. (In Russian).

УДК 656.073

Д. И. Кочнева, С. В. Высотский

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, Российская Федерация

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК

Аннотация. Статья посвящена разработке математической модели прогнозирования потерь времени в железнодорожных контейнерных перевозках. Потери классифицированы в контексте концепции бережливого производства: «тида» (ожидание), «тиги» (перезгрузка) и «тига» (неравномерность).

Взаимосвязь между величиной потерь времени, неравномерностью потока и загруженностью ресурсов исследована с помощью математического аппарата теории графов и теории систем массового обслуживания. Для расчета средней длины очереди и ожидаемого времени задержки контейнеров применена адаптированная формула Полячека – Хинчина. Предложенная формула позволяет прогнозировать средние потери времени, возникающие в процессе доставки контейнера и вызванные перегрузкой транспортных узлов и (или) отдельных терминалов, а также вариабельностью контейнеропотока.

Проведена верификация модели на основе реальных данных железнодорожного пункта пропуска Забайкальск, демонстрирующая адекватность прогноза. Вместе с тем повышение точности прогноза требует модификации модели за счет включения дополнительных факторов, влияющих на формирование очереди, таких как: приоритетность обслуживания отдельных потоков, недетерминированный характер скорости обслуживания и иные переменные, не учтенные в текущей версии модели.

С использованием модели установлены зависимости времени пребывания контейнера в очереди от степени загрузки узла и коэффициента вариации потоков. Проведенное исследование показало, что влияние вариативности потока на очередь существеннее при высоком уровне загрузки узла, поэтому в условиях дефицита инфраструктуры критически важно обеспечивать снижение неравномерности и неопределенности контейнеропотока.

Обоснованы рекомендации по снижению потерь времени, включая повышение пропускной способности, синхронизацию расписаний движения поездов и распределение груза по маршрутам с минимальной нагрузкой. Выводы имеют практическую значимость для участников контейнерного рынка, позволяя прогнозировать сроки доставки и выбирать маршруты с минимальным уровнем логистических рисков и потерь. Результаты могут способствовать повышению общей эффективности функционирования российских железных дорог.

Ключевые слова: контейнерные перевозки, логистическая цепь, бережливое производство, потери в транспортном процессе, системы массового обслуживания, прогнозирование, моделирование.

Daria I. Kochneva, Sergey V. Vysotsky

Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, the Russian Federation

ASSESSMENT AND FORECASTING OF WASTES IN THE LOGISTICS CHAIN OF RAILWAY CONTAINER TRANSPORTATION

Abstract. The article is devoted to the development of a mathematical model for predicting time losses in railway container transportation. Losses are classified within the context of the lean manufacturing concepts: muda (waiting), muri (overburden), and mura (unevenness).

The relationship between the magnitude of time losses, flow unevenness, and resource utilization was investigated using the mathematical tools of graph theory and queuing theory. An adapted Pollaczek-Khintchine formula was applied to calculate the average queue length and the expected container delay time. The proposed formula allows predicting the average time losses arising during container delivery, caused by the overburden of transport hubs and/or individual terminals, as well as container flow variability.

Model verification was conducted based on real data from the Zabaikalsk railway border crossing point, demonstrating the adequacy of the forecast. However, improving prediction accuracy requires model modification by incorporating additional factors influencing queue formation, such as: service priority for specific flows, the non-deterministic nature of service speed, and other variables not accounted for in the current model version.

Using the model, dependencies were established between a container's queue dwell time, the hub's utilization level, and the flow variation coefficient. The study showed that the impact of flow variability on the queue is more significant at high hub utilization levels. Therefore, under conditions of infrastructure shortage, it is critically important to ensure a reduction in container flow unevenness and uncertainty.

Recommendations for reducing time losses were substantiated, including increasing throughput capacity, synchronizing train schedules, and distributing cargo along routes with minimal load. The conclusions have practical significance for container market participants, enabling them to predict delivery times and choose routes with minimal logistical risks and losses. The results can contribute to enhancing the overall operational efficiency of Russian railways.

Keywords: container transportation, logistics chain, lean manufacturing, transport process losses, queuing systems, forecasting, modeling.

В контексте бережливого производства потери выступают ключевым фактором снижения эффективности транспортно-логистических систем. Основными источниками потерь являются повреждение грузов в процессе перевалки; простои, связанные с ожиданием обработки; неполная загрузка транспортных средств; неоптимальное планирование маршрутов [1, 2].

Сегодня на железной дороге наиболее острой остается проблема потерь времени, вызванных ожиданием обработки транспортного потока. Так, в 2023 – 2024 гг. доля времени простоя вагонов в общем цикле доставки по разным источникам достигала 35 – 50 % [3, 4]. Основной причиной этих потерь является нехватка ресурсов – пропускной способности железных дорог и терминалов, локомотивной тяги, персонала. В ответ на инфраструктурные ограничения в отдельных регионах вводились регуляторные меры на лимитированных направлениях, что привело к невыполнению планов отгрузки готовой продукции грузовладельцами.

Потери, вызванные ожиданием процесса, в методологии бережливого производства обозначаются термином «muda» (от японского «потери, отходы»). В широком смысле «muda» – это любые операции, которые потребляют ресурсы, но не создают ценности. Помимо этого в рамках концепции выделяются такие источники потерь, как «muri» (от японского «напряженная работа, перегрузка») и «mura» (от японского «нерегулярность, неравномерность»). Таким образом, причиной возникновения очередей в транспортном процессе является не только дефицит производственных ресурсов – «muri», но и неравномерность потока – «mura».

Цель исследования – разработка математической модели для прогнозирования потерь времени ожидания, обусловленных перегрузкой инфраструктуры и вариативностью грузопотоков на примере железнодорожных контейнерных перевозок.

Взаимосвязь между величиной потерь (временем простоя контейнера в очереди), неравномерностью потока и загруженностью ресурсов исследуем с помощью математического аппарата теории графов и теории систем массового обслуживания (СМО).

Представим цепь доставки контейнера как последовательность вершин и ребер. Вершины – есть узлы переработки контейнеров, задерживающие поток в связи с перевалкой, сортировкой, накоплением, ожиданием. Ребра – транспортные коммуникации между вершинами, обеспечивающие перемещение потока.

Пусть каждый узел в цепи доставки контейнера – система массового обслуживания, которая обслуживает два потока X_1 и X_2 , обусловленных соответственно поступлением и выбытием контейнеров (погрузкой и выгрузкой). Отметим, что каждый узел подлежит дальнейшей декомпозиции и может включать в себя железнодорожную станцию, один или несколько контейнерных терминалов, портовое хозяйство, пограничный переход. В рамках настоящего исследования абстрагируемся от внутреннего устройства контейнерного узла и примем его как одноканальную систему массового обслуживания, чья пропускная способность – наименьшее значение среди пропускных способностей структурных компонентов.

Примем, что интервалы времени между поступлениями потоков детерминированы: контейнеры поступают в узел один раз в сутки. Однако объем ежесуточного потока есть случайная величина с установленным математическим ожиданием $M[X_i]$. Неравномерность величины потоков выразим через коэффициент вариации $V[X_i]$, рассчитываемый как отношение среднеквадратического отклонения σ_{xi} к математическому ожиданию $M[X_i]$.

Итак, мы имеем одноканальную СМО с групповыми прибытиями и детерминированными интервалами времени между партиями. Для расчета средней длины очереди воспользуемся формулой Полячека – Хинчина, адаптированной для групповых прибытий [5]:

$$L = \frac{\lambda M[X^2]}{2(\mu - \lambda M[X])}, \quad (1)$$

где $M[X^2]$ – математическое ожидание квадрата случайной величины X ;

μ – пропускная способность системы, конт./сут;

λ – средний интервал времени между прибытиями, принимаем $\lambda=1$, так как принято условие о прибытии потока дискретно один раз в сутки.

Преобразуем данную формулу для выражения средней длины очереди через коэффициент вариации потока $V[X]$.

Если дисперсия рассчитывается как

$$\sigma_x^2 = M[X^2] - M^2[X], \quad (2)$$

а коэффициент вариации –

$$V[X] = \frac{\sigma_x}{M[X]}, \quad (3)$$

то формула средней длины очереди примет вид:

$$L = \frac{M[X]^2 (V[X]^2 + 1)}{2(\mu T - M[X])}. \quad (4)$$

Модифицируем формулу с учетом обслуживания системой двух видов потоков (погрузка и выгрузка контейнеров), для каждого из которых известны математическое ожидание и коэффициент вариации. Примем допущение отсутствия приоритетов обслуживания потоков, т. е. контейнеры под погрузку и выгрузку принимаются с равной вероятностью.

Математическое ожидание квадрата суммарной величины X_{total} для двух потоков выразим так:

$$M[X_{total}^2] = M[X_1^2] + M[X_2^2] + 2M[X_1]M[X_2]. \quad (5)$$

Тогда формула расчета средней длины очереди при обслуживании двух потоков примет вид:

$$L = \frac{M[X_1]^2(V[X_1]^2 + 1) + M[X_2]^2(V[X_2]^2 + 1) + 2M[X_1]M[X_2]}{2(\mu T - M[X_1] - M[X_2])}. \quad (6)$$

В формуле (6) числитель отражает вклад средней нагрузки двух потоков на терминал с поправкой на их вариативность, а знаменатель – запас пропускной способности системы, уменьшающий очередь. Увеличение коэффициента вариации $V[X]$ приводит к росту очереди, так как высокая вариабельность размера потоков усиливает неравномерность нагрузки. Если $M[X] \rightarrow \mu T$, то знаменатель стремится к нулю и $L \rightarrow \infty$, что соответствует переходу системы в нестабильный режим.

Формула для среднего времени ожидания W выводится из закона Литтла, согласно которому число заявок в системе равно средней интенсивности входного потока, умноженной на среднее время пребывания в системе:

$$W = \frac{M[X_1]^2(V[X_1]^2 + 1) + M[X_2]^2(V[X_2]^2 + 1) + 2M[X_1]M[X_2]}{2(\mu T - (M[X_1] + M[X_2])) \cdot (M[X_1] + M[X_2])}. \quad (7)$$

Таким образом, формула (7) позволяет прогнозировать средние потери времени, возникающие в процессе доставки контейнера и вызванные перегрузкой транспортных узлов и (или) отдельных терминалов, а также вариабельностью контейнеропотока.

Формулы (6), (7) справедливы при условии стабильности системы, т. е. $M[X_1] + M[X_2] \leq \mu T$.

Проведем верификацию модели на примере важнейшего железнодорожного пункта пропуска в Забайкальске, включающего в себя несколько контейнерных терминалов, железнодорожную станцию, подъездные железнодорожные пути и другую транспортную инфраструктуру. Математическое ожидание и коэффициент вариации обрабатываемых потоков определим на основе данных статистики ОАО «РЖД» за 2023 – 2024 гг. Данные о перерабатывающей способности узла примем на основе открытых источников [6].

На основе обработки статистики за два года получены характеристики потока и вычислены параметры ЖДПП Забайкальск как системы массового обслуживания по формулам (6), (7) (таблица).

Сравним полученные прогнозные результаты с данными о простое отдельных контейнеров в узле.

Имеется выборка из 37 наблюдений о задержке контейнеров в очереди на обработку на ЖДПП Забайкальск, полученных в разные периоды времени в течение 2023 – 2024 гг. Имеющиеся значения включают в себя только время ожидания без учета сроков обработки и сортировки контейнеров. По сгруппированным данным построена теоретическая логнормальная кривая, результаты представлены на рисунке 1.

Характеристика	Единица измерения	Обозначение	Значение
Исходные параметры			
Математическое ожидание потока прибытия контейнеров	ДФЭ в сутки	$M[X_1]$	654
Коэффициент вариации прибытия контейнеров	коэфф.	$V[X_1]$	0,52
Математическое ожидание потока отправления контейнеров	ДФЭ в сутки	$M[X_2]$	528
Коэффициент вариации отправления контейнеров	коэфф.	$V[X_2]$	0,37
Пропускная способность системы	ДФЭ в сутки	μ	1265
Расчетные параметры			
Средняя длина очереди	ДФЭ	L	9409
Среднее время ожидания	сутки	W	7,96

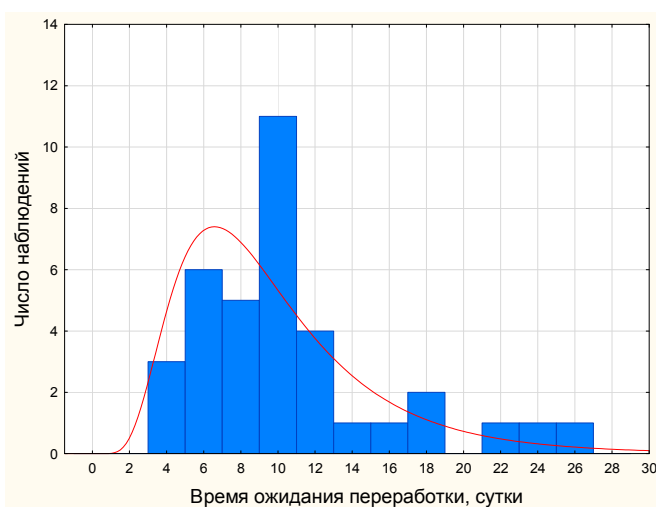


Рисунок 1 – Гистограмма распределения времени ожидания, суток

Гипотеза о логнормальном распределении времени ожидания подтвердилась критерием Колмогорова – Смирнова. Математическое ожидание – 9,8 суток, доверительный интервал для математического ожидания с 95 % вероятностью получен на уровне от 7,9 до 11,6 суток.

Таким образом, прогнозное время пребывания контейнера в очереди, рассчитанное по формуле (7), находится в пределах доверительного интервала при заданной статистической выборке, что подтверждает адекватность модели реальным данным. Однако необходимо отметить, что прогнозная оценка

демонстрирует смещение в сторону нижней границы доверительного интервала. Повышение точности прогноза требует модификации модели за счет включения дополнительных факторов, влияющих на формирование очереди, таких как приоритетность обслуживания отдельных потоков; недетерминированный характер скорости обслуживания; иные переменные, не учтенные в текущей версии модели.

Кроме того, для повышения надежности верификации модели целесообразно увеличение объема контрольной выборки.

Перечисленные задачи определены в качестве направлений для дальнейших исследований.

Установим зависимости времени пребывания контейнера в очереди от степени загрузки узла и средневзвешенного коэффициента вариации двух потоков с использованием модели (7). Результат приведен на рисунке 2.

Рисунок 2, а демонстрирует зависимость времени ожидания от уровня загрузки узла. Исследование на модели показывает, что при уровне загрузки менее 85 % время простоя в очереди растет линейно, при более высоких уровнях загрузки – экспоненциально. На рисунке 2, б показана зависимость времени ожидания от коэффициента вариации потока при разных уровнях загрузки системы. Эксперимент показал, что влияние вариативности потока на очередь существеннее при высоком уровне загрузки, чем при низком. Таким образом,

проведенное исследование доказывает, что в условиях дефицита инфраструктуры критически важно обеспечивать снижение неравномерности и неопределенности контейнеропотока.

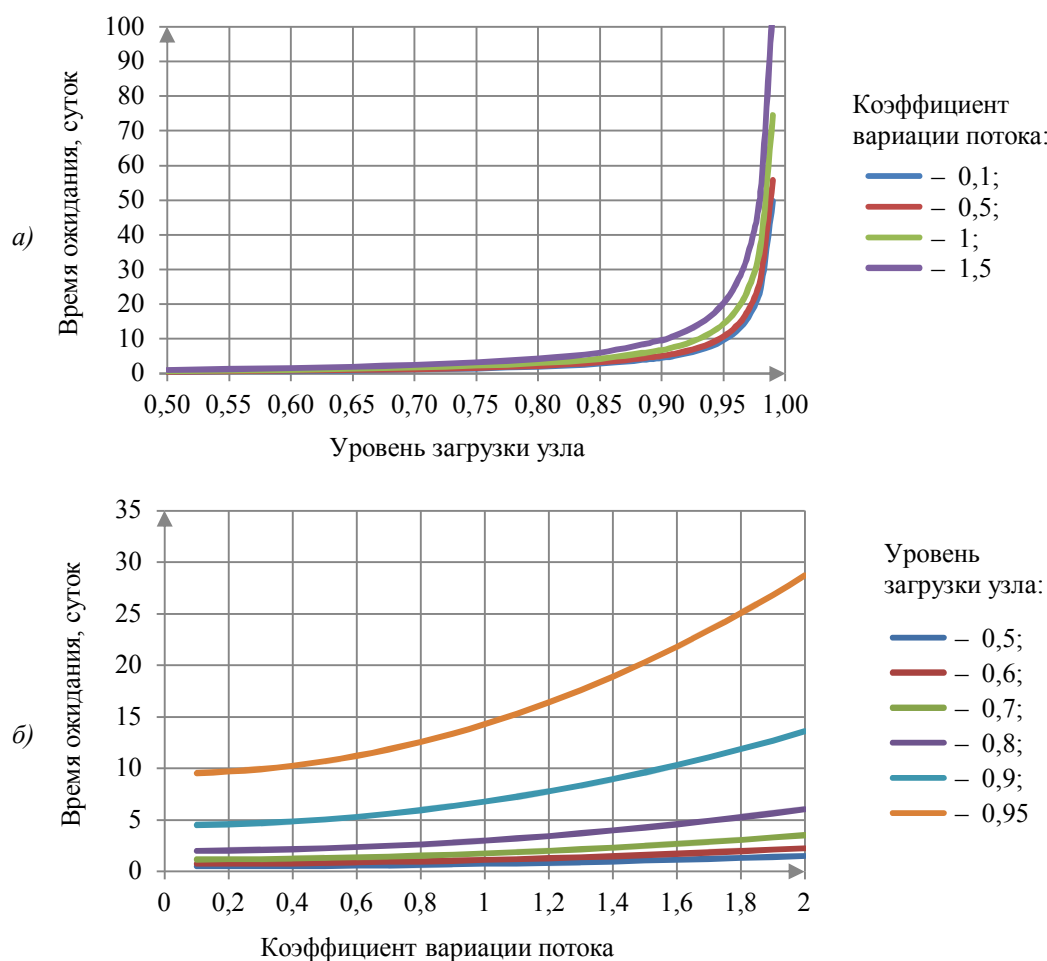


Рисунок 2 – Зависимость времени ожидания от загрузки узла и вариативности потока

Снижение потерь, вызванных простоем контейнеров в ожидании обслуживания, можно обеспечить

- путем наращивания пропускной способности обрабатывающих узлов;
- формирования согласованных расписаний движения потока для снижения его вариативности;
- перераспределения потока между альтернативными маршрутами с учетом степени загрузки узлов [8].

Практическая значимость модели для участника контейнерного рынка заключается в возможности прогнозировать срок доставки контейнеров через конкретные транспортные узлы и принимать решение о выборе оптимального маршрута на основе суммарных логистических затрат с учетом вероятных потерь.

Список литературы

1. Королев, С. А. Применение инструментов бережливого производства в транспортных компаниях и логистике / С. А. Королев. – Текст : непосредственный // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. – 2019. – № 2. – С. 22–25. – EDN IPTUT.
2. Высотский, С. В. Бережливое производство как методология повышения эффективности транспортных систем / С. В. Высотский, Д. И. Кочнева. – Текст : непосредственный // Экономика железных дорог. – 2025. – № 4. – С. 58–68. – EDN RJSPQG.

3. Оборот вагона в 2023 году – о чем он нам может рассказать // RZD Partner: сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/oborot-vagona-v-2023-godu-o-chyem-on-nam-mozhet-rasskazat/> (дата обращения: 20.05.2025).
4. Падение объемов перевозок // Газета ведомости : сайт – Текст : электронный. – URL: https://www.vedomosti.ru/industry/infrastructure_development/characters/2025/05/16/1110392-padenie-obemov-perevozok (дата обращения: 20.05.2025).
5. Gross, D., Shortle, J., Thompson, H. and Harris, C. (2008) Fundamentals of Queueing Theory. John Wiley & Sons, New York. <https://doi.org/10.1002/9781118625651>.
6. Сделали ставку на «Забайкалье» // ООО «Российские железные дороги» : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=217962> (дата обращения: 20.05.2025).
7. Официальный сайт Дальневосточного федерального округа. – Текст : электронный. – URL: <http://dfo.gov.ru/trutnev/6820> (дата обращения: 20.05.2025).
8. Кочнева, Д. И. Интегрированное управление контейнерной транспортной системой региона / Д. И. Кочнева, В. М. Сай. – Текст : непосредственный // Экономика региона. – 2021. – Т. 17. – № 4. – С. 1270–1285. – DOI 10.17059/ekon.reg.2021-4-16. – EDN XCDPHA.

References

1. Korolev S.A. The use of lean manufacturing tools in transport companies and logistics. *Transport i mashinostroenie Zapadnoi Sibiri – Transport and Mechanical Engineering of West Siberia*, 2019, no. 2, pp. 22-25. EDN IPTUT. (In Russian).
2. Vysotsky S.V. Kochneva D.I. Lean production as a methodology for increasing the efficiency of transport systems. *Ekonomika zheleznih dorog – The economy of railways*, 2025, no. 4, pp. 58-68. EDN RJSPQG. (In Russian).
3. *Oborot vagona v 2023 godu – o chem on nam mozhet rasskazat'* [Wagon Turnaround Time in 2023 – What Can It Tell Us?]. *RZD Partner*. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/oborot-vagona-v-2023-godu-o-chyem-on-nam-mozhet-rasskazat/> (accessed 20.05.2025). (In Russian).
4. *Padenie ob'emov perevozok* [Decline in Freight Volumes]. Available at: https://www.vedomosti.ru/industry/infrastructure_development/characters/2025/05/16/1110392-padenie-obemov-perevozok (accessed 20.05.2025). (In Russian).
5. Gross, D., Shortle, J., Thompson, H. and Harris, C. (2008) Fundamentals of Queueing Theory. John Wiley & Sons, New York. <https://doi.org/10.1002/9781118625651>.
6. *Sdelali stavku na «Zabaikal'e»* [We have placed a bet on "Zabaikal'e"]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=217962> (accessed 20.05.2025). (In Russian).
7. *Ofitsial'nyi sait Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga* [Official Website of the Far Eastern Federal District]. Available at: <http://dfo.gov.ru/trutnev/6820> (accessed 20.05.2025). (In Russian).
8. Kochneva D.I., Say V.M. Integrated management of the regional container transport system. *Ekonomika regiona – Economy of regions*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 1270-1285. DOI: 10.17059/ekon.reg.2021-4-16. EDN XCDPHA. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кочнева Дарья Ивановна

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kochneva Darya Ivanovna

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Мировая экономика и логистика», УрГУПС.
Тел.: +7 (901) 210-70-50.
E-mail: DKochneva@usurt.ru

Ph.D. in in Engineering, associate professor of the
department of World Economy and Logistics, USURT.
Phone: +7 (901) 210-70-50.
E-mail: DKochneva@usurt.ru

Высотский Сергей Валерьевич
Уральский государственный университет путей
сообщения (УрГУПС).
Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Мировая экономика и
логистика», УрГУПС.
Тел.: +7 (992) 601-56-66.
E-mail: vsv@tetrastrans.ru

Vysotsky Sergey Valerievich
Ural State University of Railway Transport
(USURT).
66, Kolmogorova st., Yekaterinburg, 620034,
the Russian Federation.
Postgraduate Student of the department of World
Economy and Logistics, USURT.
Phone: +7 (992) 601-56-66.
E-mail: vsv@tetrastrans.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кочнева, Д. И. Оценка и прогнозирование потерь
в логистической цепи железнодорожных контей-
нерных перевозок / Д. И. Кочнева, С. В. Высотский. –
Текст : непосредственный // Известия Транссиба. –
2025. – № 2 (62). – С. 59 – 66.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kochneva D.I., Vysotsky S.V. Assessment and
forecasting of wastes in the logistics chain of railway
container transportation. *Journal of Transsib Railway
Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 59-66. (In Russian).

УДК 656.27.022.846:629.4.024.1

Э. С. Шерматов

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

ОПТИМАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СУТОЧНОЙ РАБОТЫ СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ СЕТЕВОГО ГРАФИКА

Аннотация. В данной статье подробно проанализированы актуальные вопросы повышения эффективности выполнения грузовых операций с вагонами на грузовых железнодорожных станциях и прилегающих к ним подъездных путях. Основное внимание уделено сокращению избыточного времени простоя вагонов, автомобильного и другого подвижного состава за счет совершенствования технологической последовательности погрузочно-разгрузочных процессов, а также рационализации использования технических средств. В исследовании обоснована необходимость оснащения грузовых фронтов требуемым количеством современных погрузочно-разгрузочных машин для обеспечения своевременной обработки прибывающих в вагонах грузов различных категорий. В соответствии с фактической интенсивностью грузопотока, определяются наиболее загруженные фронты, находящиеся на критическом пути, и предлагается их оптимальное распределение с учетом количества, производительности и загрузки используемых технических ресурсов.

Такой системный подход создает реальные предпосылки для своевременного выполнения всех грузовых операций в рамках установленных сроков, минимизирует риски задержек и обеспечивает устойчивый ритм работы станции. В статье предложены направления дальнейшего совершенствования организации локальной работы станции путем построения рационального и сбалансированного суточного графика. Применение методов сетевого планирования позволяет точно определить критически важные операции, задержка которых может вызвать сбой в графике, и обеспечивает надежную координацию всех этапов обработки вагонов. В результате достигается комплексное повышение эффективности управления грузовой станцией и ее производственной деятельности.

С целью предотвращения простоев транспортных средств при подаче и уборке этих вагонов целесообразно для более эффективной организации данного процесса осуществлять его с помощью программы Microsoft Project.

Ключевые слова: сетевой график, грузовой фронт погрузки-разгрузки, подъездные пути, подача и уборка вагонов на подъездные пути, погрузо-разгрузочные машины, вагон, маневровый локомотив, местная работа станции.

Elbek S. Shermatov

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, the Republic of Uzbekistan

OPTIMAL ORGANIZATION OF THE STATION'S DAILY PLANNING AND GRAPHIC WORK BASED ON NETWORK DIAGRAMS

Abstract. This article provides a detailed analysis of relevant issues related to improving the efficiency of freight operations with railcars at freight railway stations and the adjacent access tracks. The main focus is on reducing excessive idle time of railcars, trucks, and other rolling stock by optimizing the technological sequence of loading and unloading processes, as well as by rationalizing the use of technical equipment.

The study substantiates the need to equip freight handling areas with a sufficient number of modern loading and unloading machines to ensure timely handling of cargo arriving in railcars of various categories. In accordance with the actual intensity of cargo flows, the most heavily loaded fronts located on critical paths are identified, and their optimal distribution is proposed, taking into account the quantity, performance, and workload of the technical resources in use.

This systematic approach creates real preconditions for timely completion of all freight operations within the established timeframes, minimizes the risk of delays, and ensures a steady workflow at the station. The article also suggests ways to further improve the organization of local station operations through the development of a rational and balanced daily schedule. The use of network planning methods makes it possible to accurately identify critical operations, delays in which may cause schedule disruptions, and ensures reliable coordination of all stages of railcar handling.

As a result, comprehensive improvements in the efficiency of freight station management and its operational performance are achieved.

To prevent the idle time of transport vehicles during the delivery and removal of these railcars, it is advisable to carry out this process using Microsoft Project software for better organization.

Keywords: network schedule, loading and unloading front, branch tracks, placement and removal of wagons on branch lines, loading and unloading machines, wagon, shunting locomotive, local station operations.

На станциях многие операции, связанные с обработкой грузов, выполняются в условиях ограничения времени. В таких случаях для сокращения общего времени работы можно значительно уменьшить общую продолжительность производимых операций, выполняя их в упорядоченной последовательности. Поэтому для подобных ситуаций целесообразно разработать сетевой график, основанный на взаимозависимости всех операций.

С помощью сетевого графика составляется схематическое представление событий и процессов в технологическом цикле размещения и удаления вагонов на подъездных путях, в котором операции планируются в упорядоченной последовательности, связывая технологические процессы от прибытия до отправления сборных или передаточных поездов со станции [1 – 5].

Всего к станции «Сергели» подключено 65 подъездных путей. Среди них такие ветки, как «ТМЗ», «Турбинный завод», «Олий немат», «Чермет ДУК», «Железнодорожное топливное снабжение» и «Грузовой двор», используют собственные локомотивы. Эти выбранные линии использовались для построения сетевого графика.

Состояние формирования сетевого графика в основном делится на три раздела.

1. Работа – трудовой процесс, сопровождающийся затратами времени или ресурсов (например: подача и уборка вагонов, погрузка грузов в вагоны и разгрузка из них, перестановка вагонов и т. п.). Работа может быть представлена в таких видах:

а) ожидание – процесс, не требующий материальных ресурсов и труда, но требующий времени (например: маневровый локомотив ожидает прибытия поезда для перераспределения);

б) зависимость – это логическая взаимосвязь двух или более операций, не требующая никаких затрат времени, труда, средств.

Каждая работа оценивается по времени (минуты, часы, дни, недели, месяцы). В сетевом графике работа изображается стрелкой, направления идут слева направо. Работа и ожидание обозначаются прямой стрелкой, а зависимость – пунктирной линией.

2. Событие – это результат одной или нескольких ранее выполненных работ, которые способствуют выполнению последующих работ (например: отпуск вагонов – разгрузка вагонов – выгрузка из вагона).

Каждое событие может быть несколькими предшествующими и последующими. Примером начала события может служить прибытие поездов или передача их на грузовую станцию.

Мы можем принять отправку поездов как окончание этого самого события.

Сетевой график с одним ограниченным событием называется одноцелевым, а сетевой график с несколькими ограниченными событиями – многоцелевым. Сетевой график, изображающий грузовую станцию с несколькими поездами, многоцелевой. Промежуток между началом и концом всех событий по их взаимному расположению называется периодом. Для изображения событий используется окружность.

3. Путь – это непрерывная технологическая последовательность работ до конечного события. Сумма длины дороги определяется продолжительностью ближайших работ на ней. Путь с наибольшей длительностью называется критическим, и по нему определяется минимальное время, необходимое для выполнения всех работ сетевого графика.

Ближайшие дела на критическом пути также считаются очень важными. Продолжительность программы будет зависеть от продолжительности этих работ. На сетевом графике критический путь выделяется толстыми линиями. Дорога, близкая к критической, называется дорогой, близкой к критической.

При формировании сетевого графика определяется следующее:

а) наиболее раннее и наиболее позднее возможное время начала и окончания выполняемых работ;

б) критическое время прохождения сетевого графика и продолжительность выполняемых по нему работ;

в) общие и частные резервы времени работ, не лежащих на критическом пути сетевого графика.

При представлении параметров сетевого графика изображается условная сеть, состоящая из трех событий (рисунок 1),

где $h - i$ – предыдущая работа;

$i - j$ – текущая работа;

$j - k$ – следующая работа;

t_{i-j} – продолжительность данной ($i - j$) работы;

t_{h-i} – продолжительность предыдущей работы;

t_{i-k} – продолжительность последующей работы;

t_{i-j}^{PH} – раннее начало этой работы;

t_{i-j}^{NN} – позднее начало этой работы;

R_{i-j} – полный резерв времени работы;

r_{i-j} – частный (свободный) резерв времени.

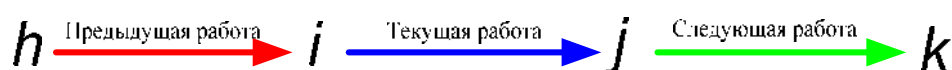


Рисунок 1 – Схема работы, которая должна быть выполнена в трех случаях

На сетевом графике раннее начало работы определяется продолжительностью самого длинного пути

$$t_{i-j}^{PH} = \max n t_{h-i}, \quad (1)$$

где n – один из всех предыдущих путей.

Позднее начало работы определяется как разница между продолжительностью критического пути и суммой продолжительности конкретной работы и наиболее длинного пути, рассчитываемого от конечного события до события, в которое была включена эта работа:

$$t_{i-j}^{п.н} = t_{крит} - (t_{i-j} + \max nt_{j-k}). \quad (2)$$

Под полным резервом времени следует понимать время, в течение которого можно увеличить продолжительность данной работы, не откладывая ее начала или не изменяя общий срок выполнения:

$$R_{i-j} = t_{i-j}^{п.н} - t_{i-j}^{п.о}. \quad (3)$$

Резерв собственного времени характеризует рабочее время, в течение которого можно начать работу или увеличить ее продолжительность, не изменяя более раннего начала последующих работ. Он определяется как разница между более ранним началом последующей работы и более ранним окончанием данной работы:

$$r_{i-j} = t_{j-k}^{п.н} - t_{i-j}^{п.о}, \quad (4)$$

где $t_{i-j}^{п.о}$ – сумма значений раннего окончания любой работы, раннего начала и продолжительности определенной работы:

$$t_{i-j}^{п.о} = t_{i-j}^{п.н} + t_{i-j}. \quad (5)$$

При расчете параметров времени (события) окончания первой операции и начала второй операции реализуется четырехсекторным методом схема, наглядно представленная на рисунке 2. В этом методе события изображаются в увеличенном масштабе и делятся на четыре части.

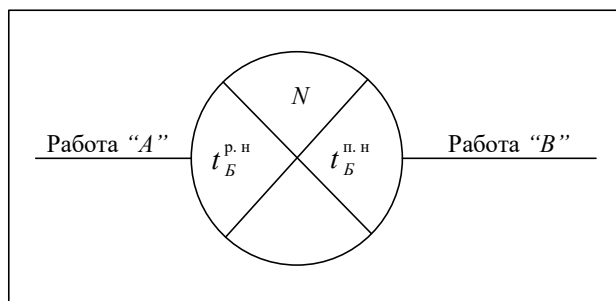


Рисунок 2 – Схема события, разделенного на четыре сектора

Как показано на рисунке 2, в верхней части сектора указываются номера событий, в левом секторе – значение $t_{i-j}^{п.н}$ – самое раннее начало работы, а в правом секторе – $t_{i-j}^{п.н}$ – самое позднее начало работы. Все левые сектора заполняются слева направо, начиная с начального события, и если событие включает в себя две работы или более, принимается максимальное значение.

Все правые сектора заполняются справа налево. В них указывается минимальное значение.

События, имеющие одинаковые значения в левом и правом секторах, считаются критическими событиями сетевого графика.

Резервы времени выполнения работ указываются над стрелками.

Полный резерв времени равен значению правого сектора в конце стрелки.

Частный резерв времени равен значению левого сектора в конце стрелки.

На рисунках 3 и 4 приведены сетевые графики для пары сборных поездов № 3602.

На данных графиках показаны операции, выполняемые с момента прибытия поезда до его отправления, а также коммерческие операции, связанные с обработкой документов.

Обслуживание сборного поезда № 3602 по суточному графику осуществляется на основе расписания, как указано в таблице 1.

20 ноября 2024 г. на станцию Сергели прибыл сборный поезд № 3602, состоящий из 65 груженых вагонов. Из них только 35 вагонов были поданы на подъездные пути с использованием маневрового локомотива ТЕМ2-6793. Из этих вагонов:

- 1-я группа – 10 зерновозов были направлены в ООО «Diamond Group»;
- 2-я группа – 12 зерновозов были направлены в ООО «Naziv Dunya»;
- 8 полувагонов были поданы в «Pro Global»;
- 5 крытых вагонов с грузом были направлены на подъездной путь ООО «O'zpolimirkimyosanoat».

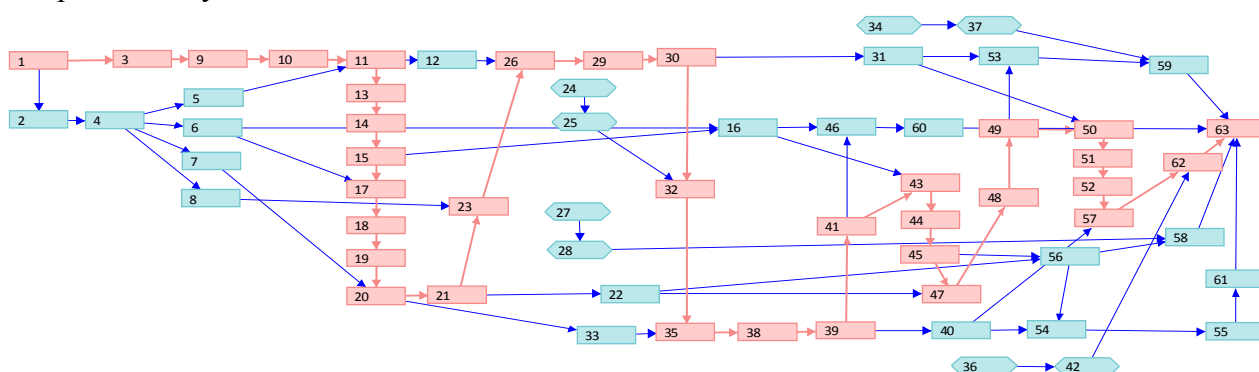


Рисунок 3 – Схема сетевого графика, составленного в Microsoft Project, отражающая работу погрузочно-разгрузочных машин на станции Сергели в рамках локальной деятельности в течение времени, установленного по договору

Последовательность расчета параметров сетевого графика:

1. До начала работы:

К событию 11 входят две работы: 10 – 11 и 5 – 11, их продолжительность составляет соответственно 340 и 185 мин. В левом секторе события 11 зафиксировано максимальное значение пути – 340 мин.

К событию 49 входят работы 37 – 49, 44 – 49, 47 – 49, 46 – 49 и 48 – 49, продолжительность которых составляет соответственно 760, 900, 825, 995 и 965 мин. В левом секторе установлено максимальное значение – 995 мин и т. д.

2. После начала работы:

В событие 42 входят работы 42 – 46 и 42 – 43 а работы 43 – 45 и 45 – 46 – в событие 46. В правом секторе события 42 указано минимальное значение и т. д.

3. Полный временной резерв:

для работы 8 – 17: $485 - 270 - 120 = 95$ мин;

для работы 16 – 36: $780 - 465 - 120 = 195$ мин;

для работы 11 – 32: $705 - 340 - 120 = 245$ мин;

для работы 31 – 43: $915 - 670 - 90 = 155$ мин;

для работы 15 – 25: $600 - 425 - 90 = 85$ мин;

для работы 24 – 40: $850 - 565 - 120 = 165$ мин – определено.

4. Частичный временной резерв:

работа 12 (8 – 17): $485 - 270 - 120 = 95$ мин;

работа 22 (16 – 36): $780 - 465 - 120 = 195$ мин;

работа 16 (11 – 32): $705 - 340 - 120 = 245$ мин;

работа 31 (24 – 40): $850 - 565 - 120 = 165$ мин;

работа 40 (31 – 43): $915 - 670 - 90 = 155$ мин;

работа 33 (15 – 25): $600 - 425 - 90 = 85$ мин.

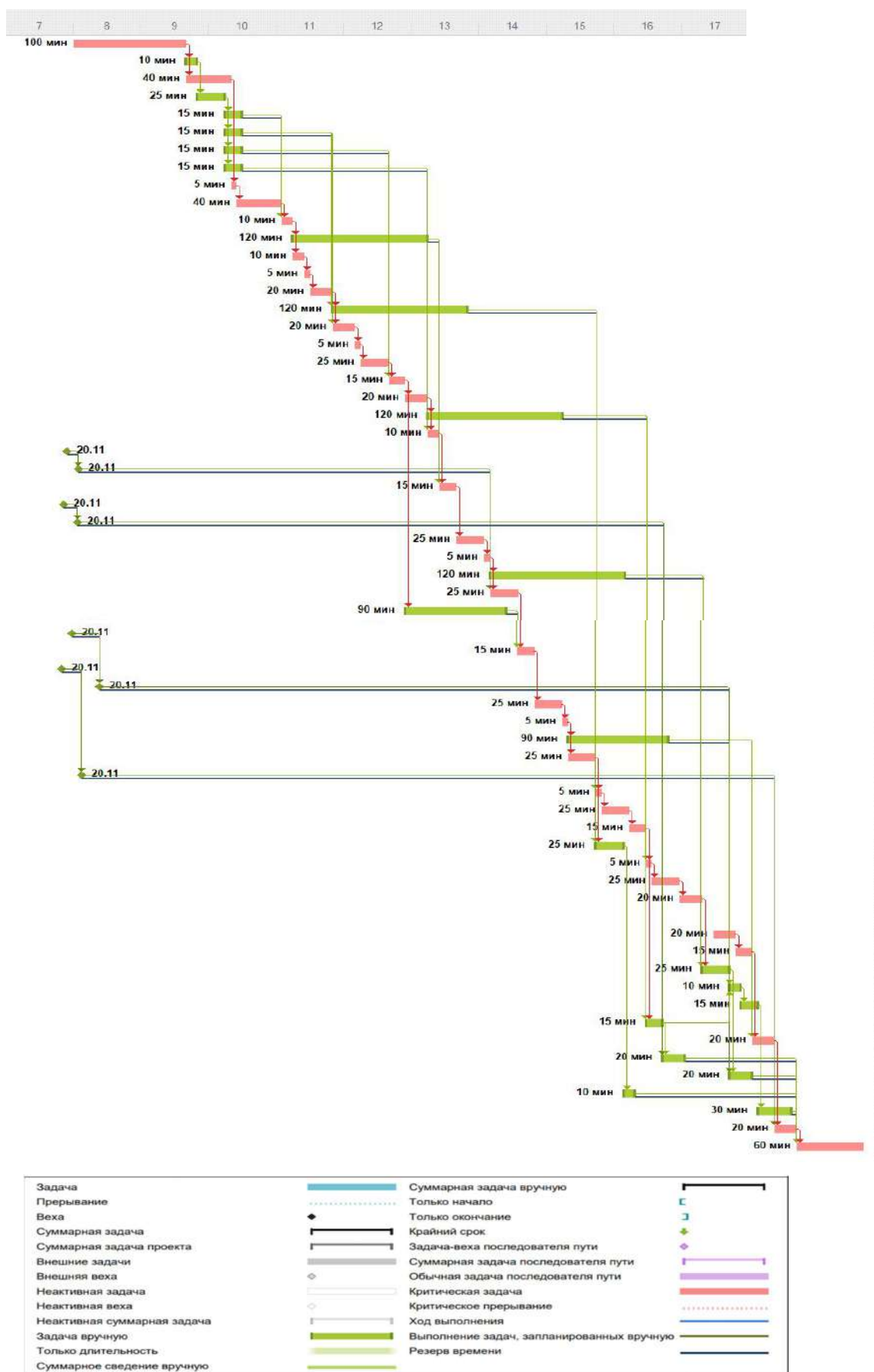


Рисунок 4 – График работы погрузочно-разгрузочных машин на станции Сергели при выполнении работ в установленное договором время

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

Таблица 1 – Организационные операции сетевого графика и их продолжительность

Номера работы, п/п	Номера работы	Наименование работ	Продолжительность работы, мин	Связь работ
1	2	3	4	5
1	1 – 2	Завершение обработки прибывшего поезда № 3602	110	
2	2 – 3	Завершение передачи транспортных документов из технического отдела в товарную контору	20	1
3	2 – 4	Завершение расформирования поезда № 3602	60	1
4	3 – 5	Завершение обработки транспортных документов в товарной конторе	35	2
5	5 – 7	Передача транспортных документов из товарной конторы на грузовой фронт ООО «Diamond group»	20	4
6	5 – 11	Завершение обработки транспортных документов в товарной конторе и передача их на грузовой фронт ООО «Naziv dunyo»	20	4
7	5 – 14	Завершение передачи вагонного листа из товарной конторы в склад «Pro global»	20	4
8	5 – 16	Завершение обработки транспортных документов и передача их в ООО «O'zpolimirkimyosanoat»	20	4
9	4 – 6	Завершение прицепки маневрового локомотива ТЕМ2-6793 к первой группе вагонов, подлежащих подаче	20	3
10	6 – 7	Завершение доставки первой группы груженных вагонов на склад ООО «Diamond group»	60	9
11	7 – 8	Завершение расстановки вагонов на грузовом фронте ООО «Diamond group» для разгрузки	20	10; 5
12	8 – 17	Время разгрузки вагонов на грузовом фронте ООО «Diamond group»	120	11
13	8 – 9	Возвращение локомотива ТЕМ2-6793 в сортировочный парк станции	20	11
14	9 – 10	Завершение прицепки локомотива ТЕМ2-6793 ко второй группе вагонов, подлежащих подаче	10	13
15	10 – 11	Завершение подачи груженных вагонов на грузовой фронт ООО «Naziv dunyo»	40	14
16	11 – 32	Время разгрузки вагонов на грузовом фронте ООО «Naziv dunyo»	120	15; 6
17	11 – 12	Возвращение локомотива ТЕМ2-6793 в сортировочный парк станции	20	15; 6
18	12 – 13	Прицепка локомотива ТЕМ2-6793 к третьей группе вагонов, подлежащих разгрузке	10	17
19	13 – 14	Завершение доставки вагонов в склад для разгрузки «Pro global»	35	18
20	14 – 15	Завершение расстановки вагонов на грузовом фронте «Pro global»	20	19; 7
21	15 – 16	Завершение подачи вагонов в разгрузочный склад ООО «O'zpolimirkimyosanoat»	40	20
22	16 – 36	Разгрузка на складе ООО «O'zpolimirkimyosanoat»	120	21
23	16 – 17	Завершение передачи вагонного листа из товарной конторы на склад ООО «O'zpolimirkimyosanoat»	20	21; 8
24	18	Возвращение маневрового локомотива ТЕМ2-6793 на склад за порожними вагонами для загрузки; завершение разгрузки «Diamond group»	0	
25	18 – 19	Доставка грузов ООО «Naziv dunyo» автотранспортом на фронт, оформление дорожных ведомости и накладной	0	24
26	17 – 20	Завершение прицепки порожних вагонов со склада ООО «Diamond group»	25	12; 23

1	2	3	4	5
27	21	Внешний	0	
28	21 – 22	Завоз грузов в склад ООО «O'zpolimirkimyosanoat» автотранспортными средствами и оформление транспортной накладной и грузового листа на эти грузы	0	27
29	20 – 23	Завершение повторной расстановки порожних вагонов на погрузочном складе ООО «Diamond group»	45	26
30	23 – 24	Завершение распределения порожних вагонов на погрузочном складе ООО «Diamond group»	1	29
31	24 – 40	Погрузка на складе ООО «Diamond group»	120	30
32	24 – 25	Завершение разгрузки грузов «Pro global» и прибытие маневрового локомотива в разгрузочный склад	35	30
33	15 – 25	Разгрузка вагонов в «Pro global»	90	20
34	26	Внешний	0	
35	25 – 27	Завершение сбора и прицепки порожних вагонов после выгрузки прибывших грузов на складе «Pro global».	25	32; 33
36	28	Внешний	0	
37	26 – 29	Ввоз грузов в ООО «Diamond group» автотранспортом, оформление транспортной накладной и грузовой квитанции отправителями	0	34
38	27 – 30	Завершение повторной установки порожних вагонов на погрузочный склад «Pro global»	35	35
39	30 – 31	Завершение расстановки порожних вагонов для погрузки на складе «Pro global»	10	38
40	31 – 43	Погрузка вагонов на складе «Pro global»	90	39
41	31 – 32	Доставка вагонов маневровым локомотивом на грузовой фронт ООО «Naziv dunyo» для погрузки	35	39
42	28 – 33	Ввоз грузов «Pro global» автотранспортом и оформление транспортной накладной и грузовой квитанции	0	36
43	32 – 34	Завершение прицепки вагонов «Pro global»	10	41; 16
44	34 – 35	Завершение вывоза вагонов «Pro global» на сборочный путь станции	30	43
45	35 – 36	Завершение погрузки грузов ООО «O'zpolimirkimyosanoat» и возвращение маневрового локомотива на склад	25	44
46	32 – 37	Передача вагонных ведомостей от ООО «Naziv dunyo» в товарную контору и завершение сортировки транспортных накладных и грузовых квитанций по вагонам «Pro global»	35	41; 16
47	36 – 38	Завершение прицепки маневровыми локомотивами груженых вагонов с грузами ООО «O'zpolimirkimyosanoat»	10	22; 45
48	38 – 39	Завершение вывоза груженых вагонов с грузами ООО «O'zpolimirkimyosanoat» на сборочный путь	35	47
49	39 – 40	Завершение погрузки грузов ООО «Diamond group» и передача груженых вагонов в погрузочный склад с помощью маневровых локомотивов	25	48
50	40 – 41	Завершение сбора вагонов на погрузочном складе ООО «Diamond group»	15	49; 31
51	41 – 42	Завершение вывоза груженых вагонов на сборочный путь	30	50

1	2	3	4	5
52	42 – 43	Возвращение маневрового локомотива после завершения погрузки грузов, переданных на склад «Pro global»	20	51
53	40 – 44	Завершение передачи вагонных ведомостей ООО «Diamond group» в товарную контору, переработка транспортных накладных и путевых листов	25	49; 31
54	43 – 45	Завершение прицепки вагонов «Pro global» к маневровому локомотиву	15	56; 40
55	45 – 46	Завершение вывоза вагонов «Pro global» на сборочный путь	25	54
56	36 – 47	Завершение переработки транспортной накладной и грузовой квитанции, передача вагонной ведомости по грузам ООО «O'zpolimirkimyosanoat» в товарную контору	25	45; 22
57	43 – 48	Завершение сортировки транспортной накладной и грузовой квитанции по «Pro global» и передача вагонной ведомости в товарную контору	25	40; 52
58	47 – 49	Передача товарной конторе перевозочных документов на грузы ООО «O'zpolimirkimyosanoat» и «Pro global», завершение формирования поезда	20	56; 28
59	44 – 49	Завершение передачи вагонных ведомостей ООО «Diamond group» в товарную контору, переработка транспортных накладных и путевых листов до отправки поезда	25	53; 37
60	37 – 49	Доставка до отправки поезда вагонных ведомостей, переданных в товарную контору от ООО «Naziv dunyo» и «Pro global»	20	46
61	46 – 49	Повторная обработка вагонов «Pro global» на сборочном пути	40	55
62	48 – 49	Подготовка вагонов «Pro global» с транспортной накладной и грузовой квитанцией к передаче в товарную контору для отправки поезда	25	57; 42
63	49 – 50	Завершение операций по отправке и вывозу поезда со станции	80	59; 60; 61; 58; 62

Оптимизация сетевого графика. На сетевом графике, изображенном на рисунках 3 и 4, необходимо проанализировать всех участников работы станции Сергели, а также механизмы, технологические и организационные связи погрузочно-разгрузочных работ.

При определении сетевого графика на рисунках 3 и 4 учитывается технологическое время процессов при условии, что пункты технического осмотра (ПТО) работают в течение времени, установленного договором.

На рисунках 5 и 6 построен сетевой график на основе фактически отработанного времени ПТО.

В статье рассмотрена оптимизация сетевого графика с учетом ресурсов ПТО.

На рисунках 3 и 4 в работах 8 – 17, 15 – 25, 24 – 40, 16 – 36, 11 – 32 и 31 – 43 применяются взаимозаменяемые механизмы. Однако поскольку эти механизмы задействованы на разных предприятиях, используются отдельные погрузчики. Поэтому за счет рационального использования ограниченных ресурсов и механизмов удастся сократить количество механизмов, работающих на примыкающих к станции подъездных путях. В результате уменьшается время ожидания вагонов.

Оптимизация построения сетевого графика, изображенного на рисунках 3 и 4, осуществляется на основе данных, представленных в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Определение количества механизмов на подъездных путях

Код работы	$t_i = j$	$r_i = j$	Количество механизмов
12 (8 – 17)	120	95	4
33 (15 – 25)	90	85	2
31 (24 – 40)	120	165	4
40 (31 – 43)	90	155	2
22 (16 – 36)	120	195	4
16 (11 – 32)	120	245	4
Итого			20

Таблица 3 – Определение количества сэкономленных механизмов

Код работы	Механизм · мин	Механизм = механизм · мин / ($r_i + t_i$)	Принятое количество механизмов	Количество сэкономленных механизмов
12 (8 – 17)	$4 \times 120 = 480$	$480 : 215 = 2,23$	3	1
33 (15 – 25)	$2 \times 90 = 180$	$180 : 175 = 1,02$	1	1
31 (24 – 40)	$4 \times 120 = 480$	$480 : 285 = 1,65$	2	2
40 (31 – 43)	$2 \times 90 = 180$	$180 : 245 = 0,734$	1	1
22 (16 – 36)	$4 \times 120 = 480$	$480 : 315 = 1,52$	2	2
16 (11 – 32)	$4 \times 120 = 480$	$480 : 365 = 2,04$	2	2
Итого			11	9

На основании данных из таблиц 2 и 3 установлено наличие личных резервов по работам 24 – 40, 16 – 36 и 11 – 32 продолжительностью соответственно 165, 195 и 245 мин.

Следовательно, данные работы могут быть выполнены за 285, 315 и 365 мин. Увеличение времени выполнения работ 24 – 40, 16 – 36 и 11 – 32 позволяет сократить количество механизмов на этих операциях на шесть единиц, а на работах 8 – 17, 15 – 25 и 31 – 43 – на один механизм в каждой.

До оптимизации для выполнения каждой из работ 24 – 40, 16 – 36 и 11 – 32 требовалось одинаково: 4 механизма $\times$ 120 мин = 480 мех. мин.

С учетом увеличения продолжительности до 485, 315 и 365 мин количество требуемых механизмов составит:

- для работы 24 – 40: 480 мех. мин: 285 мин = 1,65 мех.;
- для работы 16 – 36: 480 мех. мин: 315 мин = 1,52 мех.;
- для работы 11-32: 480 мех. мин: 365 мин = 2,04 мех.

Работы 24 – 40, 16 – 36 и 11 – 32 выполняются на грузовых фронтах станционных подъездных путей компаний ООО «Diamond group», «Naziv dunyo» и «O'zpolimirkimyosanoat».

В результате оптимизации сетевого графика по ресурсам ПРМ количество задействованных ПРМ может быть сокращено до шести единиц.

Рассмотрим сетевой график, изображенный на рисунке 5.

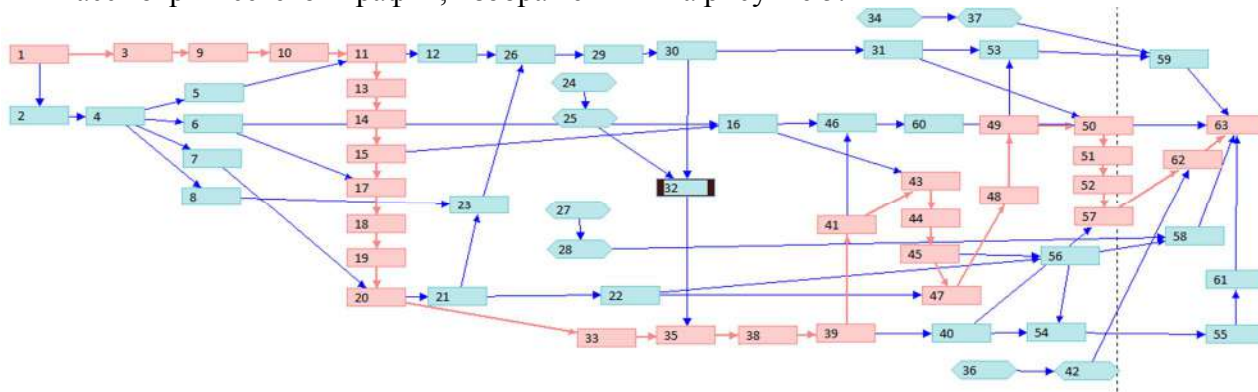


Рисунок 5 – Схема сетевого графика, составленного в Microsoft Project, для местной работы на станции Сергели при условии, что погрузочно-разгрузочные машины не работали в течение времени, установленного по договору

На сетевом графике, изображенном на рисунках 5 и 6, показано, что по работе 15 – 25 время разгрузки на ПРМ в складе компании «Pro global» по договору определено как 90 мин согласно правилам перевозок. Однако фактически выполнение этой работы заняло 180 мин, в связи с чем изменилась критическая цепь. На основании данных таблиц 4 и 5 было рассчитано, что возникает необходимость привлечения одной дополнительной ПРМ.

Таблица 4 – Определение количества механизмов на подъездных путях

Код работы	$t_i = j$	$r_i = j$	Количество механизмов
12 (8 – 17)	120	265	4
33 (15 – 25)	90 + 90	–	1
31 (24 – 40)	120	170	4
40 (31 – 43)	90 + 20	135	2
22 (16 – 36)	120 + 30	175	4
16 (11 – 32)	120 + 20	240	4
Итого			19

Таблица 5 – Определение количества сэкономленных механизмов

Код работы	Мех. мин	Механизм = мех. мин / ($r_i + t_i$)	Принятое количество механизмов	Количество сэкономленных механизмов
12 (8 – 17)	4×120 = 480	480 : (120 + 0 + 265) = 1,24	2	2
33 (15 – 25)	1×90 = 90	90 : (90 + 90 + 0) = 0,5	1	–1
31 (24 – 40)	4×120 = 480	480 : (120 + 0 + 170) = 1,65	2	2
40 (31 – 43)	2×90 = 180	180 : (90 + 20 + 135) = 1,95	2	2
22 (16 – 36)	4×120 = 480	480 : (120 + 30 + 170) = 1,5	2	2
16 (11 – 32)	4×120 = 480	480 : (120 + 20 + 230) = 1,29	2	2
Итого			11	9

Особенность применения данного сетевого графика в местной работе станции заключается в том, что при большом количестве подъездных путей и высоком суточном потоке прибывающих вагонов увеличиваются случаи несвоевременной подачи вагонов на подъездные пути, что усложняет местную работу станции и делает эффективную организацию вагонных операций приоритетной задачей. Поэтому для предотвращения простоя вагонов в процессе местной работы станции, а также обеспечения приоритетной последовательности операций, выполняемых по сетевому графику с участием подъездных путей, на которые практически в каждом поезде прибывают вагоны, обеспечивается максимальное улучшение показателей работы станции.

Для своевременного выполнения местной работы на станции Сергели были сделаны следующие выводы.

На основе сетевого графика была рассмотрена местная работа станции Сергели. При этом были выбраны наиболее часто используемые подъездные пути как места погрузки и выгрузки вагонов состава сборного поезда № 3602, прибывающего на станцию.

В сетевом графике принимали участие подъездные пути, напрямую соединенные со станцией Сергели через непрерывные рельсы, принадлежащие ООО «Diamond group», «Naziv dunyo», «Pro global» и «O'zpolimirkimyosanoat». Погрузочно-разгрузочные работы на этих подъездных путях выполняются согласно методике расчета сроков погрузки и выгрузки вагонов механизированным способом (приложение 22 к Правилам перевозок грузов железнодорожным транспортом Республики Узбекистан) и на основе договоров «эксплуатации железнодорожных подъездных путей» либо «ввода и вывода вагонов». Несмотря на то, что сроки погрузки и выгрузки были приняты в соответствии с типом груза, было установлено, что несвоевременное выполнение работ связано с нехваткой погрузочно-разгрузочных машин.

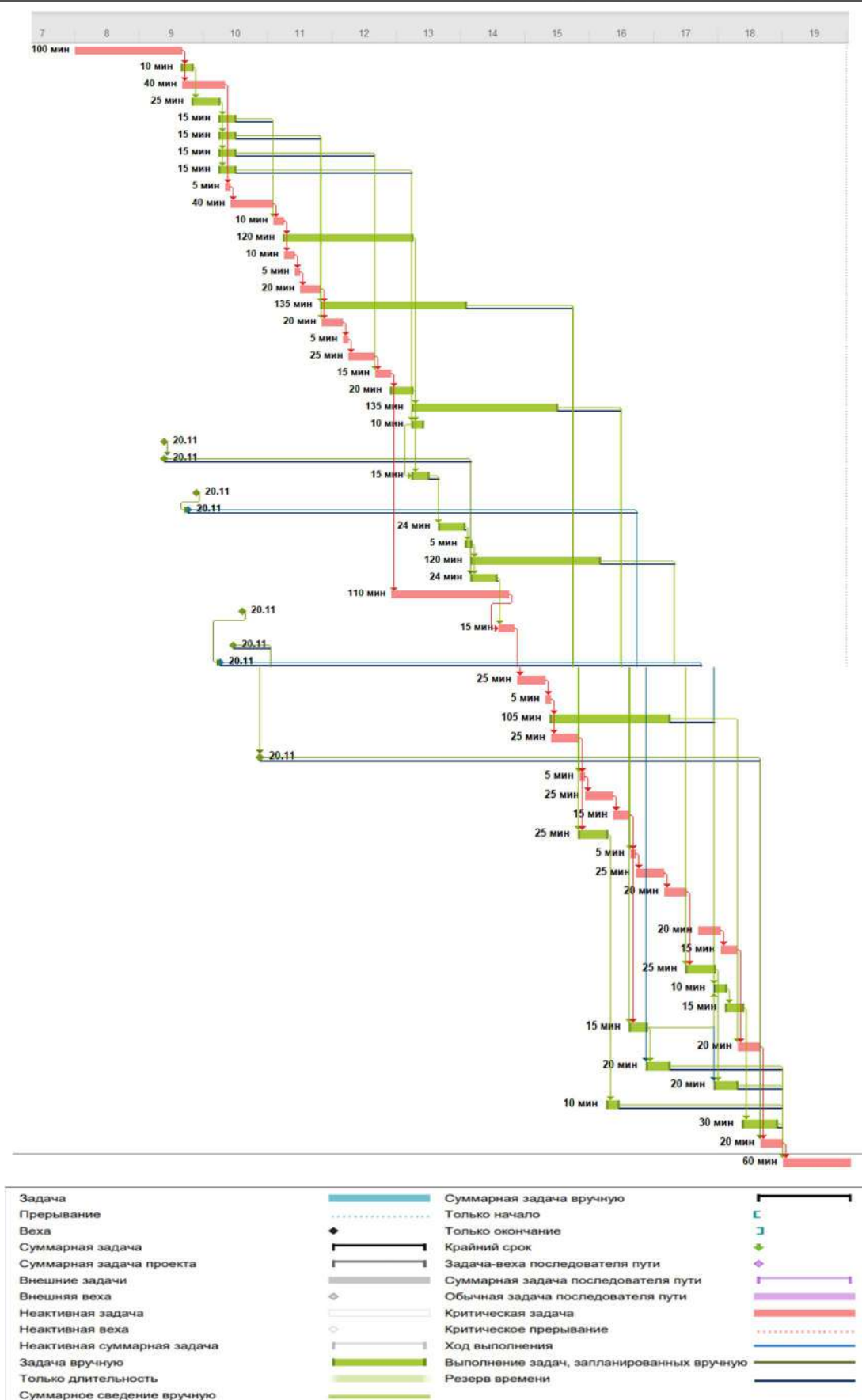


Рисунок 6 – График работы ПРМ на станции Сергели при соблюдении установленного времени

На сетевом графике, приведенном на рисунке 3, если бы ООО «Diamond group», «Naziv dunyo», «Pro global» и «O‘zpolimirkimyosanoat» выполняли погрузку и выгрузку грузов точно в сроки, указанные в договорах, то была бы определена критическая последовательность работ 1, 39, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 26, 29, 30, 32, 35, 38, 39, 41, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 57, 62, 63 продолжительностью 1075 мин, что составляет 17,91 ч.

Оптимизация сетевых графиков, представленных на рисунках 3 и 4, выполнена на основе данных таблицы 2. Было установлено, что в работах 24 – 40, 16 – 36 и 11 – 32 имеются частные резервы времени в 165, 195 и 245 мин соответственно. В связи с этим продолжительность выполнения этих работ может быть увеличена до 285, 315 и 365 мин. Увеличение времени выполнения данных работ позволило сократить число механизмов на шесть единиц, а в работах 8 – 17, 15 – 25 и 31 – 43 – по одной единице.

До оптимизации работы 24 – 40, 16 – 36 и 11 – 32 выполнялись при одинаковом ресурсе: 4 механизма $\times$ 120 мин = 480 мех. мин. После изменения общего времени выполнения до 485, 315 и 365 мин соответственно потребность в механизмах составила: $480/285 = 1,65$; $480/315 = 1,52$; $480/365 = 2,04$ механизма.

Таким образом, в результате оптимизации сетевого графика по ресурсам на фронтах выгрузки подъездных путей ООО «Diamond group», «Naziv dunyo» и «O‘zpolimirkimyosanoat», прилегающих к станции Сергели, можно сократить общее количество ПРМ до шесть единиц (по две на каждую компанию), а также избежать необходимости использования по одной машине на подъездных путях ООО «Diamond group», «Pro global» и «Naziv dunyo», что дает возможность сократить еще три механизма.

На сетевых графиках, представленных на рисунках 5 и 6, в работе 15 – 25, относящейся к складу «Pro global», согласно рисункам 3 и 4 время разгрузки составляло 90 мин, но по факту затрачено 180 мин. Это повлияло на изменение критического пути на последовательность: 1, 3, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 20, 33, 35, 38, 39, 41, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 57, 62, 63.

Согласно данным таблиц 4 и 5 работы 33 (15 – 25), 40 (31 – 43), 22 (16 – 36) и 16 (11 – 32), относящиеся к фронтам выгрузки «Pro global», ООО «O‘zpolimirkimyosanoat» и «Naziv dunyo», были фактически выполнены с превышением времени:

33 (15 – 25): 90 + 90 мин;
40 (31 – 43): 90 + 20 мин;
22 (16 – 36): 120 + 30 мин;
16 (11 – 32): 120 + 20 мин.

Из-за этого общее время выполнения сетевых графиков, представленных на рисунках 5 и 6, увеличилось до 1080 мин (18 ч.) в отличие от графика на рисунках 3 и 4, где общее время составляло 1045 мин. Работа 33 (15 – 25), связанная с фронтом выгрузки «Pro global», из-за фактической длительности 180 мин требует привлечения второй погрузочно-разгрузочной машины. В противном случае общее время местной работы станции увеличивается на 35 мин.

Сравнение графиков на рисунках 3 и 4 с графиками на рисунках 5 и 6 показывает разницу во времени: 1080 мин – 1045 мин = 35 мин.

При простое 35 вагонов в течение 35 мин каждый и при условии, что час простоя одного вагона оценивается в 75 000 сумов, общие экономические потери согласно расчетам составляют 1 530 375 сумов.

Список литературы

1. Правила перевозки грузов железнодорожным транспортом Республики Узбекистан. – Ташкент, 2020. – С. 86–125. – Текст : непосредственный.
2. Кобулов, Ж. Р. Отбор факторов методом экспертной оценки / Ж. Р. Кобулов, Э. С. Шерматов. – Текст : непосредственный // Научный журнал транспортных средств и дорог. – 2024. – № 3. – С. 8–15 (на узбекском языке).

3. Qobulov, J., Barotov, J., Shermatov, E., & Fayzullaev, G. (2023). Improvement of service technology on railway branch roads. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 402, p. 06008). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340206008>.

4. Смахов, А. А. Оптимизация многоэтапного процесса технического оснащения грузовых фронтов / А. А. Смахов / МИИТ. – Москва, 1974. – 39 с. – Текст : непосредственный.

5. Плескунов, М. А. Задачи сетевого планирования / М. А. Плескунов. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина, 2014. – 92 с. – Текст : непосредственный.

6. Сетевой график, пример построения // Энциклопедия Нестеровых : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://odiplom.ru/lab/setevoi-grafik.html> (дата обращения: 08.06.2025).

7. Исследование по установлению оптимального числа платформ в контейнерном поезде / Р. Ш. Бозоров, Ш. У. Саидивалиев, Э. С. Шерматов, Д. Ш. Бобоев. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2022. – № 5. – С. 24–28. – DOI 10.36535/0236-1914-2022-05-5. – EDN EPWPTO.

8. Saidivaliev, S. U., Shermatov, E. S., & Bozorov, R. S. (2021). A new method of calculating time and speed of a carriage during its movement on the section of the first brake position of a marshaling hump when exposed headwind. *StudNet*, 4(9). EDN RRGLHR.

9. Saidivaliev, S., Bozorov, R., & Shermatov, E. (2021, April). Kinematic characteristics of the car movement from the top to the calculation point of the marshaling hump. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 264, p. 05008). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126405008>.

References

1. Rules of cargo transportation by rail of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, 2020, pp. 86-125.

2. Kobulov J.R., Shermatov E.S. Selection of factors through the method of expert assessment. *Nauchnyi zhurnal transportnykh sredstv i dorog – The scientific journal of vehicles and roads*, 2024, no. 3, pp. 8-15. (In Uzbek).

3. Qobulov, J., Barotov, J., Shermatov, E., & Fayzullaev, G. (2023). Improvement of service technology on railway branch roads. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 402, p. 06008). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340206008>.

4. Smekhov A.A. *Optimizatsiia mnogoetapnogo protsessa tekhnicheskogo osnashcheniia gruzovykh frontov* [Optimization of the multi-stage process of technical equipment of cargo fronts]. Moscow, Moscow Institute of Transport Engineers Publ., 1974, 39 p. (In Russian).

5. Pleskunov M.A. *Zadachi setevogo planirovaniia* [Problems of network planning]. Yekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2021, 92 p. (In Russian).

6. *Setevoi grafik, primer postroeniia* [Network Graph, example of Construction]. Available at: <https://odiplom.ru/lab/setevoi-grafik.html> (accessed 08.06.2025).

7. Bozorov R.S., Saidivaliev S.U., Shermatov E.S., Boboyev D.S. Research to establish the optimal number of platforms in a container train. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik – Transport: science, equipment, management. Scientific information collection*, 2022, no. 5, pp. 24-28. DOI 10.36535/0236-1914-2022-05-5. EDN EPWPTO. (In Russian).

8. Saidivaliev, S. U., Shermatov, E. S., & Bozorov, R. S. (2021). A new method of calculating time and speed of a carriage during its movement on the section of the first brake position of a marshaling hump when exposed headwind. *StudNet*, 4(9). EDN RRGLHR.

9. Saidivaliev, S., Bozorov, R., & Shermatov, E. (2021, April). Kinematic characteristics of the car movement from the top to the calculation point of the marshaling hump. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 264, p. 05008). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126405008>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шерматов Элбек Сирожиддинович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирийулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Ассистент, преподаватель кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТУ.

Тел.: +998 (94) 602-77-89.

E-mail: sherelsir@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Shermatov Elbek Sirojiddinovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Assistant, lecturer of the Department of Transport and Cargo Systems, TSTU.

Phone: +998 (94) 602-77-89.

E-mail: sherelsir@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шерматов, Э. С. Оптимальная организация суточной работы станции на основе сетевого графика / Э. С. Шерматов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 66 – 80.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shermatov E.S. Optimal organization of the station's daily planning and graphic work based on network diagrams. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 66-80. (In Russian).

УДК 629.41

В. В. Витовская, О. В. Гателюк

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ, ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ПО ТИПАМ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

Аннотация. В современных условиях работы предприятий транспортной отрасли, где важным аспектом является энергоэффективная организация производственных процессов, важно учитывать характеристики этих процессов, влияющие на потребление энергоресурсов. Статья посвящена обоснованию необходимости учета характеристик различных типов грузовых поездов при организации системы управления расходом энергоресурсов на их тягу. В статье представлены результаты проверки однородности выборок данных о величине удельного расхода электроэнергии на тягу грузовых поездов различного типа по диапазонам величины средней осевой нагрузки вагона в составе на одном из участков работы локомотивных бригад ОАО «РЖД».

С помощью метода пошаговой регрессии с исключением переменных были разработаны регрессионные модели для различных типов грузовых поездов, описывающие потребление электроэнергии на тягу. Виды регрессионных уравнений для различных типов грузовых поездов различаются при сравнении их в одинаковых диапазонах величины средней осевой нагрузки. Это подчеркивает важность использования индивидуального подхода к каждому типу поезда при управлении расходом энергоресурсов. Оценка качества регрессионных моделей, созданных на основе данных о поездках каждого типа грузового поезда в отдельности и на основе обобщенных данных о поездках грузовых поездов, показала, что деление данных на кластеры по типам грузовых поездов повышает качество моделей прогнозирования величины удельного расхода на тягу поездов. Таким образом, результаты исследования могут быть использованы для повышения качества деятельности по управлению расходом энергоресурсов на тягу поездов.

Ключевые слова: энергоэффективность, расход электроэнергии на тягу поездов, однородность выборок, регрессионные модели.

Victoria V. Vitovskaya, Oleg V. Gatelyuk

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

ABOUT THE FORECASTING OF ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION FOR TRACTION OF TRAIN USING REGRESSION MODELS DIFFERENTIATED BY TYPES OF FREIGHT TRAINS

Abstract. In the current operational environment of the transportation sector, where energy-efficient organization of production processes plays a important role, it is essential to consider the characteristics of these processes that impact

energy resource consumption. This article argues for the necessity of accounting for the features of different types of freight trains when establishing a system to manage energy resource expenditure for their traction. The article presents the results of testing the homogeneity of data samples on the value of specific energy consumption for traction of freight trains of various types in ranges of the average axle load of a car in a train at one of the sections of operation of locomotive crews of JSC Russian Railways.

Using a stepwise regression method with variable exclusion, researchers developed regression models for different types of freight trains that describe their electricity consumption for traction. The forms of regression equations vary among different types of freight trains when compared within identical ranges of average axle load. This variation highlights the importance of a tailored approach to managing energy resource consumption for each train type.

The evaluation of the quality of regression models, created from data on individual train trips and generalized data on freight train journeys, demonstrated that clustering data by train type enhances the accuracy of models used to calculate specific energy consumption for traction. Consequently, the research findings can aid in optimizing energy resource management and improving overall efficiency in railway operations.

Keywords: energy efficiency, electricity consumption for train traction, homogeneity of samples, regression models.

Эффективность управления расходом топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) во многом зависит от степени достоверности знаний о характере связей между факторами, влияющими на процесс, и расходом ТЭР для его выполнения. Изучению характера влияния факторов на расход ТЭР на тягу поездов посвящен ряд зарубежных и отечественных исследований [1 – 4 и др.].

В настоящее время в ОАО «РЖД» существуют базы данных, в которых накоплена информация о параметрах уже совершенных поездок. Анализ накопленных данных позволяет выявить характер и степень влияния различных факторов на величину потребления ТЭР на тягу поездов. На основе результатов исследований характера и степени влияния факторов можно провести отбор значимо влияющих факторов в плане видов движения (пассажирское, грузовое, маневровое и др.), типов поездов в каждом виде движения и осуществить построение моделей прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов. В задачах прогнозирования расхода энергетических ресурсов [5 – 7] широко применяется метод регрессионного анализа. Такой метод позволяет установить количественные зависимости между потреблением энергоресурсов и влияющими факторами. Регрессионные модели, созданные на основе ретроспективных данных о поездках, могут быть использованы для повышения качества деятельности по управлению расходом ТЭР на тягу поездов.

Положение о планировании и нормировании расхода ТЭР на тягу в ОАО «РЖД» [8] обязывает для определения нормы расхода ТЭР на поездку для грузовых поездов использовать такие данные:

- расчетов расхода ТЭР, произведенных по Правилам тяговых расчетов [9];
- поездок тягово-энергетических лабораторий;
- опытных поездок машиниста-инструктора по теплотехнике с машинистами, имеющими наилучший результат использования ТЭР.

На практике, в эксплуатационном локомотивном депо, прогнозирование расхода ТЭР на поездку для грузовых поездов производится исходя из статистических данных о фактическом потреблении ТЭР на тягу для каждого диапазона величины осевой нагрузки (к примеру, к группе нормирования для поездов с осевой нагрузкой 16 т относятся поезда с осевой нагрузкой от 15,5 до 16,4 т включительно) без учета типа грузовых поездов. Однако в действительности величина расхода ТЭР может зависеть от типа грузового поезда, для которого выполняется прогнозирование.

Рассмотрим гистограммы распределения долей поездок грузовых поездов по различным их типам на участке одного из эксплуатационных локомотивных депо ОАО «РЖД» в обоих направлениях. Деление поездов на данные группы произведено в соответствии с действующими правилами нумерации поездов, утвержденными распоряжением ОАО «РЖД» от 05.04.2014 № 859р.

Наибольшее количество поездок грузовых поездов по участку в нечетном направлении совершается сквозными (СП), тяжеловесными (ТП) и контейнерными поездами (КП), в четном – сквозными и контейнерными.

Контейнерные поезда, выделяемые в отдельную группу при нумерации, отличаются от остальных групп грузовых поездов не только способом организации движения, но и типом используемых вагонов, особенностями размещения груза в контейнерах. Даже при условии, что средняя осевая нагрузка составов одинакова, распределение груза внутри вагонов может влиять на динамические характеристики поезда, что также отражается на величине расхода ТЭР.

В группу «сквозные поезда» объединяются грузовые поезда с вагонами типа полувагонов, крытых вагонов, платформ и т. д. по признаку прохождения поездов без переработки одной или нескольких участковых или сортировочных станций.

Тяжеловесные поезда выделяют по признаку высокого коэффициента использования грузоподъемности вагонов и объединяют поезда, масса которых для соответствующих серий локомотивов на 100 т и более превышает установленную графиком движения норму массы на участке следования этого поезда [10].

Для решения задачи по определению различий в характере и степени влияния внешних факторов на величину расхода ТЭР для разных типов грузовых поездов произведем анализ данных о поездках. Выборки данных о поездках разных типов грузовых поездов исследуем в сопоставимых условиях:

к исследованию принимаются данные о поездках разных типов грузовых поездов по одному участку за одинаковый период времени;

статистический анализ данных о поездках, подразумевающий проверку однородности выборок и линейный регрессионный анализ произведем в одинаковых диапазонах величины осевой нагрузки;

набор факторов, используемый для линейного регрессионного анализа, принимается одинаковым для разных типов грузовых поездов.

В статье к исследованию принимается участок, на основании данных о поездках на котором была построена гистограмма (рисунок 1). Для других участков имеются данные о поездках порожних составов, составов с наливными грузами в количестве, достаточном для исследования статистических закономерностей, однако результаты исследований данных о поездках на таких участках в данной статье не приводятся. Рассматриваться будут данные о поездках локомотивов серии 2ЭС6.

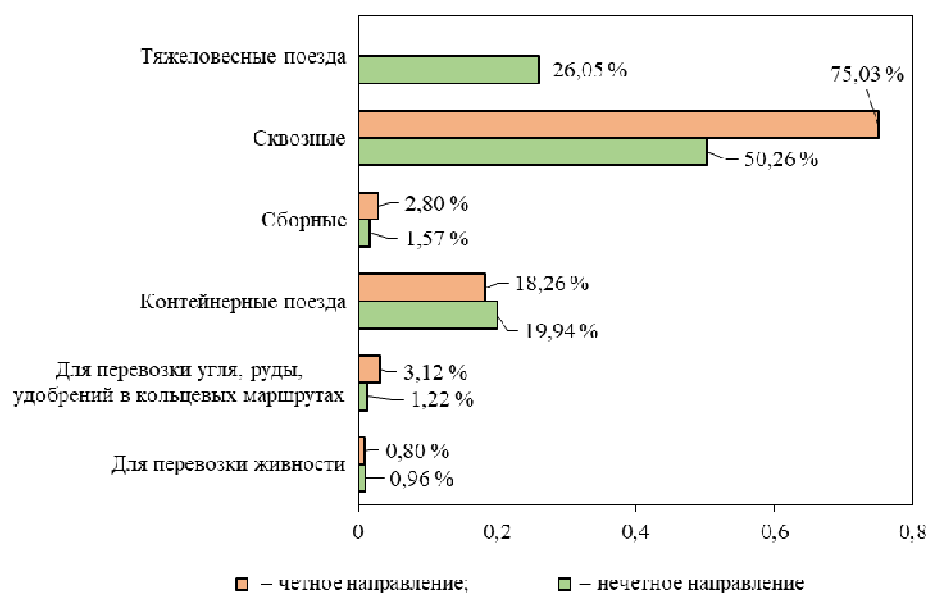


Рисунок 1 – Доли поездок грузовых поездов различных типов, работающих на участке

Теоретические знания о влиянии различных факторов на процесс потребления электроэнергии (ЭЭ) на тягу поездов и результаты проведенных корреляционных анализов позволили выделить перечень факторов, данные о которых были собраны и рассчитаны для каждой поездки с целью дальнейшего использования их при построении регрессионных моделей:

- участковая $V_{уч}$ и техническая $V_{тех}$ скорость, км/ч;
- коэффициент участковой скорости $k_{уч}$;
- средняя осевая нагрузка состава q , т;
- масса состава m_c , т;
- количество осей n_o , шт.;
- среднесуточная температура окружающего воздуха t , °С;
- среднесуточная скорость V_v ветра, м/с;
- количество встречных поездов n_v , шт.;
- количество осей встречных поездов $n_{ов}$, шт.

Данные о величине $V_{уч}$, $V_{тех}$, q , n_o , $k_{уч}$, m_c , n_v , $n_{ов}$ получены из системы централизованной обработки маршрута машиниста прямым или расчетным путем, а о величине t и V_v – из архивов данных метеостанций [11], расположенных вблизи станций прибытия и отправления поездов на исследуемом участке.

Для создания моделей прогнозирования, которые могли бы достоверно учесть влияние ветра и воздушных потоков от встречных поездов при условии, что скорость и направление движения поезда при следовании по участку изменяются, необходимо было бы располагать данными о мгновенных значениях скорости и направления движения поезда, скорости и направления ветра. Находясь в ситуации, когда из множества факторов, характеризующих воздействие ветровой нагрузки и воздушных потоков от встречных поездов достоверно известны лишь величины средних за поездку скоростей движения поездов, среднесуточных скоростей ветра, данные о количестве поездов, прошедших во встречном направлении за время движения поезда, и о количестве осей таких поездов, включение в модель прогнозирования $w_{уд}$ на тягу поездов этих факторов позволит учесть только общие условия поездки.

Важно отметить, что согласно действующей в ОАО «РЖД» Методике анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов, утвержденной приказом от 26.12.2014 № 512 (далее – Методика), и Положению [8] ветровая нагрузка не является расчетным фактором, а следовательно, не учитывается при анализе, планировании, нормировании и прогнозировании расхода ТЭР на тягу поездов. Однако далее в тексте статьи будут приведены результаты эмпирических тестов, свидетельствующие о повышении качества моделей прогнозирования $w_{уд}$ при учете ветровой нагрузки через значение среднесуточной скорости ветра V_v .

Рассмотрим гистограмму распределения количества поездок по величине осевой нагрузки q для СП, КП и ТП, которые осуществляли работу по участку в нечетном направлении в период с 01.09.2023 по 01.09.2024 (рисунок 2).

На рисунке 2 по оси абсцисс указываются значения границ интервалов группирования данных по величине q , по оси ординат – количество поездок, отнесенных к конкретному интервалу. По данным рисунка 2 видно, что величина q для сквозных поездов изменяется в диапазоне от 5 до 25 т, для контейнерных – от 9 до 23 т, для тяжеловесных – от 23 до 26 т. Средняя осевая нагрузка составов, работающих в четном направлении, изменяется для контейнерных поездов в диапазоне от 7 до 22 т, для сквозных – в диапазоне от 5 до 25 т.

Для выявления различий в характере потребления ЭЭ на тягу сквозными и тяжеловесными, сквозными и контейнерными поездами в одинаковых диапазонах величины q проведем проверку однородности выборок по величине удельного расхода ЭЭ $w_{уд}$. Сравнение выборок данных КП и ТП в сопоставимых условиях произвести невозможно по причине отсутствия пересекающихся диапазонов величины q . Выборки $w_{уд}$ СП и КП нечетного

направления сравним в диапазоне $q \in [12; 19]$ т, сквозных и тяжеловесных поездов в диапазоне $q \in [23; 25]$ т. Для четного направления анализ данных будет производиться для сквозных и контейнерных поездов в диапазоне $q \in [13; 19]$ т.



Рисунок 2 – Гистограмма распределения количества поездов СП, КП и ТП в нечетном направлении по величине осевой нагрузки

Выполним проверку соответствия распределения данных в выборках нормальному закону распределения, используя метод Лиллиефорса [12], который является вариантом классического критерия Колмогорова – Смирнова, модифицированного для проверки нормальности, когда параметры нормального распределения априори неизвестны. В качестве нулевой принимается гипотеза о подчинении данных в выборках нормальному закону распределения, в качестве альтернативной – о неподчинении. Уровень значимости α примем равным 0,05.

Результаты проверки выборок на нормальность сведены в таблицу 1 в виде значений статистики Лиллиефорса D и критических значений статистики $D_{\text{крит}}$. Гипотеза о нормальности распределения данных в выборках принимается в случае, если $D < D_{\text{крит}}$ на заданном уровне значимости α .

Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что условие $D < D_{\text{крит}}$ на уровне значимости 0,05 выполнялось для пяти выборок (значения D выделены полужирным шрифтом). Однако визуальный анализ гистограмм распределения значений q не подтвердил справедливости нулевой гипотезы для этих выборок.

Так как проверка на нормальность показала отсутствие подчинения данных в выборках нормальному закону распределения, то в дальнейшем для проверки однородности выборок $w_{\text{уд}}$ будем использовать непараметрические критерии. Нулевая гипотеза H_0 в задаче по проверке однородности выборок может быть сформулирована следующим образом: статистически значимых различий в величине $w_{\text{уд}}$ на тягу для грузовых поездов разного типа (контейнерных и сквозных, сквозных и тяжеловесных) при рассмотрении данных в одинаковых диапазонах величины осевой нагрузки q нет.

Проверку однородности выполним с использованием непараметрических критериев Вальда – Вольфовица [13] и Манна – Уитни [14]. Результаты исследования однородности выборок представлены в таблице 2 в виде значений Z -критерия Вальда – Вольфовица, U -критерия Манна – Уитни и уровней значимости рассчитанных критериев – p -уровней.

Однородными по результатам тестов Вальда – Вольфовица и Манна – Уитни согласно данным таблицы 2 оказались выборки $w_{\text{уд}}$ сквозных и контейнерных поездов только при величине q , равной 12, 15 и 17 т. В остальных случаях гипотеза H_0 была отвергнута.

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

Таблица 1 – Результаты проверки нормальности распределения данных в выборках $W_{уд}$

Тип поезда	Направление движения	q , т	Объем выборки N , шт.	D	$D_{крит}$
КП	Нечетное	12	99	0,117	0,090
		13	113	0,096	0,084
		14	157	0,085	0,071
		15	209	0,097	0,062
		16	227	0,129	0,059
		17	180	0,103	0,067
		18	169	0,075	0,069
		19	88	0,108	0,095
	Четное	13	94	0,089	0,092
		14	125	0,084	0,080
		15	120	0,066	0,082
		16	213	0,070	0,061
		17	188	0,138	0,065
		18	147	0,087	0,074
		19	138	0,089	0,076
СП	Нечетное	12	175	0,059	0,068
		13	237	0,078	0,058
		14	256	0,095	0,056
		15	275	0,065	0,054
		16	255	0,075	0,056
		17	312	0,060	0,051
		18	310	0,082	0,051
		19	257	0,067	0,056
		23	237	0,089	0,058
	Четное	24	419	0,048	0,044
		13	214	0,068	0,061
		14	225	0,058	0,060
		15	343	0,071	0,048
		16	359	0,046	0,047
		17	385	0,059	0,046
		18	356	0,083	0,047
ТП	Нечетное	19	494	0,081	0,040
		23	627	0,074	0,036
		24	1338	0,053	0,024

Таблица 2 – Значения p -уровня для критериев проверки однородности

Сравниваемые виды грузовых поездов	Направление движения	q , т	Z-критерий	p -уровень Z- критерия	U-критерий	p -уровень U-критерия
СП–КП	Нечетное	12	0,005	0,995	–0,322	0,747
		13	3,119	0,002	–1,451	0,147
		14	2,314	0,021	–0,749	0,454
		15	1,974	0,051	1,369	0,171
		16	2,899	0,004	0,737	0,461
		17	0,953	0,340	0,777	0,437
		18	1,127	0,259	–2,148	0,032
		19	0,796	0,426	4,192	< 0,001
	Четное	13	3,652	0,003	4,586	< 0,001
		14	0,374	0,708	5,254	< 0,001
		15	0,465	0,641	2,949	0,003
		16	0,436	0,663	4,700	< 0,001
		17	0,867	0,386	2,955	0,003
		18	2,005	0,045	6,744	< 0,001
		19	3,412	0,001	7,204	< 0,001
СП–ТП	Нечетное	23	4,119	< 0,001	–11,713	< 0,001
		24	5,958	< 0,001	13,730	< 0,001

Используя метод пошаговой регрессии с исключением переменных, построим регрессионные уравнения, состав которых позволит оценить влияние значимых факторов на величину $w_{уд}$ для разных типов грузовых поездов. Регрессионный анализ будет производиться в разрезе величин осевых нагрузок. В таблице 3 в качестве примера приведены полученные регрессионные уравнения (РУ) для сквозных и контейнерных грузовых поездов нечетного направления.

Таблица 3 – Примеры построенных регрессионных уравнений

Величина осевой нагрузки q , т	Тип грузовых поездов	Вид регрессионного уравнения для расчета величины $w_{уд}$
12	КП	$w_{уд} = 85,823 - 0,072n_o - 0,443t + 2,514V_B$
13		$w_{уд} = 86,534 - 0,064n_o - 0,475t$
14		$w_{уд} = 78,571 - 0,051n_o - 0,413t + 1,631V_B$
15		$w_{уд} = 83,739 - 0,174V_{уч} - 0,054n_o - 0,341t + 1,021V_B$
16		$w_{уд} = 78,198 - 0,149V_{уч} - 0,003m_c - 0,358t + 1,684V_B$
17		$w_{уд} = 84,932 - 0,265V_{уч} - 0,049n_o - 0,373t$
18		$w_{уд} = 76,417 - 0,132V_{тех} - 0,059n_o - 0,341t + 1,144V_B$
19		$w_{уд} = 66,816 - 0,003m_c - 0,356t + 1,731V_B$
12	СП	$w_{уд} = 65,945 - 0,363t + 2,452V_B$
13		$w_{уд} = 96,965 - 0,171V_{тех} - 11,811k_{уч} - 0,004m_c - 0,393t + 2,008V_B$
14		$w_{уд} = 94,926 - 0,164V_{тех} - 13,098k_{уч} - 0,046n_o - 0,364t + 1,437V_B$
15		$w_{уд} = 82,545 - 0,190V_{уч} - 0,003m_c - 0,333t + 1,230V_B$
16		$w_{уд} = 89,573 - 0,154V_{тех} - 14,038k_{уч} - 0,047n_o - 0,321t + 1,664V_B$
17		$w_{уд} = 89,648 - 0,159V_{тех} - 9,379k_{уч} - 0,066n_o - 0,288t + 1,131V_B$
18		$w_{уд} = 82,251 - 0,148V_{тех} - 9,799k_{уч} - 0,003m_c - 0,256t + 1,084V_B$
19		$w_{уд} = 85,305 - 0,207V_{тех} - 8,119k_{уч} - 0,054n_o - 0,242t + 0,841V_B$

Анализ уравнений из таблицы 3 показывает, что для разных типов грузовых поездов итоговый вид регрессионных уравнений по расчету величины $w_{уд}$ различается: уравнения содержат разные наборы переменных, обуславливающих величину $w_{уд}$.

Проверим качество прогноза величины $w_{уд}$ на тягу поездов регрессионными моделями (таблица 4).

Таблица 4 – Значения показателей для оценки качества регрессионных уравнений

Направление движения	Осевая нагрузка, т	δ_d , %	δру моделей на основе данных о поездках СП, %		δру моделей на основе данных о поездках СП и КП в совокупности, %	
			при учете V_B	без учета V_B	при учете V_B	без учета V_B
Нечетное	12	14,90	7,16	7,03	6,93	7,67
	13	11,70	7,09	8,67	7,39	8,83
	14	9,65	6,42	6,94	7,66	7,97
	15	15,21	6,24	6,63	6,34	6,66
	16	13,75	6,58	7,31	7,00	7,78
	17	9,24	7,76	7,85	8,03	8,11
	18	10,48	6,34	6,69	6,50	6,82
Четное	19	8,80	7,00	7,22	7,16	7,49
	13	11,27	–	6,75	7,38	7,66
	14	9,28	5,73	6,11	6,14	6,66
	15	10,08	–	6,22	5,95	6,07
	16	9,36	6,75	7,10	7,43	7,68
	17	8,52	–	5,58	6,10	6,13
	18	6,63	6,31	6,67	6,66	7,09
	19	6,40	6,07	6,35	6,20	6,38

В таблице 4 приведены значения средних по тестовым выборкам (составляют 20 % от генеральных выборок и не используются при создании моделей) относительных отклонений прогнозных значений $w_{уд}$ для сквозных поездов, полученных с использованием регрессионных моделей, от фактических – $\delta_{ру}$ и прогнозных значений $w_{уд}$, рассчитанных в локомотивном депо с использованием Методики, от фактических – δ_d . Величины $\delta_{ру}$ приводятся для моделей, созданных на основе данных о поездках только СП и на основе данных о поездках СП и КП в совокупности, кроме того, рассмотрение ведется как для моделей, в состав которых изначально включались данные о среднесуточной скорости ветра V_v , так и для тех, в которые эти данные не включались.

Так как для создания моделей использовался метод пошаговой регрессии с исключением переменных, то в некоторых случаях данные о величине $\delta_{ру}$ при изначальном включении в модель фактора V_v отсутствуют по причине того, что фактор не был расценен в результате регрессионного анализа как значимый и не вошел в состав итогового регрессионного уравнения. Наименьшие величины средних по выборкам ошибок прогноза в таблице 4 для наглядности выделены полужирным шрифтом.

По данным таблицы 4 видно, что наименьшие величины средневыворочных относительных ошибок прогноза характерны в основном для моделей, созданных на основе данных о поездках исключительно сквозных поездов, учитывающих фактор V_v . Величины δ_d во всех рассматриваемых в таблице 4 случаях превышают значение $\delta_{ру}$. Использование при создании регрессионных моделей данных о поездках нескольких типов поездов в большинстве случаев увеличивает $\delta_{ру}$, а исключение из моделей фактора V_v во всех случаях, где данный фактор регрессионным анализом определен как значимый, увеличивает $\delta_{ру}$. Аналогичные результаты были получены и для других типов грузовых поездов.

Для рассмотрения результатов прогноза $w_{уд}$ на тягу поездов моделями, качество которых по показателю $\delta_{ру}$ было в основном выше (модели на основе данных о поездках каждого типа грузового поезда по отдельности, учитывающие V_v) по отдельным поездкам, построим график сходимости прогнозных значений $w_{уд}$ регрессионных моделей и фактических значений $w_{уд}$, а также прогнозных значений, полученных с использованием Методики, с фактическими (рисунок 3). Ограничимся данными о прогнозных и фактических значениях $w_{уд}$ для 100 поездок с целью упрощения визуального восприятия графика. Данные отобраны случайным образом из тестовых выборок о поездках сквозных поездов нечетного направления. Для упрощения анализа графика на рисунке 3 значения удельного расхода $w_{уд}$ отсортированы в порядке возрастания. Визуальный анализ графика сходимости (см. рисунок 3) позволяет сделать вывод о более высоком качестве прогноза при использовании созданных в ходе исследования регрессионных моделей по сравнению с качеством прогноза, сделанного с использованием Методики.



Рисунок 3 – График сходимости прогнозных и фактических значений $w_{уд}$

Таким образом, проведенные исследования показали, что выборки данных о величине $w_{уд}$ на тягу грузовых поездов разного типа являются неоднородными при рассмотрении их в одинаковых диапазонах величины средней осевой нагрузки вагона q . Для выявления причин неоднородности выборок был проведен пошаговый регрессионный анализ с исключением переменных. Исследование показало, что для разных типов грузовых поездов итоговый вид регрессионных уравнений по расчету величины $w_{уд}$ различается: уравнения содержат разные наборы переменных.

Результаты анализа качества прогноза демонстрируют преимущество моделей, построенных на основе данных о поездках каждого типа грузового поезда в отдельности, над моделями на основе обобщенных данных. В то же время качество прогноза по показателю средней по выборке относительной ошибки прогноза каждой из созданных регрессионных моделей выше, чем при использовании метода, регламентируемого действующей в локомотивном депо Методикой. Учет в моделях фактора среднесуточной скорости ветра V_v позволил дополнительно повысить точность прогноза.

Список литературы

1. Fischer, S. (2015). Traction energy consumption of electric locomotives and electric multiple units at speed restrictions. *Acta Technica Jaurinensis*, 8(3), 240-256. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v8.n3.384>.
2. Siroki J., Nachtigall P., Tischer E., Schejbal K., Michalek T. The modelling of traction energy consumption of a container train, *Transportation Research Procedia*, 2024, vol. 77, pp. 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.01.010>.
3. Попов, К. М. Учет фактора температуры атмосферного воздуха при определении нормативного расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов / К. М. Попов. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77. – № 6. – С. 375–381. – DOI 10.21780/2223-9731-2018-77-6-375-381. – EDN YQNWXZ.
4. Гребнев, И. А. К оценке влияния ветровой нагрузки на грузовой поезд / И. А. Гребнев, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 13–22. – EDN CGNNYZ.
5. Alfares, H. K., & Nazeeruddin, M. (2002). Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. *International journal of systems science*, 33(1), 23-34. <https://doi.org/10.1080/00207720110067421>.
6. Сидорова, Е. А. Применение регрессионных моделей для прогнозирования удельного расхода электроэнергии на тягу поездов / Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов, С. О. Подгорная. – Текст : непосредственный // Новая наука: Стратегии и векторы развития. – 2016. – № 5-2 (82). – С. 233–239. – EDN VXNEZD.
7. Френкель, С. Я. Многофакторная модель расхода энергоресурсов в пассажирском движении / С. Я. Френкель, А. П. Дединкин, Р. К. Гизатуллин. – Текст : непосредственный // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2011. – № 1 (22). – С. 103–106. – EDN LQCCPY.
8. Положение о планировании и нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в ОАО «РЖД» : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 17.05.2019 № 962/р. – Москва : УралЮрИздат, 2023. – 32 с. – Текст : непосредственный.
9. Правила тяговых расчетов для поездной работы: нормативное производственно-практическое издание: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р / Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». – Москва : ОАО «РЖД», 2021. – 515 с. – Текст : непосредственный.
10. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утверждены приказом Минтранса от 23.06.2022 г. № 250. – Москва : Инфра-М, 2023. – 519 с. – Текст : непосредственный.
11. Расписание погоды // rp5.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 01.05.2025).

12. Lilliefors, H. W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American statistical Association*, 62(318), 399-402. <https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482916>.

13. Wald, A., & Wolfowitz, J. (1940). On a test whether two samples are from the same population. *The Annals of Mathematical Statistics*, 11(2), 147-162. <http://www.jstor.org/stable/2235872>.

14. Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The annals of mathematical statistics*, 50-60. <https://www.jstor.org/stable/2236101>.

References

1. Fischer, S. (2015). Traction energy consumption of electric locomotives and electric multiple units at speed restrictions. *Acta Technica Jaurinensis*, 8(3), 240-256. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v8.n3.384>.

2. Siroki J., Nachtigall P., Tischer E., Schejbal K., Michalek T. The modelling of traction energy consumption of a container train, *Transportation Research Procedia*, 2024, vol. 77, pp. 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.01.010>.

3. Popov K.M. Consideration of the temperature factor of atmospheric air when determining standard consumption of fuel and energy resources for train traction. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2018, vol. 77, no. 6, pp. 375-381. DOI 10.21780/2223-9731-2018-77-6-375-381. EDN YQNWXX. (In Russian).

4. Grebnev I.A., Pudovikov O.E. On the estimation of the influence of wind load on a freight train. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4(52), pp. 13-22. EDN CGNNYZ. (In Russian).

5. Alfares, H. K., & Nazeeruddin, M. (2002). Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. *International journal of systems science*, 33(1), 23-34. <https://doi.org/10.1080/00207720110067421>.

6. Sidorova E.A., Davydov A.I., Podgornaya S.O. Application of regression models for forecasting specific energy consumption for train traction. *Novaia nauka: strategii i vektory razvitiia – New science: strategies and development vectors*, 2016, no. 5-2(82), pp. 233-239. EDN VXNEZD. (In Russian).

7. Frenkel S.J., Dedinkin A.P., Gizatullin R.K. Multifactor model energy consumption in passenger traffic. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport – Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*, 2011, no 1(22). pp. 103-106. EDN LQCCPY. (In Russian).

8. Regulation on the planning and standardization of fuel and energy resource consumption for train traction at JSC Russian Railways: approved by the order of JSC Russian Railways dated 17.05.2019 №. 962/r. Moscow, UralYurlzdat, 2023. 32 p. (In Russian).

9. Rules for traction calculations for train operation: normative production and practical publication: approved by the order of JSC Russian Railways dated 12.05.2016 № 867r. Moscow, JSC Russian Railways, 2021. 515 p. (In Russian).

10. Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation: approved by the order of the Ministry of Transport dated 23.06.2022 № 250. Moscow, Infra-M, 2023. 519 p. (In Russian).

11. *Raspisanie pogody* [Weather Schedule]. Available at: <https://rp5.ru/> (accessed: 01.05.2025).

12. Lilliefors, H. W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American statistical Association*, 62(318), 399-402. <https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482916>.

13. Wald, A., & Wolfowitz, J. (1940). On a test whether two samples are from the same population. *The Annals of Mathematical Statistics*, 11(2), 147-162. <http://www.jstor.org/stable/2235872>.

14. Mann H., Whitney D. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other // *Annals of Mathematical Statistics*, 1947. vol. 18, no. 1, pp. 50-60. <https://www.jstor.org/stable/2236101>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Витовская Виктория Витальевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОМГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирантка кафедры «Теоретическая электротехника», ОМГУПС.

Тел.: +7 (923) 768-17-02.

E-mail: vitovskaya.99@mail.ru

Гателюк Олег Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОМГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика», ОМГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: oleg.gatelyuk.61@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Витовская, В. В. О прогнозировании расхода электроэнергии на тягу поездов с использованием регрессионных моделей, дифференцированных по типам грузовых поездов / В. В. Витовская, О. В. Гателюк. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 80 – 90.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vitovskaya Victoria Vitalievna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Theoretical Electrical Engineering», OSTU.

Phone: +7 (923) 768-17-02.

E-mail: vitovskaya.99@mail.ru

Gatelyuk Oleg Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, docent, associate professor of the department «Higher Mathematics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: oleg.gatelyuk.61@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Vitovskaya V.V., Gatelyuk O.V. About the forecasting of electrical energy consumption for traction of train using regression models differentiated by types of freight trains. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 80-90. (In Russian).

УДК 66.042

А. М. Парамонов

Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИИ ПЕЧНОЙ УСТАНОВКИ С КАМЕРНЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА

Аннотация. Рассматривается актуальность оптимизации тепловой работы и конструкции печных установок с камерным высокотемпературным режимом тепловой обработки металла. Предложена методика их комплексной оптимизации. Комплексная оптимизация печной установки заключается во взаимосвязанной и комплексной оценке влияния каждого элемента ее функциональной схемы на тепловую работу установки. Функциональная схема печной установки включает в себя систему топливоподачи и топливоприготовления, оборудование системы воздухообеспечения с рекуператором для подогрева воздуха, идущего на горение топлива, систему удаления в окружающую среду уходящих из рабочего пространства установки продуктов сгорания топлива с оборудованием для утилизации их низкопотенциальной теплоты. Данная методика комплексной оптимизации печной установки позволяет определять значения оптимальных параметров тепловой работы и конструкции печных установок на основе системного анализа и системного подхода. Данная методика обеспечивает установление оптимального соотношения между расходом топлива, потерями на окисление металла, совокупными затратами на качество тепловой обработки металла, достижение оптимальных пропорций в распределении капиталовложений между отдельными узлами и элементами печной установки, т. е. тем самым достигается оптимизация внутренней структуры печной установки. Предложены функциональная схема печной установки и мнемосхема ее комплексной оптимизации при решении задачи целесообразного ее проектирования.

Ключевые слова: оптимизация, печная установка, металл, системный анализ и системный подход.

Alexander M. Paramonov

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THERMAL OPERATION AND DESIGN OF A FURNACE INSTALLATION WITH A CHAMBER TEMPERATURE REGIME FOR METAL HEAT TREATMENT

Abstract. *The relevance of optimization of thermal operation and design of furnace plants with a chamber high-temperature metal heat treatment regime is considered. The methodology of their comprehensive optimization is given. The complex optimization of the furnace unit is part of an interrelated and complex evaluation of the influence of each element of its functional scheme on the thermal performance of the plant. The functional scheme of the kiln installation includes the fuel supply and heating system, the equipment of the air supply system with a recuperator for heating the air going to burn the fuel, the system of disposal in the environment of the leaving from the working space. The development of fuel combustion products with equipment for their low-temperature recycling. The method of complex optimization of furnace installation allows to determine the values of optimal parameters of thermal operation and design of furnace installations on the basis of system analysis and system approach. The method ensures the establishment of an optimal relationship between fuel consumption, metal oxidation losses, total costs for heat treatment quality of the metal, achievement of optimum proportions in the distribution of investments between individual units and elements of the furnace plant. This optimizes the internal structure of the furnace system. A functional scheme of the furnace installation and a schematic for its complex optimization when solving the problem of its feasible design are proposed.*

Keywords: *optimization, furnace installation, metal, system analysis and system approach.*

Высокотемпературная тепловая обработка металла печных установок с камерным температурным режимом тепловой обработки металла достаточно широко используется на промышленных предприятиях для снижения энергетических и финансовых затрат перед обработкой металла давлением горизонтальными ковочными машинами и кузнечными молотами. Большое применение печных установок с камерным температурным режимом тепловой обработки объясняется тем, что они позволяют обеспечить заданную технологией подготовку металла для изготовления любых изделий способомковки и горячей штамповки. Однако эксплуатируемые в настоящее время указанные печные установки морально устарели по техническим и экономическим причинам. Указанные установки характеризуются низкими технико-экономическими показателями их тепловой работы [1, 2], которые значительно ниже технико-экономических показателей эксплуатируемых печных установок в индустриально развитых странах Европы, Америки и Азии. Это объясняется недостаточным уровнем использования (регенерации) теплоты уходящих из рабочего пространства печных установок с камерным температурным режимом тепловой обработки металла продуктов сгорания топлива, несовершенством конструкции их футеровки, морально устаревшими тепловыми схемами. В связи с этим актуальной является задача повышения технико-экономической эффективности тепловой работы нагревательных печных установок с камерным температурным режимом тепловой обработки металла. Это можно выполнить путем снижения удельного расхода топлива, интенсификации процесса теплообмена в их рабочем пространстве, совершенствования тепловых ограждений рабочего пространства нагревательных печей, уменьшения капитальных вложений и эксплуатационных расходов, снижения негативного экологического воздействия вредных выбросов на окружающую среду.

Данная проблема повышения технико-экономических показателей тепловой работы печных установок с камерным высокотемпературным режимом тепловой обработки металла должна решаться путем использования математических методов оптимизации, позволяющих при наименьших затратах финансовых средств и трудоемкости находить экстремальные решения поставленных задач [3 – 5]. Особенностью и преимуществом использования математических методов оптимизации тепловой работы и конструкции печных установок является то, что они проектируются в основном конструкторскими бюро и изготавливаются механическими цехами промышленных предприятий, на которых они в последующем эксплуатируются.

Задачу улучшения тепловой работы печных установок рекомендуется решать путем математической оптимизации принципиальной тепловой схемы печной установки, определения наиболее выгодных (оптимальных) параметров и режимов ее тепловой работы и рациональной конструкции печной установки и ее составляющих элементов.

Целесообразно решать поставленную задачу оптимизации тепловой работы и конструкции печной установки в первую очередь с определения оптимальных параметров тепловой работы рабочего пространства нагревательной печи как основного элемента установки. Это обосновывается тем, что высокотемпературная тепловая обработка металла перед его пластической деформацией кузнечно-прессовым оборудованием должна обеспечить снижение энергетических затрат на ковку и штамповку, заданную производственной технологией, качество и стоимость продукции промышленного предприятия.

Поставленную задачу оптимизации тепловой работы печной установки необходимо решать поэтапно. Прежде необходимо сформулировать постановку задачи оптимизации тепловой работы печной установки и цель ее оптимизации. Необходимо учитывать возможность определения и выбора оптимальных значений параметров печной установки и их количественной оценки с учетом различных допущений и ограничений. При этом рекомендуется также учитывать условия работы печной установки в общем производственном технологическом процессе кузнечного цеха для определения ее взаимодействия с другими производственными объектами и оборудованием. Необходимо убедиться в наличии свободных варьируемых параметров тепловой работы оптимизируемой печной установки, ее рабочего пространства, которые давали бы возможность изменить режимы ее тепловой работы, конструкцию, не нарушая при этом заданной производственной технологией требований.

При решении задачи оптимизации тепловой работы печной установки с камерным температурным режимом тепловой обработки металла необходимо по возможности учитывать все совокупные факторы и взаимосвязи. При этом нужно выполнить анализ влияния внешних и внутренних факторов (условий), учитывая инженерную специфику решения поставленной задачи оптимизации печной установки. Внешние факторы определяются экономическими, производственными и цеховыми условиями, которые относятся к задаваемым факторам. Внутренние факторы характеризуются технологическими, режимными и цеховыми условиями, они являются оптимизируемыми параметрами. Необходимо учесть возможность перевода параметров тепловой работы рабочего пространства нагревательной печи, имеющих дискретный характер изменения, в класс непрерывных параметров.

При решении задачи оптимизации печной установки в процессе разработки и апробации математической модели тепловой работы ее рабочего пространства как основного элемента печной установки необходим учет определенных допущений и ограничений на температурные режимы тепловой обработки металла исходя из обеспечения качества и минимальной стоимости производимой промышленным предприятием продукции. Одним из основных методических положений при решении задачи оптимизации тепловой работы и конструкции печной установки является выбор сопоставимых условий ее оптимизации. Эти условия задаются и определяются характерными особенностями поставленной задачи и должны обеспечить необходимую производительность печной установки, выходные параметры и заданное качество металла, подвергаемого тепловой обработке, допустимый перепад температур по его сечению, надежность работы печной установки.

Выбор наиболее выгодного (оптимального) варианта из сравниваемых в процессе оптимизации печной установки осуществляется при условии достижения максимальной технико-экономической эффективности тепловой работы. Расчет данной эффективности производится с использованием существующего положения методики определения экономической эффективности капитальных вложений. Оптимальный вариант должен характеризоваться минимальными совокупными затратами (3), которые включают в себя капитальные вложения и эксплуатационные расходы [6]:

$$Z = C + P_n \cdot K, \quad (1)$$

где C – изменяющиеся и эксплуатационные расходы, руб./год;

P_n – норма дисконта инвестиций, 1/год;

K – единовременные капитальные вложения руб./год.

Решение задачи оптимизации параметров тепловой работы и конструкции печной установки с камерным температурным режимом тепловой обработки металла нужно производить на основе системного анализа и системного подхода. Рассматриваемую печную установку можно отнести к сложным системам вследствие наличия большого числа элементов. Между элементами печной установки имеют место сложные взаимосвязи и взаимозависимости, сложное организованное управление их тепловой работой, учет вредного экологического влияния на окружающую среду и неопределенных факторов. Цель такого подхода к решению поставленной задачи оптимизации печной установки заключается в построении обобщенной математической модели ее тепловой работы. Обобщенная математическая модель тепловой работы рассматриваемой системы должна учитывать существующие факторы и взаимосвязи возникающих реальных ситуаций, которые могут возникнуть в процессе решения задачи оптимизации печной установки. Использование системного подхода и системного анализа позволяет создать адекватную математическую модель тепловой работы рассматриваемой печной установки. На основе такой математической модели выбирается необходимое количество управляющей информации и оцениваются технико-экономические показатели тепловой работы печной установки.

Решение задачи оптимизации тепловой работы рассматриваемой печной установки рекомендуется выполнять, используя ее принципиальную (функциональную) схему, представленную на рисунке 1.

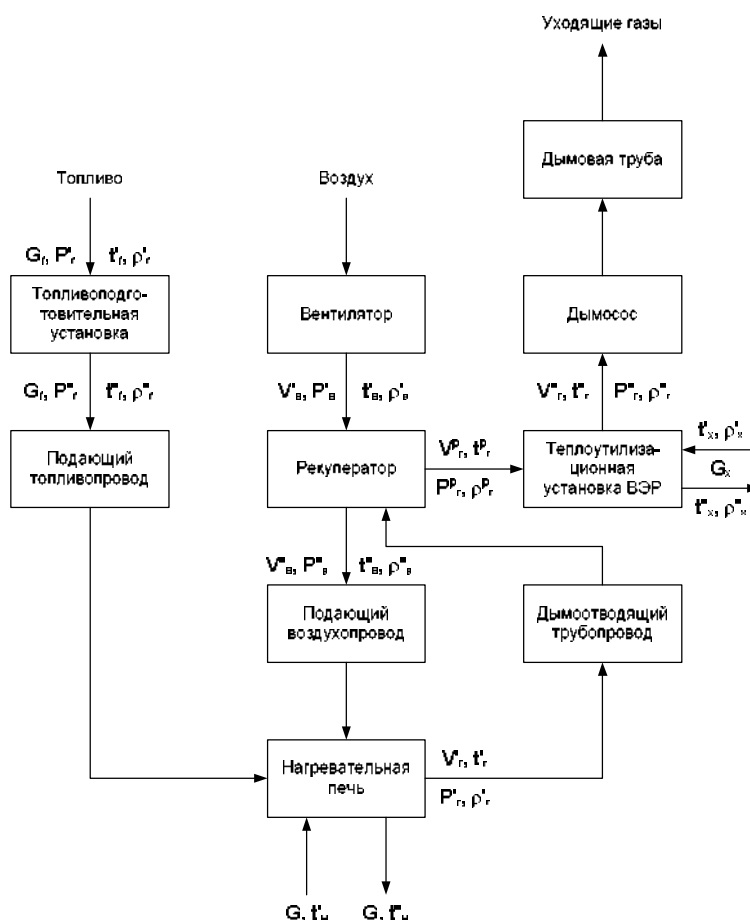


Рисунок 1 – Функциональная схема печной установки

На рисунке 1 приняты следующие обозначения параметров величин: G , t_m ; G_f , P_f , t_f , ρ_f , V_v , P_v , t_v , ρ_v ; V_g , t_g ; P_g ; ρ_g^p , V_g^p , t_g^p , P_g^p , ρ_g^p ; t_x , ρ_x , G_x – соответственно производительность нагревательной печи, температура металла; массовый расход, давление, температура, плотность топлива; объемный расход, температура, давление, плотность воздуха; объемный расход, температура, давление, плотность продуктов сгорания топлива, уходящих из рабочего пространства нагревателя печи; температура, плотность, массовый расход холодного теплоносителя перед и после теплоутилизационной установки вторичных энергетических ресурсов (ВЭР).

Анализ способов и методов повышения технико-экономической эффективности тепловой работы печных установок показывает целесообразность при решении задачи их оптимизации более полного учета сложных взаимосвязей и взаимозависимостей их элементов, параметров и факторов. Это может быть достигнуто при комплексной оптимизации печной установки.

Целью комплексной оптимизации печной установки является решение задачи ее оптимального проектирования. Комплексная оптимизация печной установки заключается во взаимосвязанной и комплексной оценке влияния каждого элемента ее функциональной схемы на тепловую работу установки. Функциональная схема печной установки включает в себя систему топливоподачи и топливоприготовления, оборудование системы воздухообеспечения с рекуператором для подогрева воздуха, идущего на горение топлива, систему удаления в окружающей среде дымовых газов с оборудованием для утилизации их низко-потенциальной теплоты. Задача комплексной оптимизации печной установки решается поэтапно. На первых этапах оптимизируются тепловая работа отдельных ее элементов с целью получения оптимальных выходных параметров, т. е. решаются задачи частной оптимизации. На последнем этапе, увязывая полученные математические решения в единую систему уравнений, получают окончательное решение для печной установки в целом. При комплексной оптимизации одновременно решаются задачи оптимизации теплового режима печи, определения оптимальных конструктивных параметров ее рабочего пространства и футеровки, степени рекуперации теплоты высокотемпературных уходящих газов в рекуператоре нагревательной печи и степени использования низкопотенциальной их теплоты после рекуператора в печной установке, температуры подогрева мазута в топливоподготовительной установке (рисунок 2), обеспечивающих достижение наилучших показателей работы (термический КПД, степень рекуперации теплоты уходящих газов, удельный расход топлива и др.) при минимальных затратах.

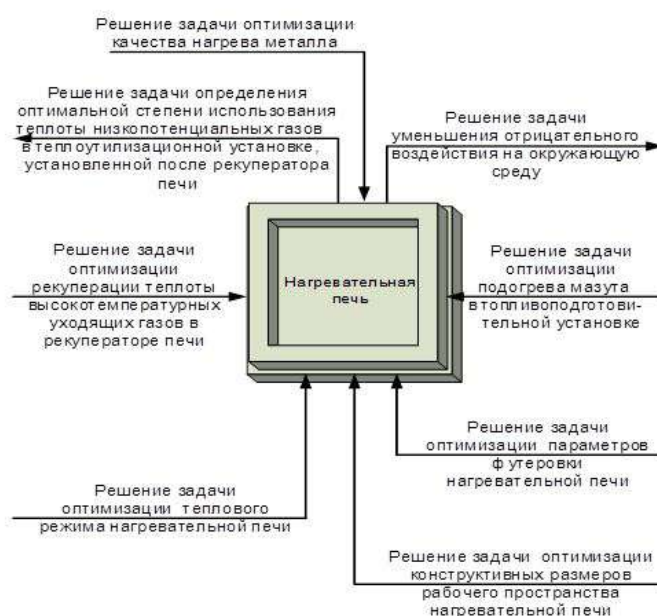


Рисунок 2 – Мнемосхема комплексной оптимизации печной установки при решении задачи оптимального ее проектирования

Основным методом достижения этого является построение математических моделей, отражающих физическую картину тепловых процессов, происходящих в печной установке, комплексно увязывающих теплотехнические и экономические факторы: внешний и внутренний теплообмен в рабочем пространстве печи, рациональное использование топлива и теплоты отходящих газов, капитальные вложения и эксплуатационные расходы с учетом изменения условий эксплуатации печной установки.

Для получения приемлемой схемы работы нагревательной печи надо объективно оценить ее наивыгоднейшую температуру, необходимую для обеспечения технологии нагрева металла и производительности печи, и выбрать конструктивное оформление, которое потребует наименьших совокупных затрат. Температура уходящих газов на выходе из рабочего пространства нагревательной печи (t_r) оказывает влияние на температуру печи и на продолжительность нагрева металла. Повышение t_r приводит к увеличению производительности нагревательной печи, но при этом возрастают потери теплоты с уходящими газами, что влияет на экономичность работы нагревательной печи. Однако в связи с широким внедрением рекуператоров для подогрева воздуха и газа представляется возможным и целесообразным иметь более высокую температуру уходящих газов. Одновременно при этом целесообразно получить максимально возможную и оправданную степень рекуперации их теплоты (p). Если производительность нагревательной печи задана, то интенсификация теплообмена приведет к сокращению размеров печи.

Следовательно, температура уходящих газов на выходе из рабочего пространства нагревательной печи и степень рекуперации их теплоты в значительной степени определяют затраты на печь (Z_n), рекуператор (Z_p), расходы на топливо и на тягодутьевые устройства. Математически это можно записать так:

$$Z_n = \varphi(t_r, p); Z_p = \varphi(p). \quad (2)$$

Таким образом, правильный выбор температуры уходящих газов на выходе из рабочего пространства нагревательной печи и степени рекуперации их теплоты дает значительный эффект.

Значение оптимальной степени рекуперации теплоты для конкретного значения уходящих газов можно определить, исходя из минимума совокупных затрат на рекуператор и топливо при приравнении к нулю частных производных этой функции по оптимизируемому параметру [3].

Более полное решение задачи оптимизации печных установок достигается лишь в том случае, когда каждому значению оптимальной температуры уходящих газов на выходе из рабочего пространства нагревательной печи $t_{r, \text{опт}}$ соответствует оптимальная степень рекуперации их теплоты $P_{\text{опт}}$. Это обеспечивается решением системы уравнений [7], полученных исходя из необходимых условий оптимальности:

$$\begin{cases} \frac{\partial Z_n}{\partial t_r} = C_m \frac{\partial H_p}{\partial t_r} + C_p \frac{\partial H_p}{\partial t_r} + C_n \frac{\partial V_n}{\partial t_r} = 0; \\ \frac{\partial Z_p}{\partial p} = C_m \frac{\partial V}{\partial p} + C_p \frac{\partial H_p}{\partial p} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Вначале из второго уравнения системы (3) определяется оптимальная степень рекуперации теплоты уходящих газов $P_{\text{опт}}$ для любого возможного их значения на выходе из рабочего пространства нагревательной печи. Затем, подставляя для конкретного значения t_r найденное значение $P_{\text{опт}}$ из первого уравнения системы (3), определяют оптимальную температуру уходящих газов $t_{r, \text{опт}}$. При этом решении устанавливаются рациональный расход топлива и целесообразные расходы на рекуператор, наивыгоднейшие размеры рабочего

пространства нагревательной печи, обеспечивается достижение наилучших показателей ее работы.

Разработанная математическая модель нагрева металла включает в себя уравнения теплообмена, баланса теплоты, температурное поле теплового ограждения и граничные условия для обогреваемых поверхностей металла и теплового ограждения. Объем рабочего пространства нагревательной печи (V_n), поверхность нагрева рекуператора (H_p), расход топлива (B) были выражены в виде функций от t_r : $V_n = \varphi(t_r)$; $H_p = \varphi(t_r)$; $B = \varphi(t_r)$. При этом учитывались особенности организации режима радиационного теплообмена в рабочем пространстве печи; взаимосвязанность процессов теплообмена между газами, металлом и футеровкой; влияние на нагрев металла расположения заготовок на поду нагревательной печи. Адекватность математических моделей и полученных зависимостей оценивалась путем сравнения значений параметров, полученных при использовании различных методов расчета. Принимая во внимание то, что точность решения задачи определяется сравнительной погрешностью, адекватность моделей и зависимостей принята удовлетворительной. При выводе расчетных формул приняты следующие допущения: производительность нагревательной печи задана и постоянна; нагрев металла ведется при постоянной температуре печи; рассматриваются нагревательные печи, в которых преобладает передача тепла излучением.

В настоящее время актуальным является повышение температуры подогрева мазута в топливоподготовительной установке перед его сжиганием в нагревательных печах. Высокая температура подогрева мазута обеспечивает более глубокое диспергирование его форсунками, оказывает качественное влияние на интенсификацию топочного процесса непосредственно активизацией испарения мазута и улучшением распыления. Основным преимуществом подогрева мазута до более высокой температуры является снижение коэффициента избытка воздуха, подаваемого на его горение, химического и механического недожога, потерь теплоты с уходящими газами, вредных выбросов в атмосферу. При этом уменьшаются удельный расход мазута на нагрев металла, затраты на подачу воздуха для горения топлива и на выброс дымовых газов за пределы печного агрегата, но увеличиваются расход тепловой энергии на подогрев мазута и затраты на мазутоподогреватель. Таким образом, решение вопроса об оптимальной температуре подогрева мазута представляет собой технико-экономическую задачу. Особую актуальность оптимизация подогрева мазута приобретает в связи с использованием более тяжелых его марок, получаемых в результате углубленной переработки нефти на нефтеперерабатывающих предприятиях.

Задача оптимизации подогрева мазута заключается в выборе такой его температуры, которая бы обеспечивала минимум критерия оптимальности Z_f :

$$Z_f(B, Q_{TЭ}, K) = \min, \quad (4)$$

где B , $Q_{TЭ}$, K – расходы мазута на нагрев металла в нагревательной печи, тепловой энергии на подогрев мазута, капитальные вложения в мазутоподогреватель. В качестве критерия оптимальности Z_f приняты дисконтированные затраты на нагрев металла.

Получена зависимость $Z_f(B, Q_{TЭ}, K)$ [8] для решения задачи (4) на основе разработанной математической модели процессов теплообмена и баланса теплоты в нагревательной печи и мазутоподогревателе.

Расчетное уравнение для определения оптимальной температуры подогрева мазута $t_f''_{\text{опт}}$ получено на основе представления расхода мазута на нагрев металла, поверхности нагрева мазутоподогревателя, расхода воздуха и теплоэнергии в виде функций от t_f'' :

Приравняв к нулю частные производные по температуре подогрева мазута t_f'' функции (4) [3], имеем:

$$\frac{\partial Z_f}{\partial t_f} = C_m \frac{\partial B}{\partial t_f} + C_m \frac{\partial F_m}{\partial t_f} + C'_B \frac{\partial V_B}{\partial t_f} + 3,6 C_{TЭ} \frac{\partial Q_{TЭ}}{\partial t_f} = 0; \quad (5)$$

$$C_m = P_m (P_n + \Pi); \quad (6)$$

$$C'_B = N_{т.д} [C_{т.д} (P_n + \Pi) + C_3 h], \quad (7)$$

где F_m , P_m – поверхность нагрева мазутоподогревателя и стоимость ее 1 м²; $N_{т.д}$ – мощность тягодутьевых машин, приходящаяся на 1 м³ дутьевого воздуха; V_B – расход дутьевого воздуха; $C_{TЭ}$ – годовая стоимость теплоэнергии; C'_B – годовая стоимость дутьевого воздуха.

Разработан алгоритм расчета $t_{f, \text{опт}}$. Оптимальная температура подогрева мазута определяется исходя из типа применяемых форсунок и параметров греющего теплоносителя. Проведенные исследования влияния определяющих факторов на оптимальную температуру подогрева мазута показали следующее. Изменение количества теплоэнергии, идущей на подогрев мазута, мощности тягодутьевых машин, производительности печных установок не оказывает заметного влияния на величину оптимальной температуры подогрева мазута, вследствие чего упрощается процесс ее определения и выбора при решении практических задач. Снижение температуры дымовых газов t_g , уходящих из нагревательной печи, повышение температуры воздуха, идущего на горение мазута, уменьшает до 32 % $t_{f, \text{опт}}$. Увеличение времени работы нагревательной печи, снижение затрат на мазутоподогреватель повышает до 26 % $t_{f, \text{опт}}$.

Футеровка нагревательных печей является важным элементом их конструкции: она в значительной степени определяет срок службы, энергопотребление и стоимость печной установки. Потери теплоты через футеровку и, как следствие, расход топлива на покрытие этих потерь значительны. При увеличении толщины футеровки потери теплоты теплопроводностью снижаются, но возрастают тепловые потери на аккумуляцию, капитальные затраты и эксплуатационные расходы. Поэтому актуальным является решение задачи оптимизации футеровки нагревательной печи с учетом ее теплотехнических, эксплуатационных и стоимостных характеристик. Оптимизация футеровки печи предполагает варьирование применяемыми огнеупорными и теплоизоляционными материалами, толщиной внутреннего огнеупорного слоя и тепловой изоляции. Все перечисленные параметры – факторы оптимизации.

Решена задача оптимизации многослойной футеровки нагревательной печи [9] при комплексной и наиболее полной «увязке» трехмерного теплового потока в окружающую среду через стены, под и свод с их конструкцией.

Задачей оптимизации футеровки нагревательной печи является определение оптимальной ее толщины, обеспечивающей минимум потерь топлива, затрат на изготовление и эксплуатацию; определение и выбор оптимальной последовательности расположения и толщины отдельных слоев из огнеупорных и теплоизоляционных материалов.

Рассматриваются нагревательные печи, температурное поле футеровки которых стационарно и пространственно неоднородно. Футеровка представляет собой многослойную стенку, состоящую из слоев различной толщины, выполненной из материалов с отличающимися физико-техническими свойствами.

В качестве критерия оптимальности принята оценка эффективности сравниваемых вариантов по минимуму совокупных затрат:

$$Z_\phi = \frac{C_m}{Q_n^p} (3,6 Q_m h + Q_a N) + (\Pi + P_n) K, \quad (8)$$

где C_m, Q_n^p – стоимость и низшая теплота сгорания топлива;

Q_m, Q_a – потери теплоты теплопроводностью через футеровку в окружающую среду и на аккумуляцию;

N – количество пусков печи в работу из холодного состояния в течение года;

K – стоимость сооружения футеровки нагревательной печи;

h – время работы нагревательной печи.

Уравнение для определения оптимальной толщины футеровки печи $\delta_{\text{опт}}$ получено на основе представления Q_m, Q_a и K как функции:

$$Q_m = \varphi(\delta); Q_a = \varphi(\delta); K = \varphi(\delta). \quad (9)$$

Определение Q_m произведено с использованием уравнения для расхода теплоты через n -слойную стенку с учетом граничных условий первого и третьего рода. При этом тепловой поток для каждого из слоев футеровки Q_i , толщина i -го слоя δ_i и общая толщина футеровки δ_Σ были представлены как функции от толщины первого огнеупорного слоя δ_1 . Поверхность F_i и объем V_i футеровки были выражены как функции от толщины каждого ее слоя δ_i .

Разработан алгоритм определения оптимальной толщины футеровки нагревательной печи при оптимальной последовательности расположения слоев из огнеупорных и теплоизоляционных материалов. Алгоритм дает возможность оценить различные сочетания параметров многослойной футеровки и оптимизировать ее при заданных ограничениях.

При оптимизационном расчете футеровки нагревательной печи исходными величинами являются расположение футеровки и ее элементов в пространстве, толщина огнеупорного слоя, тип и марка огнеупорных и теплоизоляционных материалов и их теплофизические характеристики, температура в рабочем пространстве нагревательной печи, наружных стенок футеровки и окружающего воздуха.

При решении задачи выбираются материалы слоев многослойной футеровки, определяется их толщина, производится расчет значения температуры на границе слоев и дается оценка выбираемого материала исходя из условий обеспечения надежности его работы. Выбор огнеупорных и теплоизоляционных материалов, последовательности расположения и толщины слоев футеровки производится до тех пор, пока значения заданной и полученной температуры наружной ее поверхности не совпадут с определенной степенью точности.

Алгоритм программы основан на переборе всех возможных комбинаций изменяемых параметров и выборе той из них, при которой минимизируемая функция затрат принимает свое наименьшее значение.

Проведенные исследования влияния изменения исходных данных на величину $\delta_{\text{опт}}$ показали следующее. Изменение стоимости топлива и габаритных размеров рабочего пространства нагревательной печи не оказывает заметного влияния на $\delta_{\text{опт}}$ и количество слоев футеровки. При значении температуры в рабочем пространстве печи $t_{\text{эф}}$ до 1100 °С оптимальное количество огнеупорных и теплоизоляционных слоев футеровки стен и пода нагревательной печи составляет 3, свода – 2. При значении $t_{\text{эф}}$ более 1100 °С оптимальное количество слоев футеровки стен и пода печи составляет 4 – 5, свода – 3. При сжигании топлива с $Q_n^p > 20000$ кДж/кг оптимальная толщина футеровки стен и пода увеличивается до 9 %, а свода – уменьшается до 19 % по сравнению с использованием топлива с Q_n^p меньше 20000 кДж/кг. Повышение температуры в рабочем пространстве нагревательной печи и толщины первого огнеупорного слоя увеличивает $\delta_{\text{опт}}$ до 23 %. С увеличением времени работы печи h $\delta_{\text{опт}}$ увеличивается до определенного значения, а затем остается величиной постоянной. При количестве пусков печи N из холодного состояния от 50 до 200 раз в год значения $\delta_{\text{опт}}$ изменяются незначительно, а при N от 0 до 50 и от 200 до 250 раз в год – снижаются значительно (до 25 %).

Основа высокого энергосберегающего эффекта в печах закладывается в первую очередь разработкой рациональных схем и элементов их оформления. Повышение эффективности использования топлива в печах может быть достигнуто уменьшением тепловых отходов, их рекуперацией (внутреннее использование теплоты). При ограниченных возможностях рекуперации теплоты отходящих газов целесообразно внешнее ее использование в энергетических или технологических целях. При реализации этого пути отходящие газы после рекуператора нагревательной печи понимаются как вторичные энергетические ресурсы. Они, как правило, являются низкопотенциальными. В связи с этим возникает необходимость выбора способа утилизации этой теплоты, конструкции теплоутилизационной установки. Использование теплоты низкопотенциальных газов связано со снижением температурного напора и, как следствие, с ростом поверхности теплообмена теплоутилизационных установок, затрат на их сооружение и эксплуатацию. В этих условиях закономерен вопрос, до какого уровня эффективно утилизировать теплоту отходящих газов.

Решена задача оптимизации использования теплоты низкопотенциальных газов. В качестве критерия оценки оптимальной степени использования теплоты уходящих газов после рекуператора нагревательной печи принята разность переменной части затрат на теплоутилизационную установку и стоимости сэкономленного топлива Z_y , которая может быть получена на замещающей теплоэнергетической установке:

$$Z_y = (\Pi + P_n) P_{\text{под}} F_{\text{под}} - P_{\text{т. зам}} h_{\text{зам}} V_{\text{зам}}, \quad (10)$$

где Π , P_n – нормы амортизационных отчислений и дисконта инвестиций, 1/год; $P_{\text{под}}$, $F_{\text{под}}$ – поверхность нагрева и стоимость 1 м² теплоутилизационной установки; $V_{\text{зам}}$ – расход топлива на производство теплоэнергии в замещающей теплоэнергетической установке, равный той доле теплоты, которая реализуется за счет утилизации теплоты уходящих газов после рекуператора печи; $P_{\text{т. зам}}$, $h_{\text{зам}}$ – стоимость топлива, расходуемого в замещающей теплоэнергетической установке, и годовое время ее работы.

Выбор теплоэнергетической установки, которая может выступать в качестве замещающей, зависит от условий предприятия. В каждом конкретном случае нужно учитывать, с помощью какого другого наиболее экономичного источника может быть получено аналогичное количество тепловой энергии.

Определение $F_{\text{под}}$, $V_{\text{зам}}$ произведено на основе разработанных математических моделей теплообмена и баланса теплоты для теплоутилизационной и замещающей теплоэнергетической установок. Выражая $F_{\text{под}}$, $V_{\text{зам}}$ как функции от температуры уходящих газов на выходе из теплоутилизационной установки $t_{г.у}$ и используя метод поиска оптимума путем решения нелинейных уравнений, полученных приравниванием к нулю частных производных функции по оптимизируемому параметру [3], получили уравнение для определения оптимальной $t_{г.у}$ ($t_{г.у \text{ опт}}$):

$$\frac{\partial (\Delta Z_y)}{\partial t_{г.у}} = (\Pi + P_n) P_{\text{под}} \frac{\partial F_{\text{под}}}{\partial t_{г.у}} - P_{\text{т. зам}} h_{\text{зам}} \frac{\partial V_{\text{зам}}}{\partial t_{г.у}} = 0. \quad (11)$$

Разработаны алгоритм и программа расчета $t_{г.у \text{ опт}}$. Проведенные исследования влияния изменения определяющих факторов на величину $t_{г.у \text{ опт}}$ показали следующее. С увеличением стоимости топлива, используемого в замещающей теплоэнергетической установке, годового времени ее работы, температуры уходящих газов перед теплоутилизационной установкой, коэффициента теплопередачи в ней $t_{г.у \text{ опт}}$ снижается. С увеличением затрат на теплоутилизационную установку, температуры нагреваемого теплоносителя на выходе из теплоутилизационной установки, нормы амортизационных отчислений, нормы дисконта инвестиций $t_{г.у \text{ опт}}$ увеличивается.

Задача комплексной оптимизации печных агрегатов и определения оптимальных режимных и конструктивных параметров сводится к решению системы из пяти ранее полученных уравнений (3), (5), (8), (11):

$$\begin{cases} \frac{\partial Z_n}{\partial t_r} = C_m \frac{\partial B}{\partial t_r} + C_p \frac{\partial H_p}{\partial t_r} + C_n \frac{\partial V_n}{\partial t_r} = 0; \\ \frac{\partial Z_p}{\partial p} = C_m \frac{\partial B}{\partial p} + C_p \frac{\partial H_p}{\partial p} = 0; \\ \frac{\partial Z_f}{\partial t_f} = C_m \frac{\partial B}{\partial t_f} + C'_m \frac{\partial F_m}{\partial t_f} + C'_b \frac{\partial V_b}{\partial t_f} + 3,6 C_{m,3} \frac{\partial Q_{т.э}}{\partial t_f} = 0; \\ Z_\phi = \phi(B, Q, t_r) \Rightarrow \min; \\ \frac{\partial (\Delta Z_y)}{\partial t_{г.у}} = (П + P_n) P_{под} \frac{\partial F_{под}}{\partial t_{г.у}} - P_{т. зам} h_{зам} \frac{\partial B_{зам}}{\partial t_{г.у}} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Разработаны алгоритм и программа расчета оптимальных параметров. Последовательность расчета следующая. Вводятся исходные данные, при этом задается базисная величина t_r . Решается второе уравнение системы (12) и определяются $P_{опт}$, $t_{в'' опт}$, $t_{г''}$. Затем из первого уравнения системы (12) определяется $t_{г опт}$. Далее решается третье уравнение системы (12) с подстановкой полученных при решении первых двух уравнений системы (12) значений $t_{г опт}$, $t_{в'' опт}$ и определяется оптимальная температура подогрева мазута $t_{г'' опт}$. Решается четвертое уравнение системы (12) с использованием полученных при решении первых трех уравнений системы (12) значений $t_{г.опт}$, $t_{в'' опт}$, $t_{г'' опт}$ и определяются оптимальные конструктивные параметры футеровки печи (количество огнеупорных и теплоизоляционных слоев, толщина и материал каждого слоя, общая толщина футеровки стен, пода и свода), затраты на ее сооружение. Затем решается первое уравнение системы (12) с подстановкой полученных при решении второго по четвертое уравнений системы (12) оптимальных значений $P_{опт}$, $t_{г'' опт}$, конструктивных параметров футеровки печи и с корректировкой соответствующих им величин в первом уравнении системы (12) (с учетом первоначально заданной конструкции печи), определяются новые оптимальные значения $t_{г опт}$, $P_{опт}$. Их значения сравниваются с полученными ранее. При расхождении данных значений свыше заданной погрешности необходимо заново решить первые четыре уравнения системы (12), задаваясь t_r , равной расчетному значению $t_{г опт}$, до получения допустимой погрешности результата решения. Затем решается пятое уравнение системы (12) с использованием полученного значения температуры уходящих газов после рекуператора $t_{г''}$ и определяется оптимальная температура уходящих газов на выходе из теплоутилизационной установки, находящейся за рекуператором печи.

Разработаны алгоритм и программа расчета оптимальных параметров. Последовательность расчета следующая. Вводятся исходные данные, при этом задается базисная величина t_r . Решается второе уравнение системы (12) и определяются $P_{опт}$, $t_{в'' опт}$, $t_{г''}$. Затем из первого уравнения системы (12) определяется $t_{г опт}$. Далее решается третье уравнение системы (12) с подстановкой полученных при решении первых двух уравнений системы (12) значений $t_{г опт}$, $t_{в'' опт}$ и определяется оптимальная температура подогрева мазута $t_{г'' опт}$. Решается четвертое уравнение системы (12) с использованием полученных при решении первых трех уравнений системы (12) значений $t_{г.опт}$, $t_{в'' опт}$, $t_{г'' опт}$ и определяются оптимальные конструктивные параметры футеровки печи (количество огнеупорных и теплоизоляционных слоев, толщина и материал каждого слоя, общая толщина футеровки стен, пода и свода), затраты на ее сооружение. Затем решается первое уравнение системы (12) с подстановкой полученных при решении второго по четвертое уравнений системы (12) оптимальных значений $P_{опт}$, $t_{г'' опт}$, конструктивных параметров футеровки печи и с корректировкой соответствующих им величин в первом уравнении системы (12) (с учетом первоначально заданной конструкции печи), определяются новые оптимальные значения $t_{г опт}$, $P_{опт}$. Их значения сравниваются с ранее полученными. При расхождении данных значений свыше заданной погрешности необходимо заново решить первые четыре уравнения системы (12), задаваясь t_r , равной расчетному значению $t_{г опт}$, до получения допустимой погрешности результата решения. Затем решается пятое уравнение системы (12) с использованием полученного значения температуры

уходящих газов после рекуператора $t_{r}^{//}$ и определяется оптимальная температура уходящих газов на выходе из теплоутилизационной установки, находящейся за рекуператором печи.

При использовании в нагревательной печи газообразного топлива из указанной системы уравнений исключается третье уравнение, позволяющее определить оптимальную температуру подогрева мазута.

В результате выполнения комплексной оптимизации печного агрегата определяются оптимальные значения всех основных параметров. Это обеспечивает установление оптимального соотношения между расходом топлива, потерями на окисление металла, совокупными затратами на обеспечение качества его нагрева, а также достижения оптимальных пропорций в распределении капиталовложений между отдельными узлами и элементами агрегата, т. е. тем самым достигается оптимизация внутренней структуры печного агрегата с одновременным улучшением воздействия на окружающую среду.

Список литературы

1. Пути энергосбережения в промышленных печах / В. И. Губинский, Р. Г. Хейфец, М. В. Губинский, Ю. А. Мартыненко. – Текст : непосредственный // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 5 (239). – С. 101–103.
2. Бирюков, А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах : монография / А. Б. Бирюков. – Донецк : Ноулидж, 2012. – 250 с. – Текст : непосредственный.
3. Аргучинцев, А. В. Введение в оптимизацию / А. В. Аргучинцев, А. И. Беников : Университетский учебник. Оптимизация, исследование операций и управление ; Иркутск : Иркутский государственный университет, 2011. – Выпуск 3. – 105 с. – Текст : непосредственный. – EDN QJYZQT.
4. Каныгин, Г. И. Численные методы безусловной оптимизации / Г. И. Каныгин, О. В. Колесникова. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 148 с. – Текст : непосредственный. – EDN TCWVSI.
5. Егоров, И. Н. О выборе начального приближения при численном решении задач параметрической оптимизации / И. Н. Егоров, Г. В. Кретинин, А. Г. Кретинин. – Текст : непосредственный // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. – 2023. – № 1 (65). – С. 28–39. – DOI 10.21685/2072-3040-2023-1-3. – EDN DYVWBQ.
6. Зайцев, Н. Л. Экономика организации / Н. Л. Зайцев. – Москва : Экзамен, 2006. – 607 с. – Текст : непосредственный. – EDN QRDOIV.
7. Парамонов, А. М. Определение оптимальной степени рекуперации теплоты дымовых газов / А. М. Парамонов, В. В. Крайнов. – Текст : непосредственный // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2006. – № 4. – С. 26–30.
8. Парамонов, А. М. Повышение эффективности сжигания мазута в нагревательных печах кузнечного и термического производства / А. М. Парамонов. – Текст : непосредственный // *Омский научный вестник*. – 2018. – № 1 (157). – С. 28–31. – DOI 10.25206/1813-8225-2018-157-28-31. – EDN YSCCWS.
9. Парамонов, А. М. Энергосбережение путем оптимизации многослойной футеровки нагревательных печей кузнечных и термических цехов / А. М. Парамонов. – Текст : непосредственный // *Промышленная энергетика*. – 2015. – № 12. – С. 18–22. – EDN VBDXXD.
10. Парамонов, А. М. Экономически целесообразный уровень использования низкопотенциальной теплоты уходящих газов после нагревательных печей / А. М. Парамонов, В. В. Крайнов. – Текст : непосредственный // *Промышленная энергетика*. – 2005. – № 3. – С. 41–43. – EDN HRXNTP.

References

1. Gubinsky V.I., Kheifets R.G., Gubinsky M.V., Martynenko Yu.A. Ways of energy saving in industrial furnaces. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, 2006, no. 5(239), pp. 101–103. (In Russian).

2. Biryukov A.B. *Energoeffektivnost' i kachestvo teplovoi obrabotki materialov v pechakh : monografiia* [Energy efficiency and quality of heat treatment of materials in furnaces : a monograph]. Donetsk, Knowlidge Publ., 2012, 250 p. (In Russian).
3. Arguchintsev A.V., Benikov A.I. *Vvedenie v optimizatsiiu* [Introduction to optimization]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2011, 105 p. EDN QJYZQT. (In Russian).
4. Kanygin G.I., Kolesnikova O.V. *Chislennyye metody bezuslovnoi optimizatsii* [Numerical methods of unconditional optimization]. Vologda, Infra-Engineering Publ., 2024, 148 p. EDN TCWVSI. (In Russian).
5. Egorov I.N., Kretinin G.V., Kretinin A.G. On the choice of the initial approximation in the numerical solution of parametric optimization problems. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Fiziko-matematicheskie nauki – University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences*, 2023, no. 1(65), pp. 28-39. DOI 10.21685/2072-3040-2023-1-3. EDN DYVWBQ. (In Russian).
6. Zaitsev N.L. *Ekonomika organizatsii* [Economics of organization]. Moscow, Exam Publ., 2006, 607 p. EDN QRDOIV. (In Russian).
7. Paramonov A.M., Krainov V.V. Determination of the optimal degree of heat recovery of flue gases. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem – Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2006, no. 4, pp. 26-30. (In Russian).
8. Paramonov A.M. Improving the efficiency of fuel oil combustion in heating furnaces of forging and thermal production. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 1(157), pp. 28-31. DOI 10.25206/1813-8225-2018-157-28-31. EDN YSCCWS. (In Russian).
9. Paramonov A.M. Energy saving by optimizing the multilayer lining of heating furnaces of forging and thermal workshops. *Promyshlennaya energetika – Industrial power engineering*, 2015, no. 12, pp. 18-22. EDN VBDXXD. (In Russian).
10. Paramonov A.M., Krainov V.V. Economic expedient level for utilization of low-grade heat of exhaust gas of heating furnace. *Promyshlennaya energetika – Industrial power engineering*, 2005, no. 3, pp. 41-43. EDN HRXNTP. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Парамонов Александр Михайлович

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГТУ.

Тел.: +7 (913) 975-55-86.

E-mail: amparamonov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Парамонов, А. М. Оптимизация параметров тепловой работы и конструкции печной установки с камерным температурным режимом тепловой обработки металла / А. М. Парамонов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 90 – 102.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Paramonov Alexander Mikhailovich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644050, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, docent, professor of the department «Thermal Power Engineering», OmSTU.

Phone: +7 (913) 975-55-86.

E-mail: amparamonov@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Paramonov A.M. Optimization of the parameters of thermal operation and design of a furnace installation with a chamber temperature regime for metal heat treatment. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 90-102. (In Russian).

Т. В. Мятаж, Ю. А. Секретарев, С. С. Донченко, В. А. Капустин, П. Е. Сурков

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), г. Новосибирск, Российская Федерация

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТОИМОСТИ ГИДРОРЕСУРСА

Аннотация. В статье представлена разработанная методика оптимизации режимов работы водохозяйственного комплекса, учитывающая влияние природного аккумулятора гидроресурса – Каменской поймы. Основу исследования составляет оценка синергетической стоимости гидроресурса как интегрального показателя надежности, экологичности и социально-экономической эффективности. Целью работы является создание методологии, согласующей интересы энергетики, судоходства и экологии для повышения энергоэффективности водохозяйственных систем. Для достижения поставленной цели использованы методы водно-энергетического анализа, расчет гарантированной мощности ГЭС, блок оптимизации режимов работы гидроэлектростанции, а также применение теории предельной полезности и критерия максимизации прибыли ($MR = MC$). Методология основана на сочетании оптимизационных подходов и экономических принципов, позволяющих учитывать конфликт интересов между различными участниками водохозяйственной деятельности. Научная новизна заключается в предложении уникальных методик, не имеющих мировых аналогов: расчета гарантированной мощности, определения предельных издержек воды и использования кривых безразличия для балансировки интересов водопользователей. Разработанный подход позволяет обосновать тарифы на электроэнергию при заданном объеме выработки, а также решить обратную задачу – определить оптимальный уровень производства мощности при заданном тарифе. Результаты исследования применимы в управлении водохозяйственными системами, особенно в условиях стохастичности источников энергии, таких как гидроэнергетика. Предложенная методика может быть использована для повышения энергоэффективности, обеспечения экологической устойчивости и соблюдения неэнергетических требований при эксплуатации гидротехнических сооружений. Полученные данные подтверждены на примере Новосибирской ГЭС. Выводы демонстрируют высокую практическую значимость предложенных методик, их применимость в реальных условиях функционирования сложных водохозяйственных комплексов и потенциал для внедрения в стратегии устойчивого развития водного сектора.

Ключевые слова: ГЭС, синергетическая стоимость гидроресурса, оптимизация функционирования ГЭС, неэнергетические требования, предельная полезность, водохозяйственный комплекс, цена воды для гидроэлектростанций.

Tatiana V. Myatezh, Uriy A. Sekretarev, Semyon S. Donchenko, Vladimir A. Kapustin,
Pavel E. Surkov

Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, the Russian Federation

OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF THE WATER MANAGEMENT COMPLEX BASED ON DETERMINING THE SYNERGETIC COST OF THE WATER RESOURCE

Abstract. The article develops a methodology for optimizing the operating regimes of a water management system, taking into account the influence of the natural reservoir of water resources – the Kamenskaya floodplain. The foundation of the research is the assessment of the synergistic cost of water resources as an integrated indicator of reliability, environmental friendliness, and socio-economic efficiency. The aim of the work is to create a methodology that reconciles the interests of the power industry, navigation, and ecology to enhance the energy efficiency of water management systems. To achieve this goal, methods of water-energy nexus analysis, calculation of hydropower plant (HPP) firm power, an optimization block for HPP operating regimes, as well as the application of marginal utility theory and the profit maximization criterion ($MR = MC$) were used. The methodology is based on a combination of optimization approaches and economic principles, enabling the consideration of conflicting interests among various stakeholders in water management activities. The scientific novelty lies in the proposal of unique techniques with no global equivalents: calculation of firm power, determination of marginal water costs, and the use of indifference curves for balancing the interests of water users. The developed approach allows for the justification of electricity tariffs for a given generation output, as well as solving the inverse problem – determining the optimal power production level for a given tariff. The research results are applicable to the management of water management systems, especially under conditions of

stochastic energy sources, such as hydropower. The proposed methodology can be used to improve energy efficiency, ensure environmental sustainability, and comply with non-power requirements during the operation of hydraulic structures. The obtained data were validated using the case study of the Novosibirsk HPP. The conclusions demonstrate the high practical significance of the proposed techniques, their applicability in the real-world operation of complex water management systems, and their potential for integration into sustainable water sector development strategies.

Keywords: *hydroelectric power station, synergetic cost of hydro resources, optimization of the functioning of hydroelectric power plants, marginal utility, water management complex, price of water for hydroelectric power plants.*

Современные водохозяйственные комплексы представляют собой сложные системы, объединяющие задачи рационального использования водных ресурсов, энергетики, экологии и социально-экономического развития. Водное хозяйство включает в себя комплекс мероприятий по планированию, распределению и контролю за использованием воды в различных отраслях, таких как сельское хозяйство, промышленность, энергетика и коммунальное водоснабжение. Важнейшими целями исследования являются обеспечение населения и производств водой, поддержание ее качества, предотвращение загрязнения и истощения водных ресурсов, а также минимизация негативного воздействия на окружающую среду [1].

Особую роль в водохозяйственных системах играют гидроэлектростанции, которые не только вырабатывают электроэнергию, но и регулируют сток рек, предотвращая наводнения и обеспечивая водоснабжение в маловодные периоды. Однако управление водными ресурсами осложняется конфликтом интересов различных водопользователей. Например, гидроэнергетика заинтересована в накоплении воды в водохранилищах в навигационный период для последующей выработки электроэнергии, в то время как судоходство и рыбное хозяйство требуют поддержания стабильного уровня воды.

В настоящее время в России наблюдаются серьезные проблемы, связанные с нерациональным использованием водных ресурсов и ошибками в управлении водохозяйственными комплексами [2]. Это приводит к экономическим потерям, социальным проблемам и ухудшению экологической обстановки. Для решения этих задач необходимо разрабатывать новые методы оптимизации режимов работы водохозяйственных систем, учитывающие интересы всех водопользователей и экологические требования.

Важным аспектом является определение синергетической стоимости гидроресурсов, которая отражает их комплексную ценность для энергетики, экономики и экологии. Такой подход позволяет оптимизировать режимы наполнения и сработки водохранилищ, повышая эффективность работы ГЭС без ущерба для других отраслей. Особое значение имеет учет естественных аккумуляторов воды, таких как речные поймы, которые могут накапливать воду в период половодья и отдавать ее в маловодные периоды, увеличивая приток к ГЭС и повышая их выработку.

В данной статье рассматриваются методы оптимизации работы водохозяйственных комплексов на основе определения синергетической стоимости гидроресурсов. Предлагаемый подход позволяет согласовать интересы различных водопользователей, повысить эффективность использования водных ресурсов и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования управления водохозяйственными системами и разработки стратегий устойчивого развития водного сектора.

Анализ современных исследований и патентный поиск показывают, что в настоящее время для оптимизации режимов работы ГЭС в составе водохозяйственного комплекса преимущественно применяется методика сведения водного баланса. Однако, как свидетельствует изучение зарубежного опыта эксплуатации гидроэлектростанций, нигде не используется подход к определению режимов сработки-наполнения водохранилища на основе водно-энергетического расчета с учетом гарантированных мощностей. Между тем именно использование показателей гарантированной мощности позволяет осуществлять комплексную оптимизацию не только работы ГЭС в составе смешанной энергосистемы, но и всего водохозяйственного комплекса (ВХК) с учетом интересов и ограничений всех участников [3, 4].

В существующих методиках отсутствует единый подход к определению синергетической стоимости гидроресурса [2]. Как показывает анализ, в большинстве случаев вместо экономической оценки стоимости воды применяется система водного налога, причем зарубежные ставки существенно превышают российские показатели. В предлагаемом подходе авторы, используя гарантированные мощности для определения доли участия ГЭС в покрытии суточного графика нагрузки, предлагают производить оптимизацию режимов работы на основе расчета стоимости гидроресурса с учетом специфики функционирования ГЭС [5].

Особое значение в разрабатываемой методике придается замене традиционных показателей их денежными эквивалентами – предельными издержками по воде и топливу, что позволяет более адекватно отражать физическую и экономическую сущность оптимизационного процесса. Для реализации этого подхода предлагается использовать следующее:

- 1) методику водно-энергетического расчета для определения режимов наполнения и сработки водохранилищ;
- 2) критерий максимизации прибыли;
- 3) принципы теории предельной полезности.

Таким образом, в представленном обзоре обосновывается необходимость разработки новой методики оптимизации режимов работы ГЭС в составе смешанной генерирующей системы на основе комплексного синергетического критерия экономической эффективности. Ключевым отличием предлагаемого подхода является определение цены гидроресурса с учетом специфики функционирования станции, что позволяет более точно оценивать вклад ГЭС в общую эффективность энергосистемы и водохозяйственного комплекса в целом.

Методология.

Методика расчета гарантированной мощности.

Гарантированная мощность ($N_{\text{гар}}$) – минимальная мощность, которую ГЭС обязана выдавать в энергосистему в маловодных условиях [2]. $N_{\text{гар}}$ рассчитывается по гидрографу маловодного года по следующему алгоритму.

1. Определение полезного объема водохранилища осуществляется по формуле:

$$V_{\text{пол}} = V_{\text{НПУ}} - V_{\text{УМО}} \quad (1)$$

где $V_{\text{НПУ}}$ и $V_{\text{УМО}}$ – объемы при отметках НПУ (нормальный подпорный уровень) и УМО (уровень мертвого объема) соответственно.

2. Распределение полезного объема между месяцами сработки вычисляют по формуле:

$$Q_{\text{вдх } i} = \frac{(\sum Q_{\text{быт } m})}{n}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{быт } m}$ – бытовой расход в m -месяце; n – количество месяцев сработки.

3. Расчет суммарного расхода производят по выражению:

$$Q_{\text{ГЭС } i} = Q_{\text{вдх } i} + Q_{\text{ср. быт } i}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{ГЭС } i}$ – расход воды ГЭС, м³/с; $Q_{\text{вдх } i}$ – расход воды водохранилища, м³/с; $Q_{\text{ср. быт } i}$ – среднее значение бытового расхода воды, м³/с.

4. Определение мощности осуществляют по выражению:

$$N_{\text{быт}} = K_N \cdot H \cdot Q_{\text{ГЭС}}, \quad (4)$$

где $K_N = 9,81\eta_m\eta_{\Gamma}\eta_{\text{вс}} \approx 8,5 \dots 9,5$ – коэффициент мощности, включающий в себя некий средний коэффициент полезного действия агрегата; H – средний напор в каждом конкретном интервале расчета, м.

Методика водно-энергетического расчета.

Регулирование стока осуществляется циклами различной продолжительности (суточный, годовой и др.) [5]. Расчет выполняется для маловодных (85 – 96 % обеспеченности) и средневодных (50 %) лет.

Порядок расчета:

1. Определение начала сработки (когда $N_{\text{быт}} < N_{\text{гар}}$).
2. Составление водного баланса подразумевает использование формулы

$$Q_{\text{ГЭС}} = Q_{\text{быт}} \mp Q_{\text{вдх}}, \quad (5)$$

где «+» – сработка; «-» – наполнение; $Q_{\text{быт}}$ – значение бытового расхода воды, м³/с; $Q_{\text{вдх сут}}$ – расход воды водохранилища, м³/с; $Q_{\text{ГЭС}}$ – расход воды ГЭС, м³/с.

3. Расчет мощности производится по выражению:

$$N_{\text{ГЭС}} = K_N \cdot H \cdot Q_{\text{ГЭС}}. \quad (6)$$

Основные требования:

- сработка начинается с НПУ;
- минимальная отметка – УМО;
- корректировка $N_{\text{гар}}$ при отклонениях от НПУ.

Расчет выполняется табличным методом с проверкой условия $N_{\text{ГЭС}} \geq N_{\text{гар}}$. На каждом шаге определяются следующие значения:

$$\begin{cases} \Delta V_{\text{вдх}} = Q_{\text{вдх}} \cdot t; \\ V_{\text{вдх кон}} = V_{\text{вдх нач}} - \Delta V_{\text{вдх}}; \\ Z_{\text{в.б ср}} = \frac{(Z_{\text{в.б нач}} + Z_{\text{в.б кон}})}{2}; \\ H = Z_{\text{в.б ср}} - Z_{\text{н.б}}(Q_{\text{ГЭС}}), \end{cases} \quad (7)$$

где $\Delta V_{\text{вдх}}$ – изменение объема водохранилища, м³; $V_{\text{вдх кон}}$ – конечный объем водохранилища, м³; $V_{\text{вдх нач}}$ – начальный объем водохранилища, м³; $Z_{\text{в.б. нач}}$, $Z_{\text{в.б. кон}}$ – начальный и конечный уровни воды в нижнем бьефе, м; $Z_{\text{н.б}}$ – уровень воды нижнего бьефа ГЭС, м.

При несоответствии мощности условиям выполняется перерасчет с новым $Q_{\text{вдх}}$. По результатам строится график $Z_{\text{вб}} = f(t)$, используемый для диспетчерского регулирования.

Методика определения себестоимости воды и предельного дохода MR.

В данной статье предложим новую методику определения себестоимости воды и предельного дохода (MR), на основании которых будет оптимизироваться ВХК с использованием предельной полезности и критерия максимизации прибыли.

– При расчетах учитываются напор воды на ГЭС, м, и дефицит расхода воды, м³/с. Дефицит расхода воды определяется разницей значений оптимального расхода воды в нижнем бьефе ГЭС и расхода воды для оптимального судоходства.

– По известному дефициту расхода воды в м³/с определяется значение дефицита расхода воды в руб. (по стоимости водознергосбыта водного департамента за 2012 г.).

– Определяется дефицит расхода воды в о. е. (дефицит в руб. / max дефицит в руб.).

– Вычисляется разница: 1 – дефицит расхода воды, о. е.

– Строится график с осями напора воды и дефицита расхода воды в о. е.

– При помощи построенного графика определяется разница площадей прямоугольников, которая представляет зависимость изменения предельного дохода – он уменьшается при уменьшении дефицита расхода воды.

– Аппроксимируя найденное изменение зависимости, получают уравнение изменения предельного дохода.

– Умножение предельного дохода в о. е. на стоимость воды, которая определена в ходе оптимизации гидротепловой системы, руб./(МВт · ч).

– По гарантированному расходу воды в нижнем бьефе и напору воды находят зависимость вырабатываемой мощности на ГЭС:

$$N = \frac{8.85 \cdot Q \cdot H}{1000}. \quad (8)$$

– Строится график зависимости предельного дохода от вырабатываемой мощности ГЭС – аппроксимация дает уравнение зависимости для предельного дохода от вырабатываемой мощности.

– Используется правило о том, что максимальное значение предельного дохода от вырабатываемой мощности в точке ноль является началом зависимости, а конечная точка зависимости в нуле предельного дохода, но в два раза больше по оси мощности. С учетом этих условий строится график себестоимости воды.

– Аппроксимация графика себестоимости дает уравнение зависимости себестоимости от вырабатываемой мощности.

Метод предельной полезности с использованием критерия максимизации прибыли.

Для оптимизации режимов работы Новосибирской ГЭС применяется метод предельной полезности на основании критерия максимизации прибыли, где оптимальная выработка определяется равенством предельного дохода и предельных издержек ($MR = MC$) (рисунок 1) [2, 6 – 8].

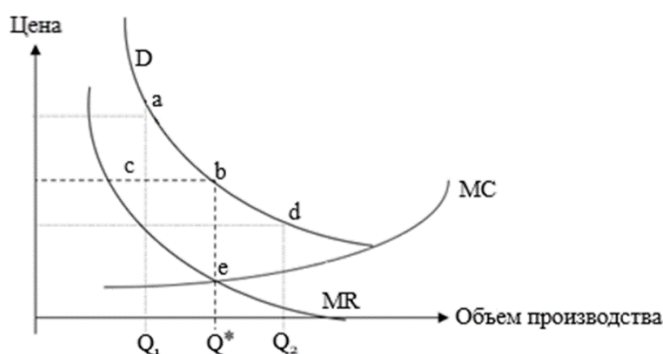


Рисунок 1 – График максимизации прибыли производимой электроэнергии

Как показано на рисунке 1, точка Q^* соответствует максимальной прибыли, при этом:

– в точке Q_1 (ниже оптимальной) имеется нереализованный потенциал прибыли (площадь abc);

– в точке Q_2 (выше оптимальной) возникают избыточные издержки (площадь bde).

Определение цены воды ведется на основе метода предельной полезности – цена воды определяется по стоимости затрат на топливо разных видов судов и расхода воды на ГЭС. Для оценки стоимости воды используются дифференциальные характеристики:

$$\begin{cases} U_b = c_b \cdot b; \\ U_q = c_{\text{воды}} \cdot q, \end{cases} \quad (9)$$

где b и q – относительный прирост расхода топлива и воды соответственно; c_b – цена топлива, руб./т.у.т.; $c_{\text{воды}}$ – стоимость гидроресурса, руб./м³; U_b – предельные издержки по топливу; U_q – предельные издержки по воде.

Оптимизация проводится с учетом следующих условий:

$$\begin{cases} b^* = q^* = idem; \\ H = const; \\ N_{\text{ГЭС}} = N_{\text{гар}}, \end{cases} \quad (10)$$

где $N_{\text{гар}}$ – гарантированная мощность, которую ГЭС должна выдавать в энергосистему.

На основе теории предельной полезности строится кривая безразличия [9].

По кривой безразличия определяется значение тангенса угла α , с помощью которого рассчитывается стоимость гидроресурса.

Оптимальное соотношение ресурсов между судоходством и ГЭС определяется по уравнению:

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{q}. \quad (11)$$

Для практических расчетов необходимо произвести следующее:

1) по водно-энергетическому расчету определить $N_{\text{гар}}(\mathcal{E}_{\text{мес}}) \rightarrow Q_{\text{ГЭС}}$;

2) вычислить характеристику относительного прироста воды: $q = \frac{dQ_{\text{ГЭС}}}{dN_{\text{ГЭС}}}$;

3) определить характеристику относительного прироста расхода топлива для судоходства:

$$b = \frac{dB_{\text{суд}}}{dN_{\text{суд}}}.$$

Затем рассчитать цену воды по новой кривой безразличия, где угол α определяется по кривой безразличия.

Цена воды рассчитывается по формулам:

$$\begin{cases} U_q = \pi_{\text{воды}} \cdot q; \\ \text{tg } \alpha = \frac{1/q}{1/b}; \\ \pi_{\text{воды}} = \text{tg } \alpha \cdot \frac{U_b}{\pi_b}. \end{cases} \quad (12)$$

Оптимальная месячная выработка:

$$N_{\text{опт}} = \mathcal{E}_{\text{опт}} / t_{\text{мес}}, \quad (13)$$

где $N_{\text{опт}}$ – оптимальное значение вырабатываемой мощности; $\mathcal{E}_{\text{опт}}$ – оптимальное значение производимой электроэнергии, $t_{\text{мес}} = 720$ ч.

Уравнение оптимизации имеет вид:

$$MC = MR = \pi_{\text{воды}} \cdot q, \quad (14)$$

где MC – предельные издержки; MR – предельный доход.

Предлагаемая методика позволяет определить тарифную стоимость воды, рассчитать оптимальные режимы выработки и обосновать цены на электроэнергию.

По сравнению с методом Лагранжа данный подход исключает необходимость итерационных расчетов и более точно отражает стоимость гидроресурсов в смешанной энергосистеме [4].

В качестве объекта исследования рассмотрена Новосибирская гидроэлектростанция (НГЭС). Установленная мощность Новосибирской ГЭС – 490 МВт (7×70 МВт).

На основании данных о расходе воды в нижнем бьефе (НБ) для ГЭС и оптимальном расходе воды для судоходства представим график оптимальных расходов для ГЭС и судоходства (рисунок 2).

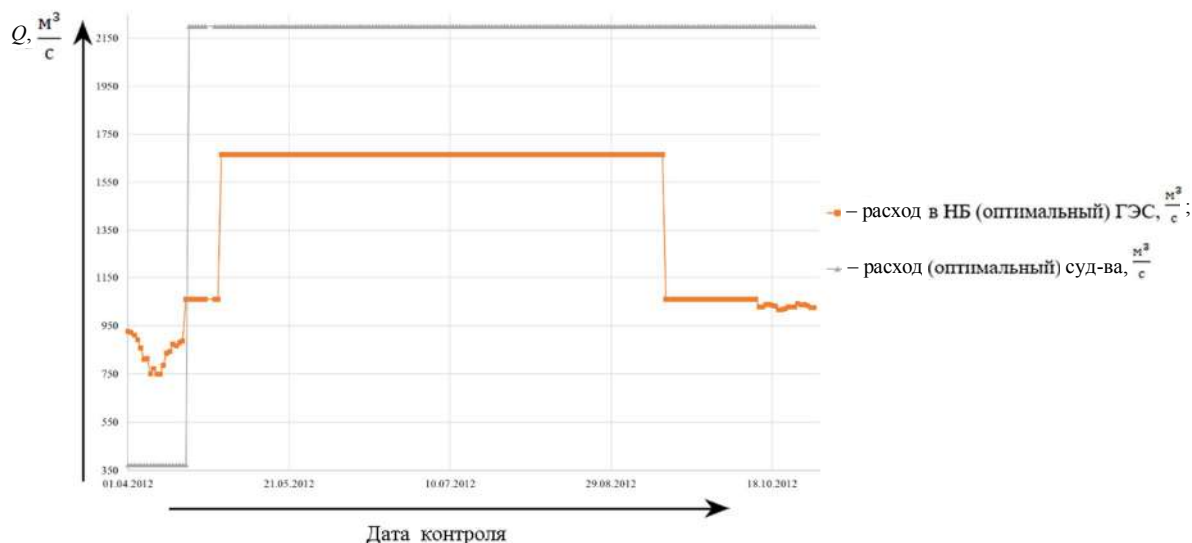


Рисунок 2 – Оптимальные расходы воды

Определяем дефицит расхода воды DQ в зависимости от напора H – разницу между оптимальными расходами воды в НБ ГЭС и судоходства в именованных единицах (рисунок 3), а также в относительных единицах (рисунок 4) для дальнейших расчетов.

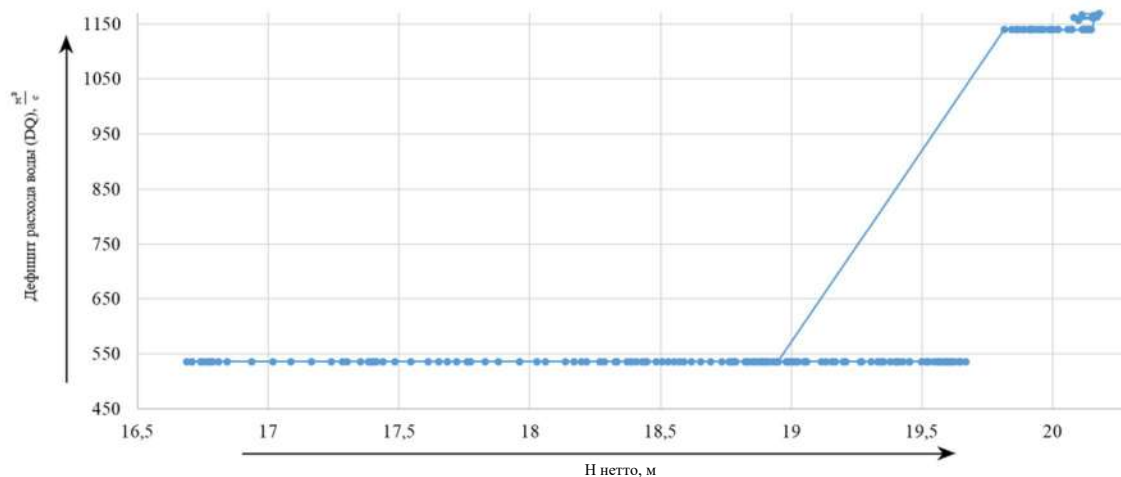


Рисунок 3 – Дефицит расхода воды

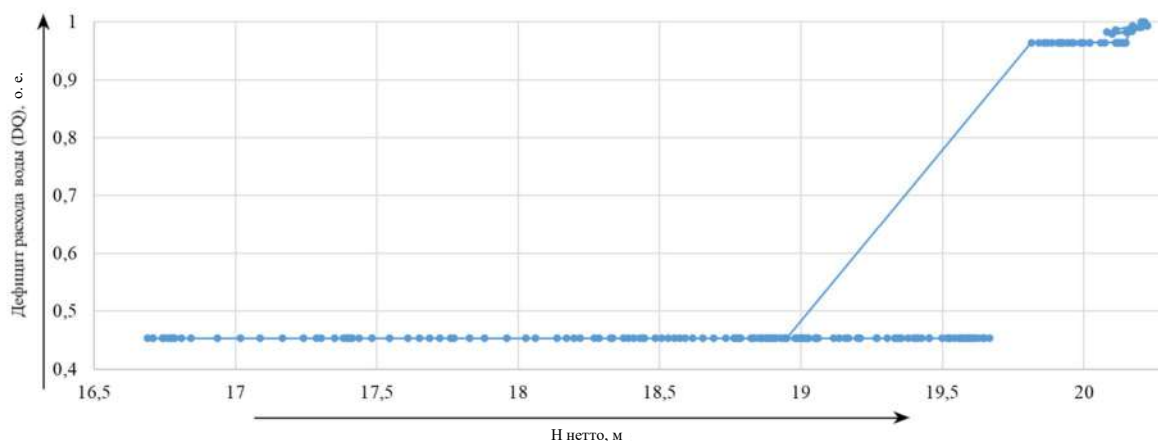


Рисунок 4 – Дефицит расхода воды, о. е.

Далее определяется разница 1 – дефицит расхода воды в о. е. Строится график с осями напора и дефицита расхода воды в о. е. [9, 10]. При помощи данного графика находится разница площадей прямоугольников, которая отражает зависимость изменения предельного дохода – уменьшение при уменьшении дефицита расхода воды (рисунок 5).

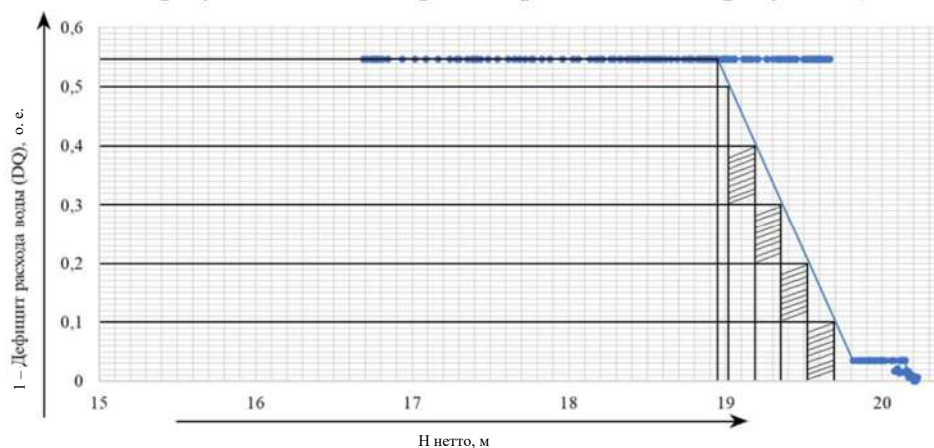


Рисунок 5 – Определение площадей прямоугольников в зависимости от изменения предельного дохода

Исходя из полученных площадей получаем предельный доход (MR , о. е.), используя стоимость, полученную при оптимизации режимов гидротепловой системы – получаем предельный доход в руб. (таблица 1).

Таблица 1 – Предельный доход

Параметр	Напор H , м			
	19,200	19,370	19,535	19,700
MR , о. е.	0,018	0,017	0,017	0,016
MR , руб./МВт · ч	36,575	33,963	35,269	35,269

Имея значения напоров и гарантируемых расходов воды, определяем генерируемые мощности ГЭС, где $MR = 2859/9$ руб./МВт · ч – значение максимального предельного дохода, полученного в ходе оптимизации (таблица 2). Аппроксимирование полученного графика дает уравнение для определения предельного дохода в зависимости от вырабатываемой мощности ГЭС (рисунок 6) [11, 12]. Для получения уравнения определения себестоимости вырабатываемой мощности, описанной в методологии, строится график (рисунок 7).

Таблица 2 – Характеристика предельного дохода

Параметр	Q , м ³ /с				
	0	1460	1460	1460	1460
Напор, м	0	19,2	19,37	19,535	19,7
MR , о. е.	0	0,018	0,017	0,017	0,016
MR , руб./МВт · ч	2859,9	36,575	35,269	35,269	33,963
N , МВт	0	238,272	240,382	242,429	244,477

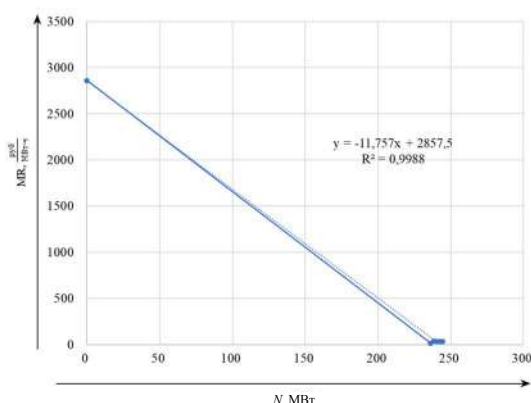


Рисунок 6 – Зависимость предельного дохода от вырабатываемой мощности ГЭС

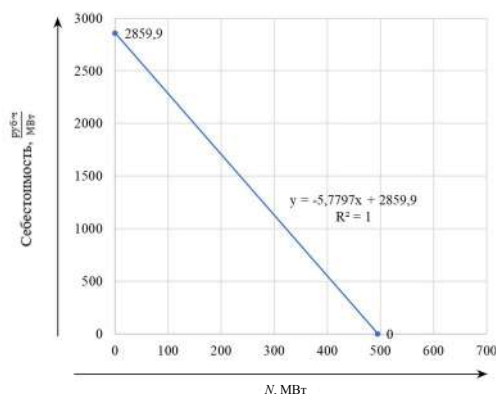


Рисунок 7 – Зависимость себестоимости от вырабатываемой мощности ГЭС

Далее переходим к расчетам по определению цены воды по теории предельной полезности, соотнося топливные издержки с учетом расхода топлива на нужды судоходства (таблица 3) и предельные издержки по расходам воды на ГЭС (рисунок 8).

Используя теорию предельной полезности, переходим от относительных расходов воды и относительных расходов топлива к их денежным эквивалентам для определения стоимости воды (рисунок 9).

Для расчета принимается, что $U_q = 693,35 \frac{\text{руб.}}{\text{МВт} \cdot \text{ч}}$ – предельные издержки Новосибирской ГЭС, зависящие от судоходства, а цена воды $c_{\text{воды}} = 0,054 \frac{\text{руб.}}{\text{м}^3}$ [9, 10].

Таблица 3 – Расходы на топливо для различных видов судов

Предназначение	Тип судна	Мощность судна N_e , кВт	Уд. расход топлива, г/кВт·ч	Цена топлива, руб./т	Уд. расход масла, г/кВт·ч	Цена масла, руб./т	МС _{суд} , руб./сут	МС _{суд} , руб./год	МС _{суд} , руб./кВт·ч
Пассажирский флот	ОМ-136 (780)	600	224	66270	1,84	60000	292595	21652065	4996
	Ремикс	600	226	66270	1,84	60000	295188	21843960	5040
	В. Гашков (305)	660	226	66270	1,84	60000	324707	24028356	6099
Грузовой флот	Баржа 2949 (Р-56)	588	222	66270	1,020	60000	283259	20961193	4740
	Баржа 2944 (Р-56)	588	222	66270	1,020	60000	283259	20961193	4740
	Баржа 2918 (Р-56)	588	222	66270	1,020	60000	283259	20961193	4740
	Баржа 404 (944)	441,29	222	66270	1,359	60000	212881	15753241	2673
Грузовой флот	Баржа 1008 (561)	462,14	222	66270	1,298	60000	222883	16493403	2931
Буксир / Толкач	РТ-764	916	222	66270	0,655	60000	440613	32605374	11487
	РТ-766	448	222	66270	1,339	60000	216096	15991116	2755
	Валерий Лоцманов	448	222	66270	1,339	60000	216096	15991116	2755
	Б. Гоздан (РТ-762)	448	222	66270	1,339	60000	216096	15991116	2755
	А.Садовский	448	222	66270	1,339	60000	216096	15991116	2755
	РТ-381	220,64 97	219	66270	7,41	60000	107622	7964053	675
	РТ-390 (9118)	220	231	66270	7,41	60000	113010	8362772	707
	Плотовод-697 (Р-33Б)	544	226	66270	1,102	60000	266853	19747138	4131
	Баклан (Р-96)	110	227	66270	1,135	60000	54203	4011088	169
Технический флот	СС-2 (246)	232	219	66270	7,41	60000	113158	8373727	747
	Путейский-160 (КС-100)	125	220	66270	1,135	60000	59704	4418131	212
	Лебедь	110,32 45	220	66270	1,135	60000	52695	3899437	165
	Фрегат (376У)	110,32 485	220	66270	1,135	60000	52695	3899437	165
	Гряды (391А)	110	220	66270	1,135	60000	52539	3887955	164

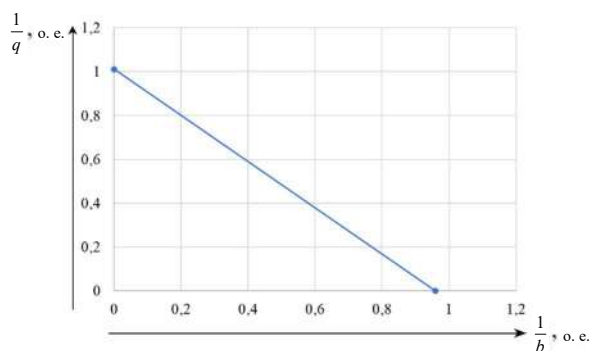


Рисунок 8 – Кривая безразличия относительных приростов расхода воды и относительных приростов расходов топлива

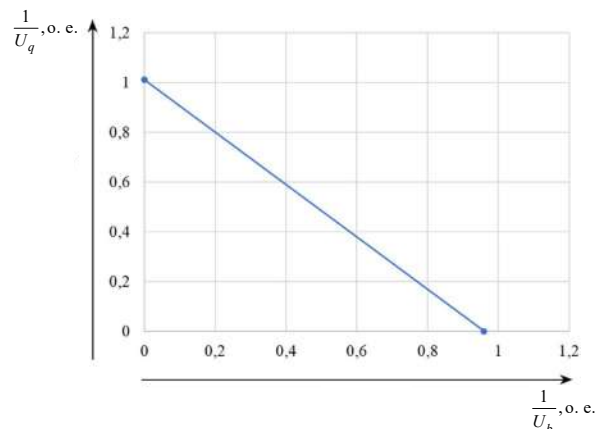


Рисунок 9 – Кривая безразличия предельных издержек воды и топлива

Характеристика относительных приростов воды для НГЭС представлена в таблице 4 и на рисунке 10.

Таблица 4 – Характеристика относительных приростов расхода воды для НГЭС

N , МВт	36,0	39,5	43,0	47,0	52,6	58,5	76,0	152,0	165,0	240,0
q , м ³ /с · МВт	4,7	4,8	4,9	4,9	5,0	5,1	5,3	5,3	5,4	5,4
N , МВт	255,0	260,0	355,0	365,0	457,0	470,0	550,0	564,0	618,0	
q , м ³ /с · МВт	5,5	5,5	5,5	5,6	5,6	5,6	5,6	5,7	5,8	

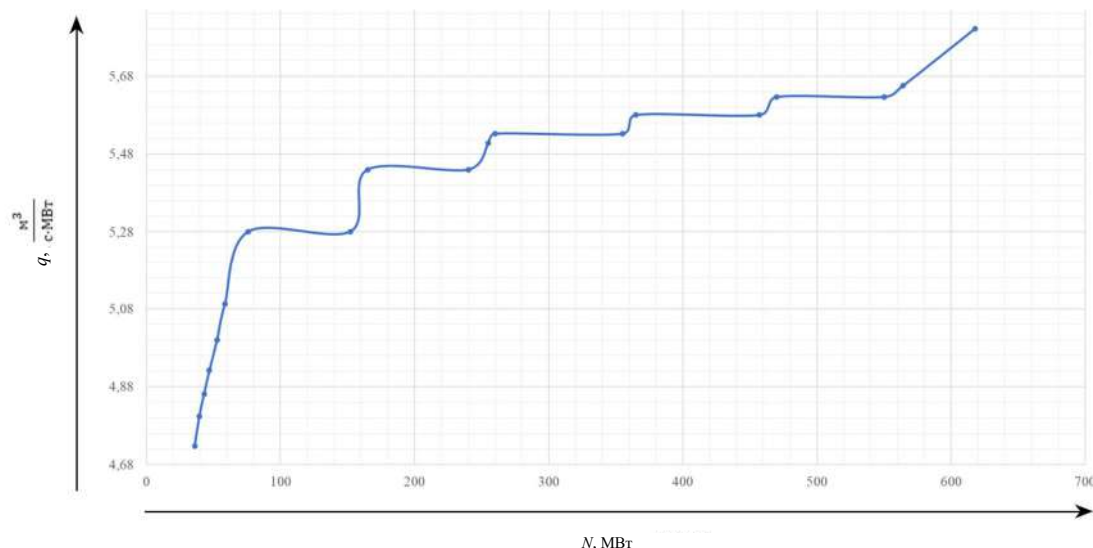


Рисунок 10 – Характеристика относительных приростов воды

Используя полученные уравнения по предельным издержкам и себестоимости (зависимости предельных издержек и себестоимости от генерируемой мощности ГЭС), а также полученную стоимость воды, зависящую от расходов на топливо, стоимость воды после оптимизации гидротепловой системы, необходимо построить характеристики относительных приростов издержек (рисунок 11).

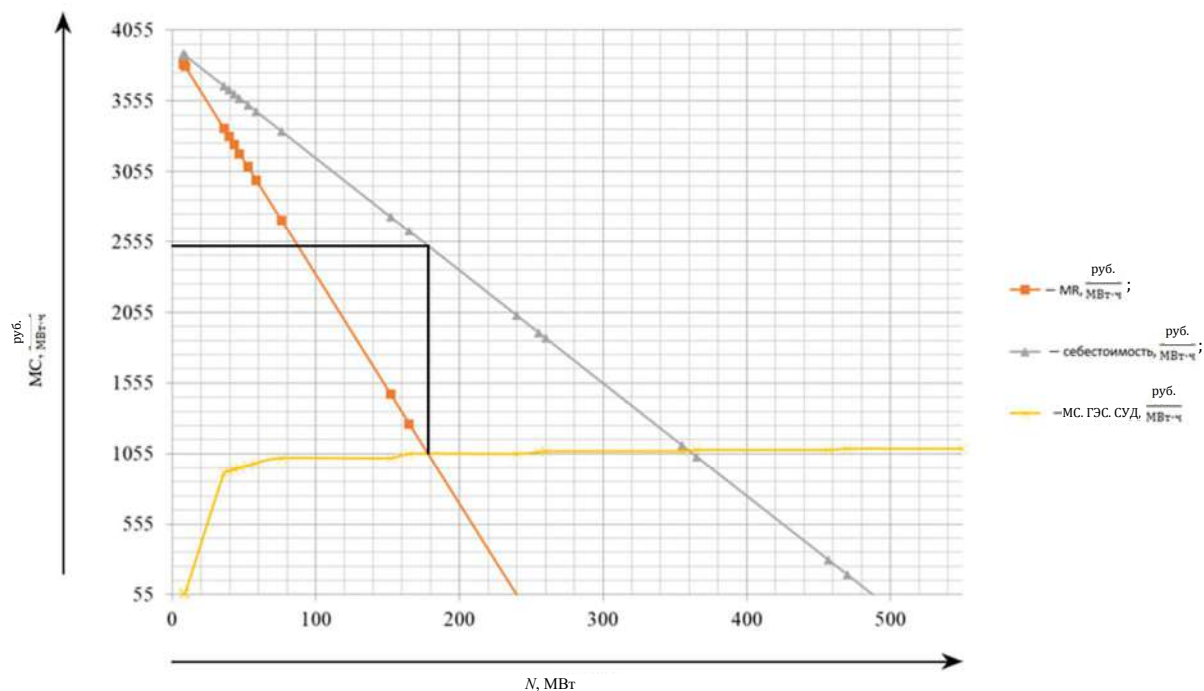


Рисунок 11 – Определение оптимального режима работы Новосибирской ГЭС для периода половодья 2012 г.

В результате оптимизации режимов НГЭС получилось, что $N_{\text{опт}} = 178$ МВт, и при этом цена продаж составляет $3280 \frac{\text{руб.}}{\text{МВт} \cdot \text{ч}}$.

На рисунке 12 представлена оптимизация режимов работы НГЭС в составе ВХК на примере апреля 2012 г.

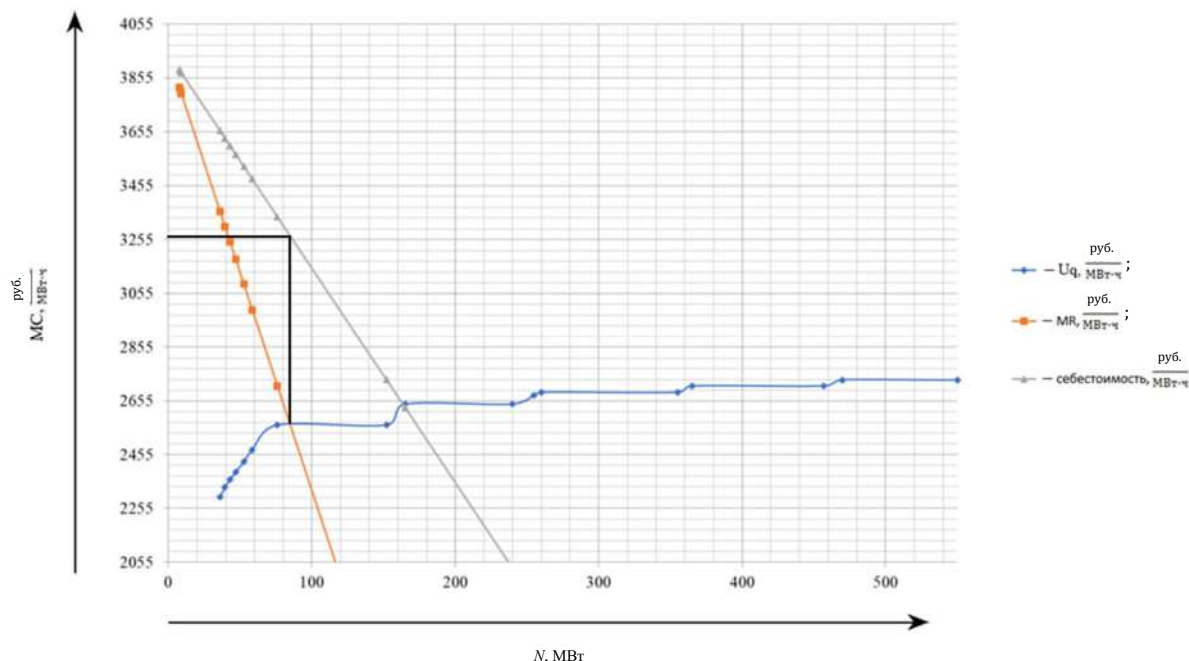


Рисунок 12 – Определение оптимального режима работы Новосибирской ГЭС в составе ВХК для периода половодья (месяц апрель) 2012 г.

В результате оптимизации получилось, что $N_{\text{опт}} = 85$ МВт, и при этом цена продаж составляет $2540 \frac{\text{руб.}}{\text{МВт} \cdot \text{ч}}$.

В данной статье представлена разработанная авторами методика оптимизации режимов работы ГЭС в составе водохозяйственного комплекса на примере расчета для паводка 2012 г. В исследовании были использованы следующие методики: «Методика расчета гарантированной мощности», «Метод предельной полезности с использованием критерия максимизации прибыли», а также разработана «Методика определения себестоимости воды и предельного дохода MR». Перечисленные методики не имеют аналогов по всему миру, поэтому являются актуальными для оптимизации режимов работы ГЭС в составе ВХК.

В ходе расчетов были получены оптимальные мощности выработки НГЭС в составе ВХК. Так, для случая, когда оптимизация проводилась для ГЭС в составе гидротепловой системы, оптимальная вырабатываемая мощность составила 85 МВт, для случая, когда оптимизация ГЭС проводилась в составе водохозяйственного комплекса, учитывая расходы топлива для различных видов судов, оптимальная мощность составила 178 МВт. Были получены также тарифные стоимости: $0,0538 \frac{\text{руб.}}{\text{МВт}}$ – стоимость воды, учитывающая расходы на топливо различных судов, $0,134 \frac{\text{руб.}}{\text{МВт}}$ – стоимость воды, учитывающая расходы на топливо ТЭС в составе гидротепловой системы. Были построены графики максимизации прибыли оптимизации режимов работы ГЭС в составе ВХК и в составе гидротепловой системы – цены продаж соответственно равны 2540 и $3280 \frac{\text{руб.}}{\text{МВт} \cdot \text{ч}}$.

С помощью указанных методик и критерия максимизации прибыли, основанного на равенстве предельных доходов и предельных издержек, можно обосновать цены на электроэнергию ГЭС исходя из оптимального объема ее выработки. Таким образом, станция может вырабатывать стратегии своего поведения в энергосистеме в зависимости от различных факторов производства электроэнергии, что положительно сказывается на повышении надежности ее функционирования в рамках энергообъединения.

Список литературы

1. Алябышева, Т. М. Моделирование краткосрочных режимов работы каскадов ГЭС / Т. М. Алябышева, В. А. Цурлуков, А. Г. Юркин. – Текст : непосредственный // Энергия единой сети. – 2012. – № 4 (4). – С. 62–69. – EDN VXCKVR.
2. Секретарев, Ю. А. Оптимальное управление режимами ГЭС в электроэнергетических системах : монография / Ю. А. Секретарев, Ш. М. Султонов. – Душанбе : Таджикский техн. ун-т им. академика М. С. Осими, 2020. – 144 с. – Текст : непосредственный.
3. Хайман, Д. Н. Современная микроэкономика: анализ и применение : в 2 томах / Д. Н. Хайман ; пер. с англ. – Москва : Финансы и статистика, 1992. – Т. 1. – 384 с. – Текст : непосредственный.
4. Меламед, Л. Б. Экономика энергетики: основы теории / Л. Б. Меламед, Н. И. Суслов. – Новосибирск : Сибирское отделение РАН, 2000. – 180 с. – Текст : непосредственный. – EDN WIFLF.
5. Иванова, Е. В. Анализ эффективности использования СЭС и ВЭУ для обеспечения электроэнергией хозяйственных нужд НГЭС / Е. В. Иванова, Н. В. Зубова. – Текст : непосредственный // Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов в 9 ч., Новосибирск, 02 – 06 декабря 2019 г. / под ред. А. В. Гадюкиной / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2019. – Часть 4. – С. 35–38. – EDN IHNKKS.
6. Ksenofontova, E. E. (2019). The research of operation modes of hydroelectric power station with annual regulation. In *Aspire to Science* (pp. 158-162). EDN BDOXAW.
7. Skvortsova, O., Dashkina, A., Petrovskaya, E., Terleev, V., Nikonorov, A., Badenko, V., ... & Pavlov, S. (2016). The classification of accidental situations' scenarios on hydropower plants. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 53, p. 01014). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165301014>.

8. Ivanova, E. V. (2019). Assessment of opportunity of placement the renewable energy sources on the territory of the Novosibirsk HPP. In *Aspire to Science* (pp. 87-91). EDN KWLBI.
9. Sekretarev, Y. A., Myatezh, T. V., & Gorshin, A. V. (2021, March). Optimization of operating modes of hydropower plants with determination of the price for a hydro resource using complex criteria of ecological and economic efficiency. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1089, No. 1, p. 012038). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1089/1/012038>.
10. Moshkin, B. N., Myatezh, T. V., Sekretarev, Y. A., & Averbukh, M. A. (2019, June). Mathematical model of managing of the generating company on the criterion of the profit maximization. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 552, No. 1, p. 012016). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/552/1/012016>.
11. Menyaykin, D. (2016). The use of fuzzy logic in the theory of reliability. In *Progress through Innovations* (pp. 52-53). EDN VYMYSP.
12. Mitrofanov, S. V., Armeev, D. V., & Domahin, E. A. (2021, November). Analysis of the impact of autonomous hybrid power plants on the railways capacity. In *2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE)* (pp. 161-165). IEEE. <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647596>.

References

1. Alyabysheva T.M., Tsurlukov V.A., Yurkin A.G. Modeling short-term operation modes of hydroelectric power plant cascades. *Energiia edinoi seti – Energy of Unified Grid*, 2012, no. 4(4), pp. 62-69. EDN VXCKVR. (In Russian).
2. Sekretarev Yu.A., Sultonov Sh.M. *Optimal'noe upravlenie rezhimami GES v elektroenergeticheskikh sistemakh : monografiia* [Optimal management of HPP regimes in electric power systems : monograph]. Dushanbe, Tajik Technical University named after Academician M. S. Osimi Publ., 2020, 144 p. (In Russian).
3. Khaiman D.N. *Sovremennaiia mikroekonomika: analiz i primeneniye : v 2 tomakh* [Modern microeconomics: analysis and application : in 2 volumes]. Moscow, Finance and Statistics Publ., 1992, vol. 1, 384 p. (In Russian).
4. Melamed L.B., Suslov N.I. *Ekonomika energetiki: osnovy teorii* [Energy Economics: Foundations of Theory]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2000, 180 p. EDN WIIFLF. (In Russian).
5. Ivanova E.V., Zubova N.V. Analysis of the Efficiency of Using Solar Power Plants and Wind Turbines for Economic Needs of NGPP. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii : sbornik nauchnykh trudov – Science. Technologies. Innovations : collection of scientific papers*, 2019, part 4, pp. 35-38. EDN IHNKKC. (In Russian).
6. Ksenofontova, E. E. (2019). The research of operation modes of hydroelectric power station with annual regulation. In *Aspire to Science* (pp. 158-162). EDN BDOXAW.
7. Skvortsova, O., Dashkina, A., Petrovskaya, E., Terleev, V., Nikonorov, A., Badenko, V., ... & Pavlov, S. (2016). The classification of accidental situations' scenarios on hydropower plants. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 53, p. 01014). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165301014>.
8. Ivanova, E. V. (2019). Assessment of opportunity of placement the renewable energy sources on the territory of the Novosibirsk HPP. In *Aspire to Science* (pp. 87-91). EDN KWLBI.
9. Sekretarev, Y. A., Myatezh, T. V., & Gorshin, A. V. (2021, March). Optimization of operating modes of hydropower plants with determination of the price for a hydro resource using complex criteria of ecological and economic efficiency. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1089, No. 1, p. 012038). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1089/1/012038>.

10. Moshkin, B. N., Myatezh, T. V., Sekretarev, Y. A., & Averbukh, M. A. (2019, June). Mathematical model of managing of the generating company on the criterion of the profit maximization. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 552, No. 1, p. 012016). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/552/1/012016>.
11. Menyaykin, D. (2016). The use of fuzzy logic in the theory of reliability. In *Progress through Innovations* (pp. 52-53). EDN VYMYSP.
12. Mitrofanov, S. V., Armeev, D. V., & Domahin, E. A. (2021, November). Analysis of the impact of autonomous hybrid power plants on the railways capacity. In *2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE)* (pp. 161-165). IEEE. <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647596>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мятеж Татьяна Владимировна

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: tatianamyateg@mail.ru

Секретарев Юрий Анатольевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: sekretarevua@mail.ru

Донченко Семен Сергеевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Магистрант кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (923) 001-90-24.

E-mail: donchenko.s@inbox.ru

Капустин Владимир Алексеевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Магистрант кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (913) 069-31-52.

E-mail: kapustin.vladimir.99@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Myatezh Tatiana Vladimirovna

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department "Power Supply Systems for Enterprises", NSTU.

Phone: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: tatianamyateg@mail.ru

Sekretarev Yuri Anatolyevich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department "Power Supply Systems for Enterprises", NSTU.

Phone: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: sekretarevua@mail.ru

Donchenko Semyon Sergeevich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Master's student of the department "Power Supply Systems for Enterprises", NSTU.

Phone: +7 (923) 001-90-24.

E-mail: donchenko.s@inbox.ru

Kapustin Vladimir Alekseyevich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Master's student of the department "Power Supply Systems for Enterprises", NSTU.

Phone: +7 (913) 069-31-52.

E-mail: kapustin.vladimir.99@mail.ru

Сурков Павел Евгеньевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Студент кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (923) 595-57-15.

E-mail: psurkoff75@gmail.com

Surkov Pavel Evgenievich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Student of the department "Power Supply Systems for Enterprises", NSTU.

Phone: +7 (923) 595-57-15.

E-mail: psurkoff75@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Оптимизация режимов работы водохозяйственного комплекса на основе определения синергетической стоимости гидроресурса / Т. В. Мятазх, Ю. А. Секретарев, С. С. Донченко [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 103 – 117.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Myatezh T.V., Sekretarev Y.A., Donchenko S.S., Kapustin V.A., Surkov P.E. Optimization of operating modes of the water management complex based on determining the synergetic cost of the water resource. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 103-117. (In Russian).

УДК 536.7, 662.76

В. Я. Губарев, М. А. Бавыкин, А. Г. Ярцев

Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), г. Липецк, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ КОНВЕРСИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СРЕДЕ

Аннотация. Рост производственных мощностей требует постоянного увеличения потребления топлива, что ведет к неизбежному уменьшению ископаемого топлива, запасы которого ограничены. По этой причине необходим постепенный переход на использование вторичных энергоресурсов, в частности использование вторичных газов, образующихся в результате производственных процессов. В данной статье рассмотрен вариант применения конверсии природного газа при добавлении его в высокотемпературный поток конвертерного газа с целью снижения его температуры для уменьшения тепловой нагрузки на поверхности нагрева и дальнейшего использования в качестве основного топлива в энергетических агрегатах. С помощью универсального программного комплекса *Ansys Fluent* была разработана расчетная модель газопровода конвертерного газа с подводом природного топлива, получены контуры распределения состава и температуры топливной смеси, образующейся при химическом взаимодействии газов. Проведены анализ полученной топливной смеси и сравнение эффективности полученного синтез-газа с исходным топливом. Показано, что в результате химической реакции получившийся газ имеет увеличение тепловой эффективности на 64 %. Результаты данного исследования демонстрируют возможность дальнейшего применения образовавшейся топливной смеси в качестве основного топлива для технологических процессов.

Ключевые слова: моделирование, взаимодействие газовых потоков, *Ansys*, конвертерный газ, природный газ, конверсия, вторичные энергоресурсы, утилизация тепла, высокотемпературная среда.

Vasily Ya. Gubarev, Mikhail A. Bavykin, Alexey G. Yartsev

Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, the Russian Federation

APPLICATION OF NATURAL GAS CONVERSION IN HIGH TEMPERATURE ENVIRONMENT

Abstract. The growth of production capacity requires a constant increase in fuel consumption, which leads to an inevitable decrease in fossil fuels, whose reserves are limited. As a result, it is necessary to gradually switch to the use of secondary energy resources, in particular, the use of secondary gases generated as a result of production processes. This article discusses the use of natural gas conversion by adding it to a high-temperature converter gas stream in order to reduce its temperature to reduce the thermal load on the heating surface and further use as the main fuel in power units. Using the *Ansys Fluent* universal software package, a computational model of a natural fuel converter gas pipeline was developed, and the distribution contours of the composition and temperature of the fuel mixture formed by the chemical interaction of gases were obtained. The analysis of the obtained fuel mixture was carried out, and the efficiency of the

obtained synthesis gas was compared with the initial fuel. It was shown that as a result of a chemical reaction, the resulting gas has an increase in thermal efficiency by 64 %. The results of this study demonstrate the possibility of further application of the resulting fuel mixture as the main fuel for technological processes.

Keywords: modeling, interaction of gas flows, Ansys, converter gas, natural gas, conversion, secondary energy resources, heat recovery, high-temperature environment.

С каждым годом в России увеличиваются темпы производственных процессов и расширяются промышленные предприятия, потребляющие запасы ископаемого топлива, вследствие чего их количество постепенно уменьшается. В связи с этим задачей каждого крупного производителя является уменьшение потребления закупаемого природного топлива при сохранении своих производственных мощностей. Согласно мнению экспертов, мировых запасов природного газа при текущей интенсивности потребления должно хватить еще на 50 – 60 лет [1]. В связи с этим необходимо поднимать вопрос о возможности минимизации потребления природного газа в промышленных цепочках производства. В настоящее время одним из основных источников тепловой и электрической энергии являются ТЭЦ, работающие в подавляющем большинстве на газообразном топливе.

Для экономии природных ископаемых в промышленности сегодня взят курс на активное использование вторичных энергоресурсов, одним из которых является доменный газ, используемый на крупных металлургических предприятиях полного цикла для его полезной утилизации путем выработки тепловой энергии. Однако существует также вид топлива, применение которого до сих пор не получило широкого практического применения. Таким топливом является конвертерный газ.

Конвертерное производство является одним из основных для металлургических предприятий полного цикла. Однако помимо получения стали в процессе продувки жидкого чугуна образуется дополнительный продукт – конвертерный газ. Получают его на выходе из конвертера с температурой 1500 – 1600 °С, что делает его дальнейшее использование при таких температурах довольно затруднительным.

В настоящее время одним из способов применения этого газа, кроме сжигания его на газовой свече, является его охлаждение в котле утилизаторе для нагрева теплоносителя. Однако температура конвертерного газа является критичной для таких котлов и способствует активному износу поверхностей нагрева, вследствие чего происходит их разрушение.

Возникает вопрос о возможности снижения температуры этого газа и использовании энергетического потенциала его физической теплоты для производства, если планируется не сжигать его на свече, а утилизировать. В связи с этим необходимо разработать варианты снижения температуры конвертерного газа, например, рассмотреть возможность применения конверсии природного газа при его добавлении в высокотемпературный поток конвертерного газа [2 – 7].

Для анализа взаимодействия двух газов использована простейшая модель горизонтального газохода конвертерного газа с перпендикулярными подводами природного газа в четырех точках, изображенная на рисунке 1. Диаметр магистрального газопровода 3 м, а диаметры подводов природного газа 0,3 м. Длина газохода принята 45 м.

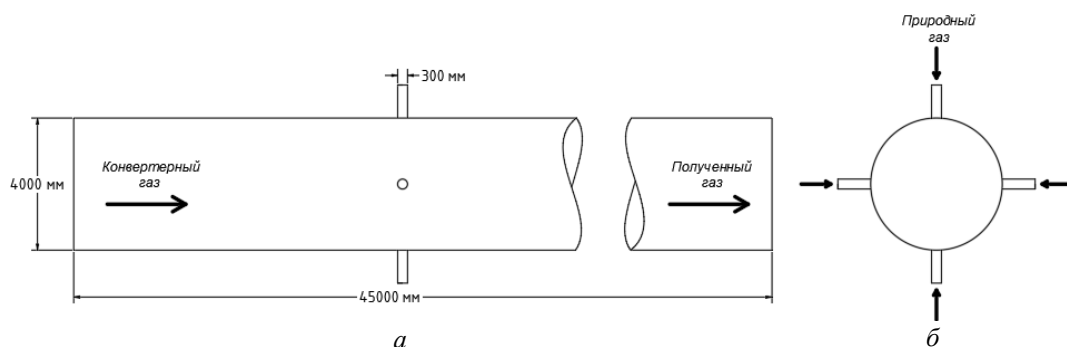


Рисунок 1 – Схема рассматриваемого газопровода

В качестве взаимодействующих веществ был задан конвертерный газ со следующим составом в массовых долях: CO – 0,6888, CO_2 – 0,1902, N_2 – 0,121 и природный газ в виде чистого CH_4 [8, 9]. Процесс протекания реакции смешения можно описать формулой:



Для реализации процесса смешения в качестве граничных условий на входах были заданы скорость и температура газов: 10 м/с и 1600 °С для конвертерного и 21,2 м/с и 50 °С для природного. Итоговая расчетная модель представлена на рисунке 2 [10, 11].

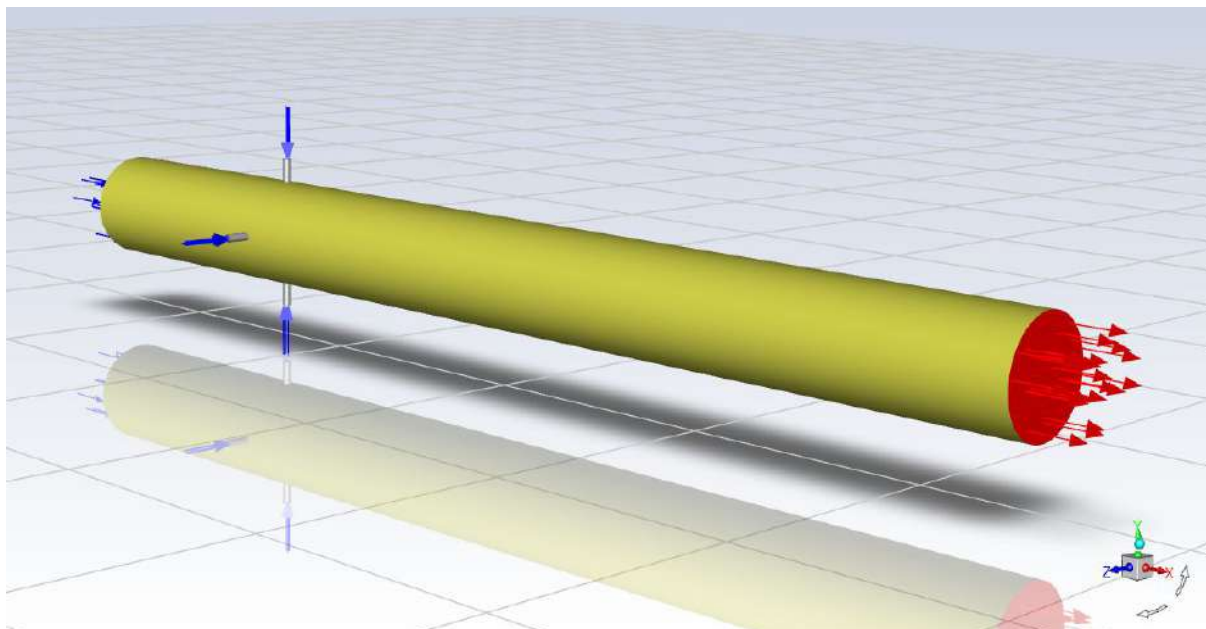


Рисунок 2 – Итоговая расчетная модель рассматриваемого газопровода

Для проведения анализа расчетов модели были созданы графические контуры распределения концентрации газов по всей длине газопровода. Как видно из рисунков 3 – 8, при текущих параметрах, заданных ранее, природный газ, подаваемый в газопровод конвертерного газа, полностью реагирует, образуя водородокись углерода.

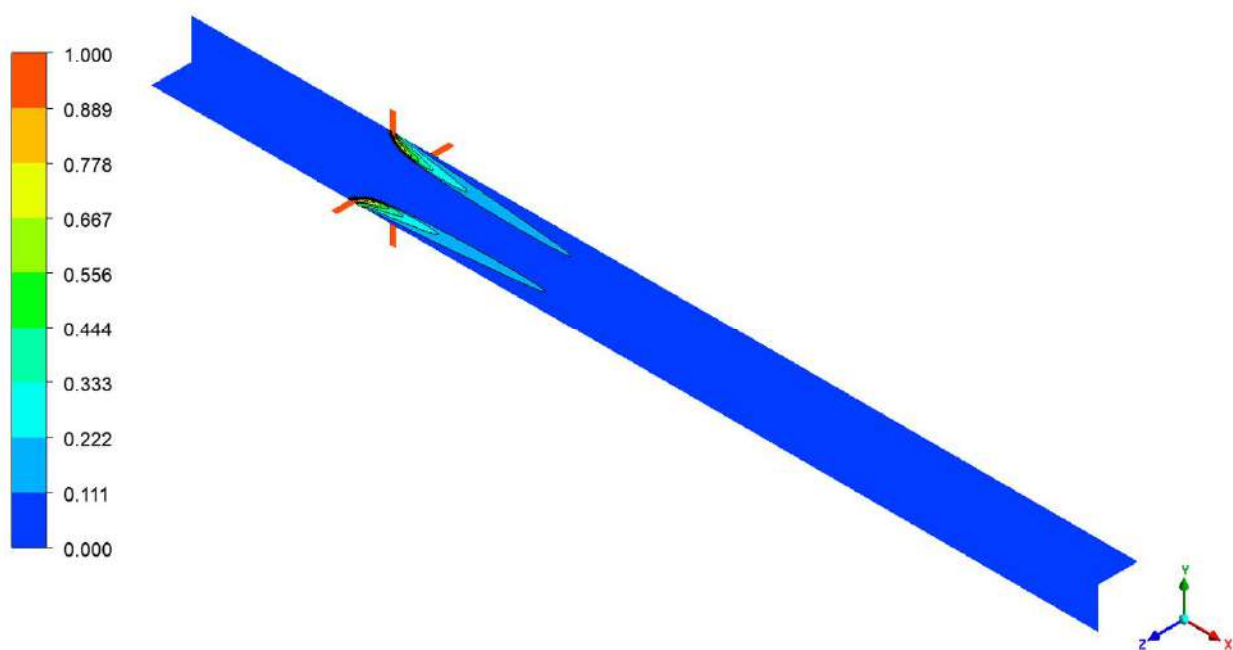


Рисунок 3 – Контур распределения массовой доли CH_4

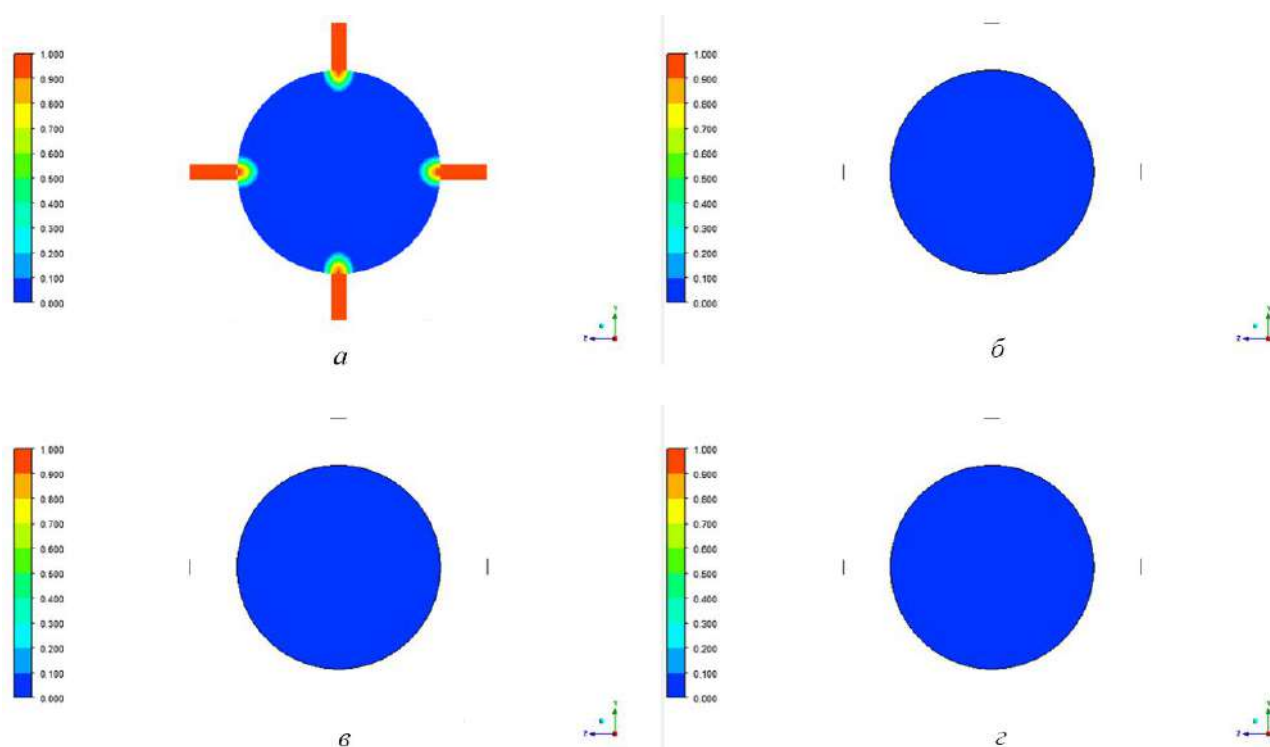


Рисунок 4 – Контуры распределения массовой доли CH_4 на расстоянии 10, 20, 30 и 45 м от ввода конвертерного газа

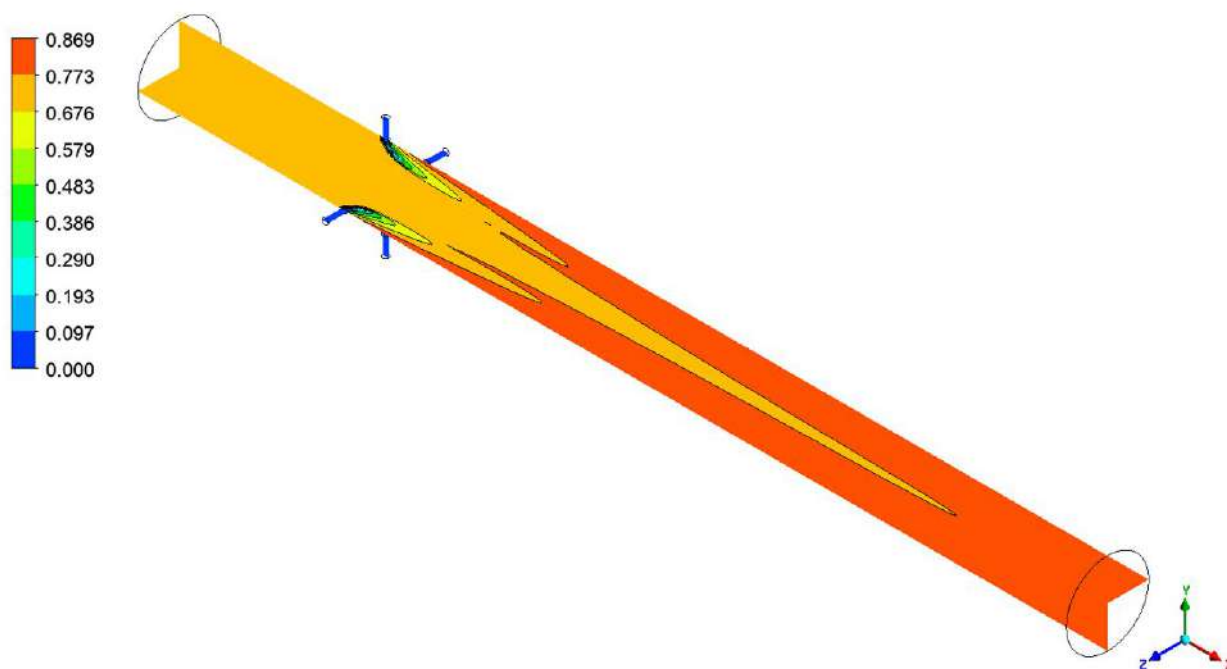


Рисунок 5 – Контур распределения массовой доли CO

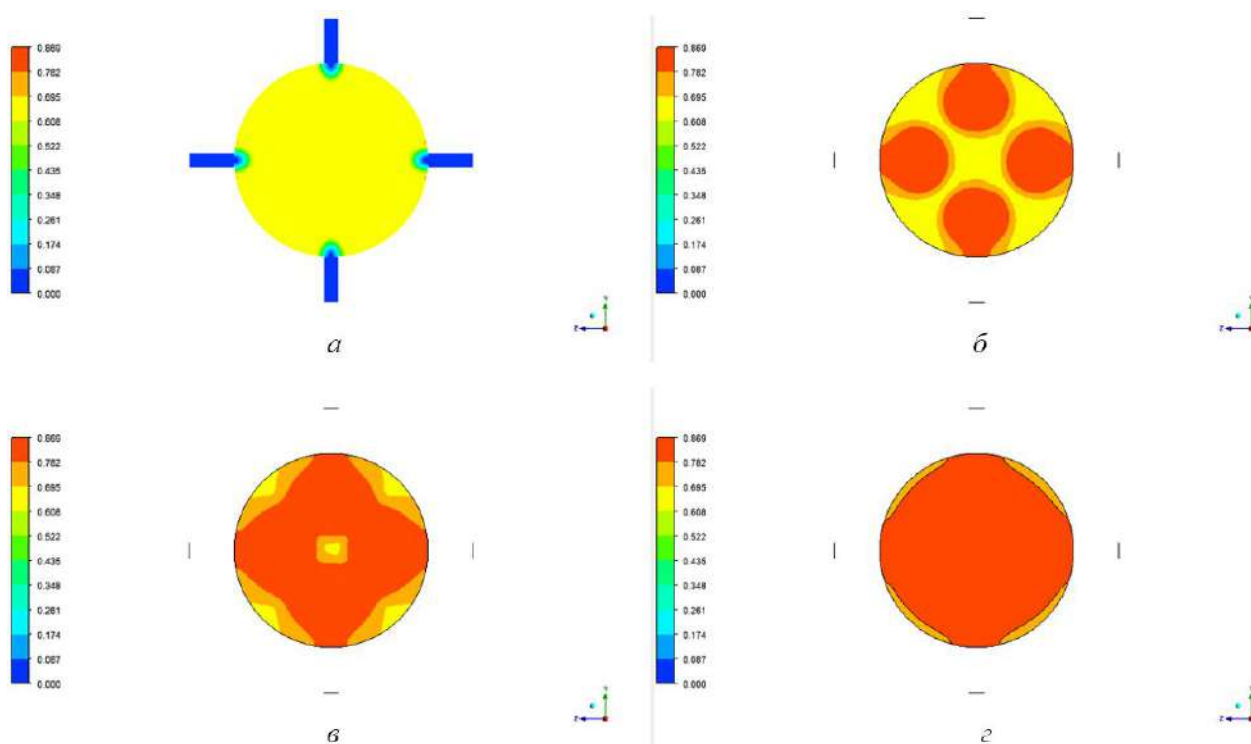


Рисунок 6 – Контуры распределения массовой доли CO на расстоянии 10, 20, 30 и 45 м от ввода конвертерного газа

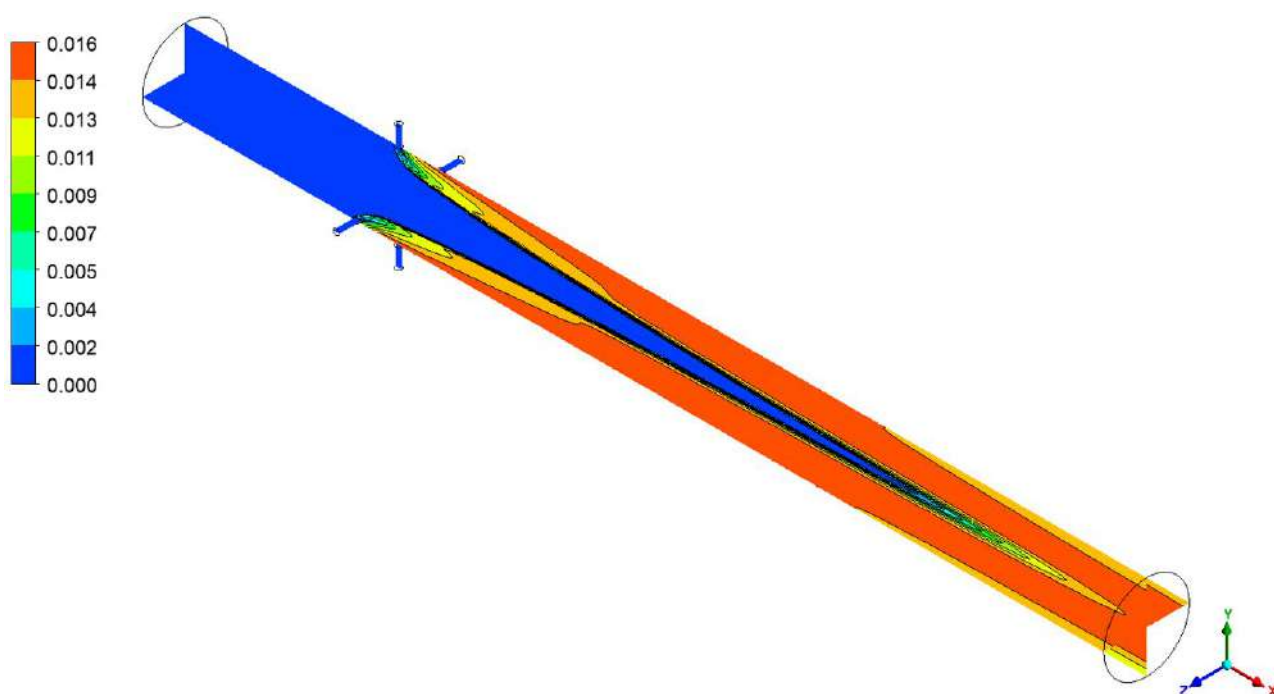


Рисунок 7 – Контур распределения массовой доли H_2

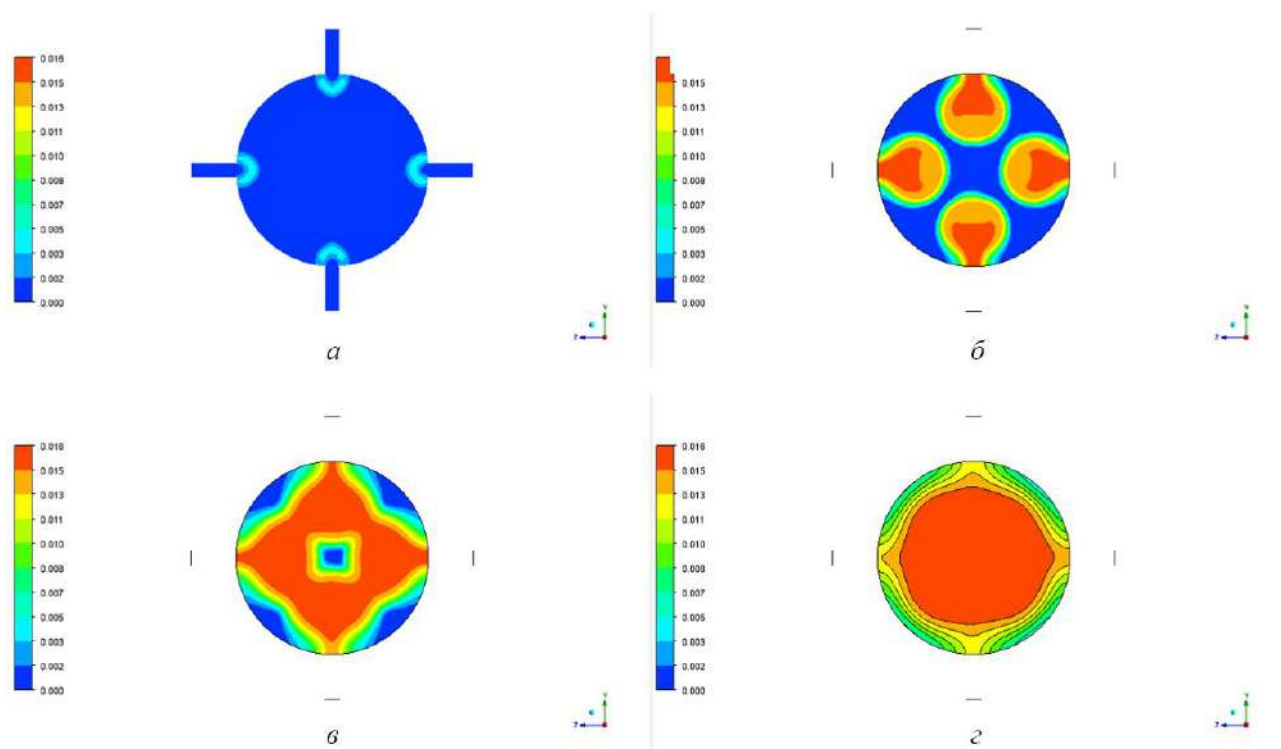


Рисунок 8 – Контурные распределения массовой доли H_2 на расстоянии 10, 20, 30 и 45 м от ввода конвертерного газа

Протекающая химическая реакция изменяет исходный конвертерный газ, образуя новый состав синтез-газа со следующими объемными долями: CO – 0,75, N_2 – 0,1047, H_2 – 0,1453 (данные о объемном составе образовавшейся топливной смеси и исходном конвертерном газе представлены в таблице).

Состав рассматриваемого конвертерного газа и образовавшейся топливной смеси

Состав конвертерного газа, %				
CO	CO_2	N_2	H_2	Всего
74	13	13	0	100
Состав топливной смеси, %				
CO	CO_2	N_2	H_2	Всего
75	0	10,47	14,53	100
Теплота сгорания, МДж/м ³				
12,64	0	0	10,79	–

В результате проведенных расчетов было установлено, что при текущих размерах и параметрах работы газохода для полной конверсии 18,31 м³ конвертерного газа (КГ) необходимо 2,38 м³ природного газа (ПГ). В результате конверсии объем синтез-газа (СГ) составит 20,69 м³. При приведении к 1 м³ конвертерного газа итоговое выражение имеет вид:

$$1 \text{ м}^3 \text{ КГ} + 0,13 \text{ м}^3 \text{ ПГ} = 1,39 \text{ м}^3 \text{ СГ}. \quad (2)$$

Для оценки эффективности полученного синтез-газа было проведено сравнение низшей теплоты сгорания исходного конвертерного газа с новообразовавшейся топливной смесью по формулам:

$$Q_{\text{нКГ}}^p = 0,01 \cdot (Q_{CO} \cdot CO); \quad (3)$$

$$Q_{\text{нСГ}}^p = 0,01 \cdot (Q_{CO} \cdot CO + Q_{H_2} \cdot H_2). \quad (4)$$

В результате расчета полученный синтез-газ имеет низшую теплоту сгорания, равную 11,05 МДж/м³ против 9,35 МДж/м³ для исходного конвертерного газа.

Отсюда энергетическая (тепловая) эффективность на 1 м³ конвертерного газа составит:

$$\Xi = \frac{G_{CG}}{G_{KG}} \cdot \frac{Q_{HCG}^p}{Q_{HKG}^p} = \frac{1,39}{1} \cdot \frac{11,05}{9,35} = 1,64. \quad (5)$$

Кроме того, на изображенных на рисунках 9, 10 контурах распределения температур видно, что в результате протекания реакции происходит охлаждение топливной смеси.

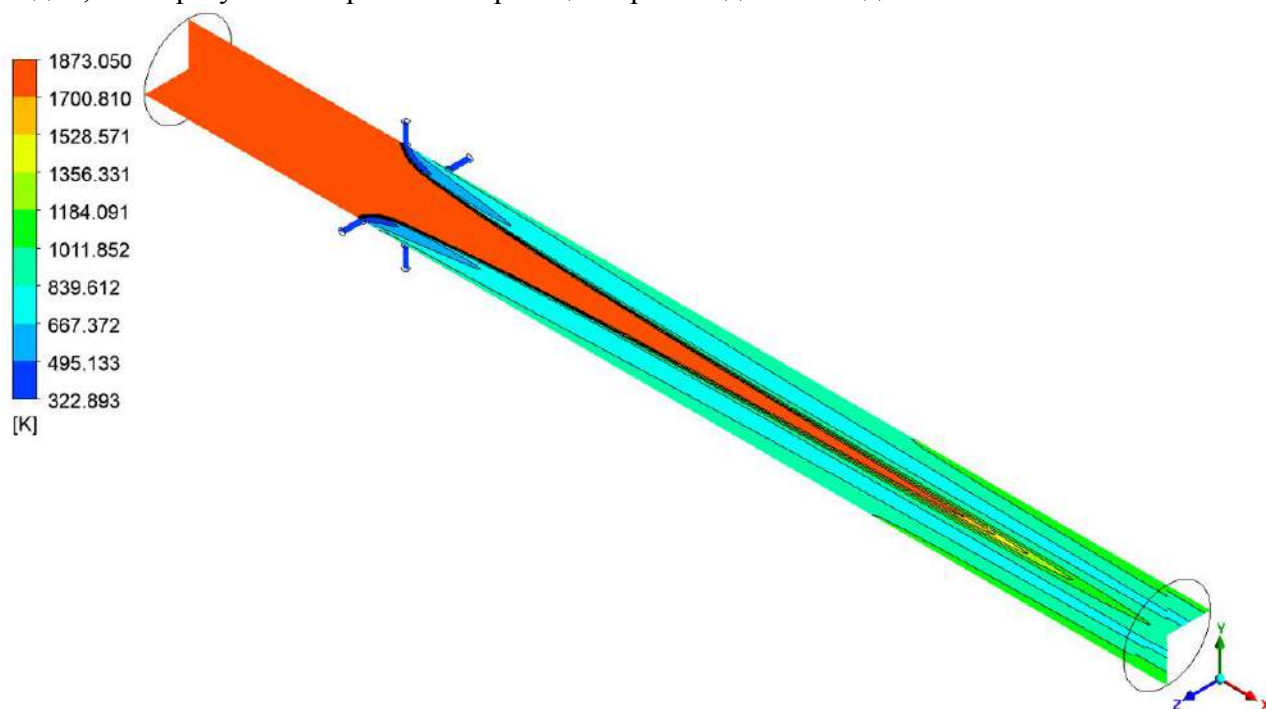


Рисунок 9 – Контур распределения температуры газа

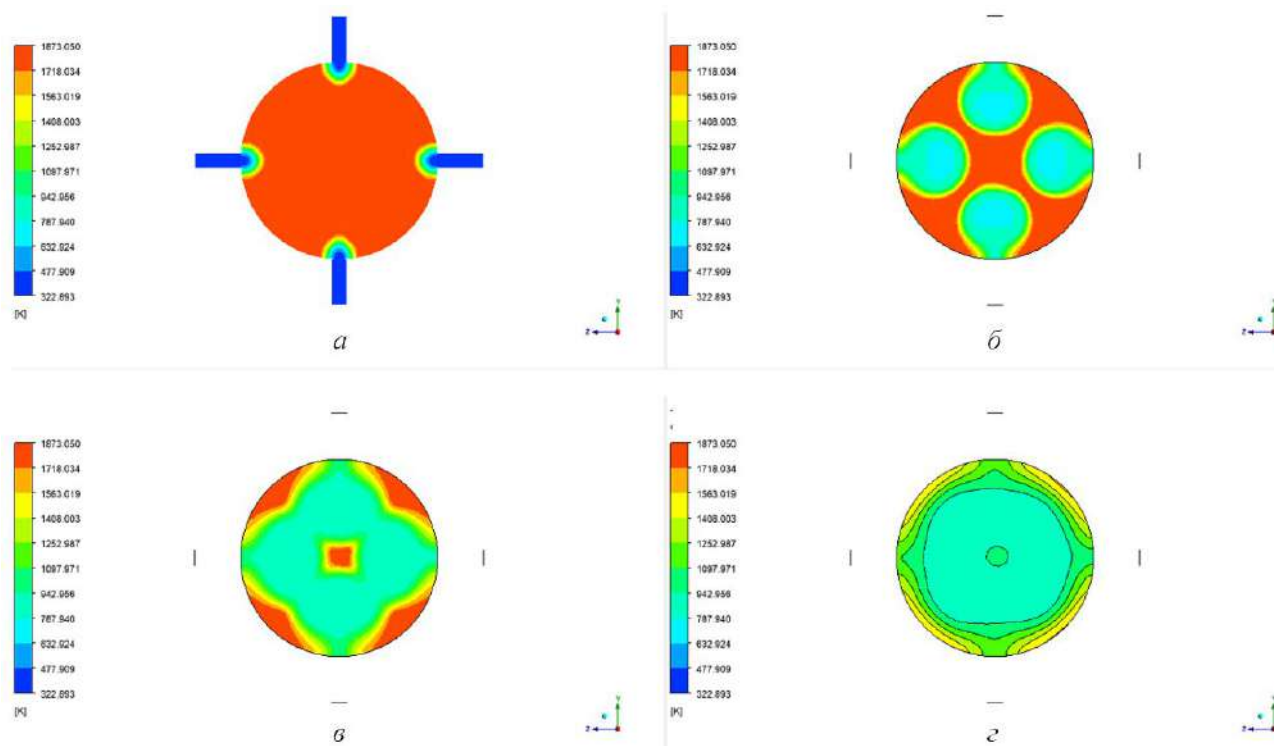


Рисунок 10 – Контур распределения температуры потока на расстоянии 10, 20, 30 и 45 м от ввода конвертерного газа

Для более наглядного отображения результатов расчета изменения температуры был построен график (рисунок 11) распределения температур на разном удалении от оси движения потока.

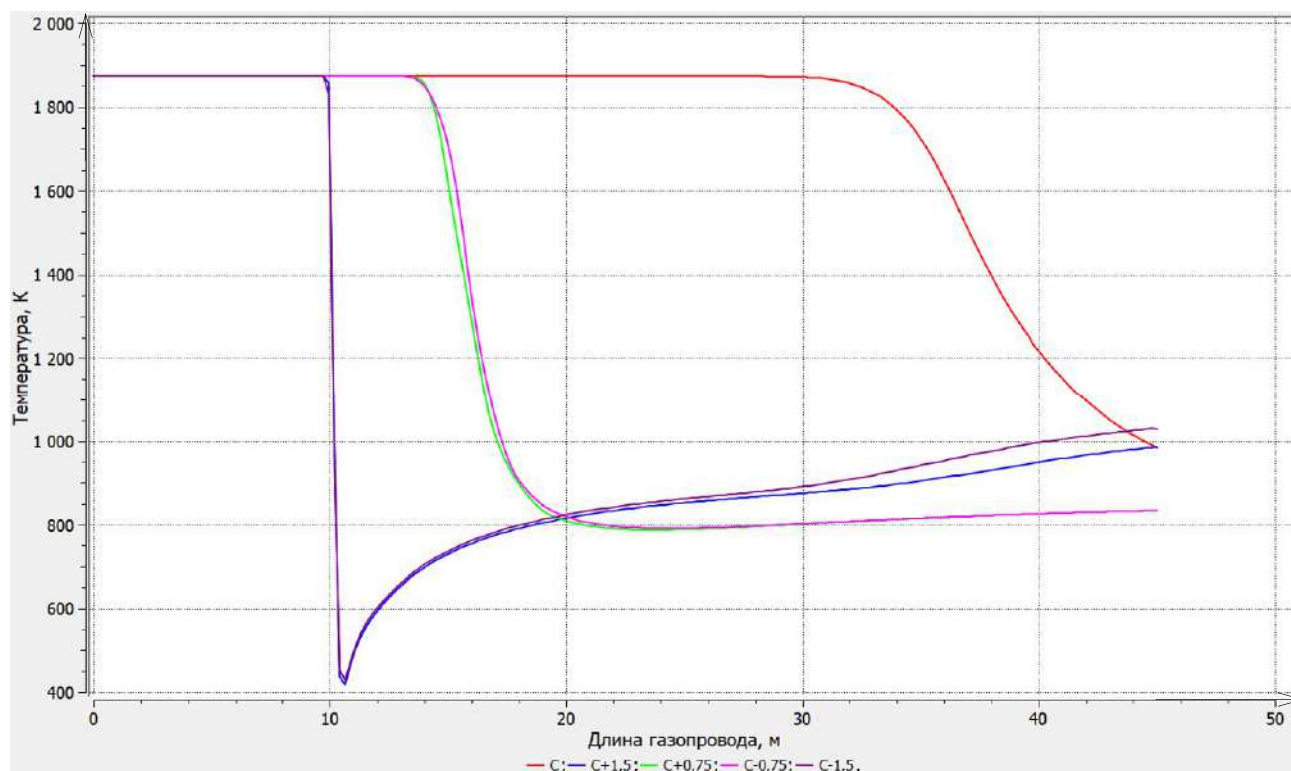


Рисунок 11 – График распределения температуры газа: C – центр потока; $C + 0,75$ ($- 0,75$) – температура потока на удалении $\pm 0,75$ м; $C + 1,5$ ($- 1,5$) – температура потока на удалении $\pm 1,5$ м

Из графика температуры газа (см. рисунок 11) видно, что средняя температура смеси на выходе из газопровода составляет 1018,16 К, благодаря чему тепловое воздействие полученной топливной смеси на поверхности нагрева снижается. Кроме того, полученная газовая смесь пригодна для утилизации в топках котлов утилизаторов для получения тепловой энергии в паре и, как следствие, для получения электрической энергии на турбогенераторах.

Таким образом, в результате исследования было установлено, что добавление природного топлива к высокотемпературному потоку конвертерного газа не только способствует снижению тепловой нагрузки на поверхности нагрева, но и позволяет использовать полученную смесь в качестве вторичного энергоресурса с улучшенной на 64 % тепловой эффективностью с целью получения «бесплатной» электрической или тепловой энергии вместо утилизации теплового потенциала исходного конвертерного газа на газовых свечах.

Список литературы

1. Исследование горения механоактивированных углей микропола / А. П. Бурдуков, В. И. Попов, В. А. Фалеев, Т. С. Юсупов. – Текст : непосредственный // Горение твердого топлива : сборник докладов VII Всероссийской конференции с международным участием : в 3 частях / Институт теплофизики СО РАН. – Новосибирск, 2009. – Ч. 2. – С. 27–33.
2. Суфиянов, Р. Ш. Конверсия природного газа / Р. Ш. Суфиянов. – Текст : непосредственный // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 69-1. – С. 142–145. – DOI 10.18411/lj-01-2021-39. – EDN FSJRPZ.
3. Голдобин, Д. Д. Моделирование и верификация горелочного устройства для производства водорода автотермической конверсией природного газа / Д. Д. Голдобин, А. А. Борисов, С. Н. Петин. – Текст : непосредственный // Состояние и перспективы развития

электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения) : материалы международной научно-технической конференции / Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина. – Иваново, 2023. – Т. 2. – С. 213–215. – EDN PWSIYY.

4. Arroyo J., Perez L., Cuervo-Pinera V. CFD Modeling and Validation of Blast Furnace Gas/Natural Gas Mixture Combustion in an Experimental Industrial Furnace, *Technologies for Climate-Neutral Energy Systems*, 2023, vol. 11, iss. 2, pp. 1-24. <https://doi.org/10.3390/pr11020332>.

5. Гиззатуллин, А. Р. Разработка и верификация многокомпонентной модели паровой конверсии метана / А. Р. Гиззатуллин, А. А. Филимонова, Н. Д. Чичирова. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26. – № 4. – С. 124–135. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-4-124-135. – EDN QKHEYB.

6. Shaymardanov T.B. The main characteristics of steam-carbon-dioxide conversion of methane, *Universum: Chemistry and Biology*, 2021, vol. 10-2., pp. 88-94.

7. Ghoneim, S. A., El-Salamony, R. A., & El-Temtamy, S. A. (2016). Review on innovative catalytic reforming of natural gas to syngas. *World Journal of Engineering and Technology*, 4(01), 116-139.

8. Конверсия углеродсодержащих материалов в среде высокотемпературного водяного пара / Н. А. Прибатурин, А. Р. Богомолов, М. В. Алексеев, С. А. Шевырев. – Текст : непосредственный // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 4 (80). – С. 89–93.

9. Равич, М. Б. Топливо и эффективность его использования / М. Б. Равич. – Москва : Наука, 1971. – 358 с. – Текст : непосредственный.

10. Батурин, О. В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent / О. В. Батурин, Н. В. Батурин, В. Н. Матвеев. – Самара : Самарский государственный аэрокосмический университет, 2009. – 151 с. – Текст : непосредственный.

11. Зиганшин, А. М. Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent / А. М. Зиганшин. – Казань : Казанский гос. архитектурно-строительный ун-т, 2013. – 79 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Burdukov A.P., Popov V.I., Faleev V.A., Yusupov T.S. [Study of combustion of mechanically activated micropole coals] *Gorenie tverdogo topliva: sbornik dokladov VII Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Combustion of solid fuel: collection of reports of the VII All-Russian conference with international participation]. Novosibirsk, 2009, part 2, pp. 27-33. (In Russian).

2. Sufianov R.S. Conversion of natural gas. *Tendentsii razvitiia nauki i obrazovaniia – Trends in the development of science and education*, 2021, no. 69-1, pp. 142-145. DOI 10.18411/lj-01-2021-39. EDN FSJRPZ. (In Russian).

3. Goldobin D.D., Borisov A.A., Petin S.N. [Modeling and verification of a burner device for the production of hydrogen by autothermal reforming of natural gas] *Sostojanie i perspektivy razvitiia jelektro- i teplotehnologii (XXII Benardosovskie chtenija) : Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [The state and prospects of development of electrical and thermal technology (XXII Benardos Readings): Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Ivanovo, 2023, vol. 2, pp. 213-215. EDN PWSIYY. (In Russian).

4. Arroyo J., Perez L., Cuervo-Pinera V. CFD Modeling and Validation of Blast Furnace Gas/Natural Gas Mixture Combustion in an Experimental Industrial Furnace, *Technologies for Climate-Neutral Energy Systems*, 2023, vol. 11, iss. 2, pp. 1-24. <https://doi.org/10.3390/pr11020332>.

5. Gizzatullin A.R., Filimonova A.A., Chichirova N.D. Development and verification of a multi-component model for steam methane reforming. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki – Power engineering: research, equipment, technology*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 124-135. DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-4-124-135. EDN QKHEYB. (In Russian).

6. Shaymardanov T.B. The main characteristics of steam-carbon-dioxide conversion of methane, *Universum: Chemistry and Biology*, 2021, vol. 10-2., pp. 88-94.
7. Ghoneim, S. A., El-Salamony, R. A., & El-Temtamy, S. A. (2016). Review on innovative catalytic reforming of natural gas to syngas. *World Journal of Engineering and Technology*, 4(01), 116-139.
8. Pribaturin N.A., Bogomolov A.R., Alekseev M.V., Shevyrev S.A. Conversion of carbon-containing materials in the medium of high-temperature water vapor. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2010, no. 4(80), pp. 89-93. EDN MUJRDY. (In Russian).
9. Ravich M.B. *Toplivo i jeffektivnost' ego ispol'zovanija* [Fuel and efficiency of its use]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 358 p. (In Russian).
10. Baturin O.V., Baturin N.V., Matveev V.N. *Raschet techenij zhidkostej i gazov s pomoshh'ju universal'nogo programmnogo kompleksa Fluent* [Calculation of liquid and gas flows using the universal Fluent software package]. Samara, Samara State Aerospace University Publ., 2009, 151 p. (In Russian).
11. Ziganshin A.M. *Vychislitel'naja gidrodinamika. Postanovka i reshenie zadach v processore Fluent* [Computational hydrodynamics. Setting and solving tasks in the Fluent processor]. Kazan, Kazan State Architectural and Construction University Publ., 2013, 79 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Губарев Василий Яковлевич

Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ).

Московская ул., д. 30, г. Липецк, 398055, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, ЛГТУ.

Тел.: +7 (910) 742-98-65.

E-mail: gv_lipetsk@rambler.ru

Бавыкин Михаил Антонович

Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ).

Московская ул., д. 30, г. Липецк, 398055, Российская Федерация.

Аспирант 1-го курса кафедры промышленной теплоэнергетики, ЛГТУ.

Тел.: +7 (919) 168-92-94.

E-mail: bavykin.mikhail@yandex.ru

Ярцев Алексей Геннадьевич

Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ).

Московская ул., д. 30, г. Липецк, 398055, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, ЛГТУ.

Тел.: +7 (999) 788-24-98.

E-mail: yartsev.ag@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Губарев, В. Я. Применение конверсии природного газа в высокотемпературной среде / В. Я. Губарев, М. А. Бавыкин, А. Г. Ярцев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 117 – 126.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gubarev Vasily Yakovlevich

Lipetsk State Technical University (LSTU).

Moskovskaya st., 30, Lipetsk, 398055, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, professor, head of the department of Industrial Thermal Power Engineering, LSTU.

Phone: +7 (910) 742-98-65.

E-mail: gv_lipetsk@rambler.ru

Bavykin Mikhail Antonovich

Lipetsk State Technical University (LSTU).

Moskovskaya st., 30, Lipetsk, 398055, the Russian Federation.

1st year postgraduate student of the department of Industrial Thermal Power Engineering, LSTU.

Phone: +7 (919) 168-92-94.

E-mail: bavykin.mikhail@yandex.ru

Yartsev Alexey Gennadievich

Lipetsk State Technical University (LSTU).

Moskovskaya st., 30, Lipetsk, 398055, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the Department of Industrial Thermal Power Engineering, LSTU.

Phone: +7 (999) 788-24-98.

E-mail: yartsev.ag@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gubarev V.Ya., Bavykin M.A., Yartsev A.G. Application of natural gas conversion in high temperature environment. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2(62), pp. 117-126. (In Russian).

А. С. Дробязко¹, С. А. Рыжаков¹, Н. Г. Мудрая²

¹Красноярский институт железнодорожного транспорта (КрИЖТ) – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), г. Красноярск, Российская Федерация;

²Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

АНАЛИЗ СИГНАЛОВ, ФОРМИРУЕМЫХ МАГНИТНЫМ ДАТЧИКОМ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИБЛИЖАЮЩЕГОСЯ СОСТАВА, В СИСТЕМЕ ОПОВЕЩЕНИЯ РАБОТАЮЩИХ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЯХ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы повышения безопасности при выполнении производственных работ вблизи железнодорожных путей, сопряженных с высоким уровнем риска для персонала. Целью настоящей работы является разработка и обоснование перспективной системы оповещения рабочих бригад о приближении подвижного состава, способной повысить эффективность мер безопасности на объектах железнодорожной инфраструктуры.

Методологической основой исследования послужили анализ причин несчастных случаев, связанных с недостатками существующих систем оповещения и моделирование сигнала, генерируемого электромагнитным датчиком при прохождении гребня колеса над ним. Для реализации системы предложено использование сети LoRaWAN и радиомодулей LoRa, объединенных с микроконтроллерами Arduino. В рамках исследования разработаны структурная схема системы и рабочий макет, включающие в себя передающие устройства с датчиком обнаружения состава и приемные устройства, интегрированные в сигнальные жилеты работников.

В результате работы получена математическая модель сигнала, формируемого при изменении магнитного потока, вызванного приближением колеса к датчику. Доказана зависимость величины электродвижущей силы от положения колеса относительно катушки, являющейся частью конструкции датчика. Построены графики зависимости магнитного потока и индуцируемого сигнала от координаты прохождения.

Предлагаемая система может быть применена в качестве основного или вспомогательного средства оповещения при проведении ремонтных и иных работ вблизи путей.

Сделан вывод о перспективности разработки для внедрения в систему промышленной безопасности ОАО «РЖД». Предлагаемая система обладает высокой потенциальной эффективностью, может функционировать автономно и независимо от погодных условий, а также служить надежным дополнением к работе сигнальщиков. Внедрение данной технологии может способствовать значительному снижению производственного травматизма на объектах железнодорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: система оповещения, безопасность персонала, LoRaWAN, электромагнитный датчик, ШМПИ2, опасность.

Alexey S. Drobyazko¹, Semyon A. Ryzhakov¹, Natalia G. Mudraya²

¹Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (KRIZHT) is a branch of Irkutsk State University of Railway Transport (IrGUPS), Krasnoyarsk, Russian Federation;

²Irkutsk State University of Railway Transport (IrGUPS), Irkutsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF SIGNALS GENERATED BY A MAGNETIC SENSOR FOR DETECTING AN APPROACHING TRAIN IN A WARNING SYSTEM OPERATING ON RAILWAY TRACKS

Abstract. The article discusses the issues of improving safety when performing production work near railway tracks, which are associated with a high level of risk for personnel. The purpose of this work is to develop and substantiate a promising system for notifying work crews about the approach of rolling stock, which can increase the effectiveness of safety measures at railway infrastructure facilities.

The methodological basis of the study was the analysis of the causes of accidents related to the shortcomings of existing warning systems, as well as modeling the signal generated by an electromagnetic sensor when the wheel crest passes over it. To implement the system, it is proposed to use the LoRaWAN network and LoRa radio modules combined with Arduino microcontrollers. As part of the research, a structural diagram of the system and a working layout have been developed, including transmitting devices with a composition detection sensor and receiving devices integrated into workers' signal vests.

As a result, a mathematical model of the signal generated by a change in the magnetic flux caused by the wheel approaching the sensor has been obtained. The dependence of the magnitude of the electromotive force on the position

of the wheel relative to the coil is proved. Graphs of the dependence of the magnetic flux and the induced signal on the transit coordinate are constructed.

The proposed system can be used as the main or auxiliary means of notification during repair and other work near the tracks.

The conclusion is made about the prospects of the development for implementation in the industrial safety system of Russian Railways. The proposed system has high potential efficiency, can function independently and independently of weather conditions, and also serve as a reliable complement to the work of alarm systems. The introduction of this technology can significantly reduce occupational injuries at railway infrastructure facilities.

Keywords: warning system, personnel safety, LoRaWAN, electromagnetic sensor, SHMP12, danger.

Обеспечение безопасности при осуществлении технологического процесса на производстве является ключевым аспектом в компании ОАО «РЖД» [1]. Работы, выполняемые вблизи железнодорожных путей, несут в себе повышенную опасность для персонала.

Для предупреждения несчастных случаев в настоящее время на сети железных дорог используются специальные работники – сигналисты, в трудовые обязанности которых входят мониторинг за поездной обстановкой в местах проведения работ и предупреждение работников о приближении состава. После получения сигнала об опасности (при помощи радиосвязи, световой и звуковой сигнализации) работники обязаны немедленно прекратить выполнение любых работ и сойти с путей на безопасное расстояние до полного прохождения подвижной единицы [2, 3].

Однако, несмотря на повышенные меры безопасности и работу сигналистов, несчастные случаи все же происходят. Так, согласно статистическим данным, в ЦДИ и ЦДРП за 2023 год было зарегистрировано более 40 случаев производственных травм работников, причем 11 из них оказались смертельными.

Возникновению несчастных случаев способствует совокупность факторов: неблагоприятные метеоусловия (например, туман или метель), сложный рельеф местности (в частности, кривые участки пути, заросшие лесом территории), что отрицательно сказывается на дальности видимости; повышенный уровень шумов в зоне выполнения работ, снижение внимательности, физическое переутомление и усталость сигналистов и работников [2, 3].

С целью решения обозначенной проблемы предлагается разработка и внедрение перспективной системы оповещения работников о приближающемся составе, которая базируется на использовании сети LoRaWAN с применением радиомодулей LoRa. Система может использоваться как основное или вспомогательное средство оповещения и состоит из приемного и передающего устройств [4 – 6].

Принцип работы системы основан на постоянном обмене данными между модулями LoRa. Перед началом проведения работ два передатчика устанавливаются на расстоянии 1 км от рабочей зоны и активируется приемник в сигнальных жилетах. При проходе поездного состава над датчиком формируется сигнал, который передается на жилеты (приемник): включается световая индикация и подается звуковой сигнал, информирующие о необходимости немедленно прекратить работы и покинуть опасную зону. После прохождения поезда сигнализация отключается, что говорит о разрешении продолжения выполнения работ.

Предусматривается использование системы, состоящей из двух передающих и трех приемных устройств. Передающая часть будет оснащена микропроцессорной платой Arduino Mega, датчиком обнаружения приближающегося состава, автономным источником питания (солнечная панель), аккумулятором, модулем радиосвязи LoRa и необходимыми соединительными элементами [4 – 6].

Микроконтроллер Arduino выполняет следующие функции:

- считывание сигнала от магнитного датчика обнаружения (ШМП12);
- обработка входного сигнала и принятие решения о передаче оповещения;
- управление радиомодулем LoRa для передачи сигнала тревоги на приемные устройства.

Алгоритм работы микроконтроллера реализуется следующим образом:

- 1) микроконтроллер находится в режиме ожидания сигнала от датчика;

2) при обнаружении поезда датчиком формируется импульс, который поступает на микроконтроллер;

3) при фиксации сигнала микроконтроллер активирует модуль LoRa и передает тревожное сообщение;

4) после прекращения поступления сигнала от датчика передача пакетов прекращается, и устройство возвращается в режим ожидания (энергосберегающий режим).

Приемное устройство встроено в сигнальный жилет работника. Оно включает в себя плату Arduino Micro, модуль радиосвязи LoRa, релейный модуль Arduino, световые и звуковые средства оповещения, элементы питания (АКБ) и соединительную проводку [4 – 6].

В составе приемного модуля системы оповещения микроконтроллер выполняет следующие функции:

- прием радиосигнала от LoRa-модуля, установленного на передатчике;

- анализ принятого сигнала на предмет тревожного оповещения;

- управление средствами звуковой и световой сигнализации, встроенными в жилет работника;

- переход в энергосберегающий режим при отсутствии сигнала с приемного устройства.

Алгоритм работы приемного микроконтроллера реализуется следующим образом:

1) микроконтроллер находится в режиме прослушивания LoRa-канала;

2) при получении сигнала тревоги от передатчика происходит его распознавание;

3) в ответ на сигнал активируются светодиодные индикаторы и звуковой зуммер, встроенные в жилет;

4) после прекращения тревожного сигнала система выключает оповещение и возвращается в режим ожидания;

5) в периоды бездействия контроллер работает в энергосберегающем режиме, что увеличивает срок автономной работы системы.

В ходе разработки проекта был сконструирован макетный образец (состоящий из двух передатчиков и трех приемников), демонстрирующий основные характеристики будущего устройства. В качестве датчика обнаружения подвижного состава в образце используется кнопка, имитирующая проезд поезда над передатчиком (кнопка будет заменена электромагнитным датчиком обнаружения состава ШМП12). Источниками питания являются портативные аккумуляторные батареи (power banks). Внешний вид передатчика и приемника представлен на рисунках 1 и 2 соответственно.

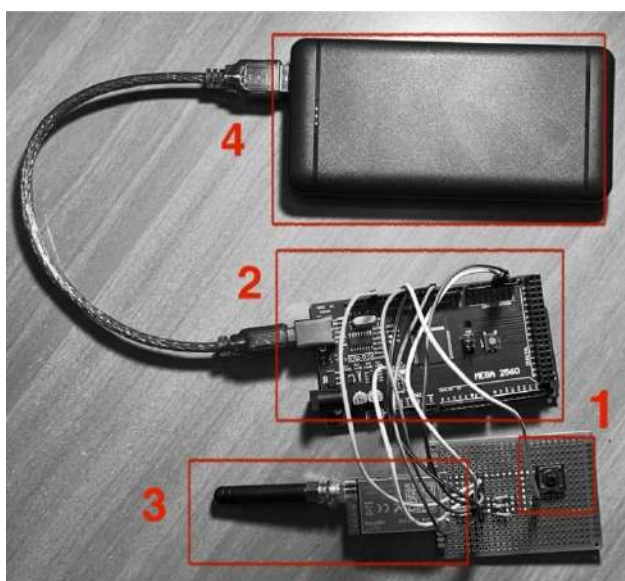


Рисунок 1 – Внешний вид передающей части макета:

1 – кнопка, имитирующая проезд поезда; 2 – микропроцессорная плата Arduino Mega;

3 – модуль беспроводной связи LoRa; 4 – источник питания (power banks)

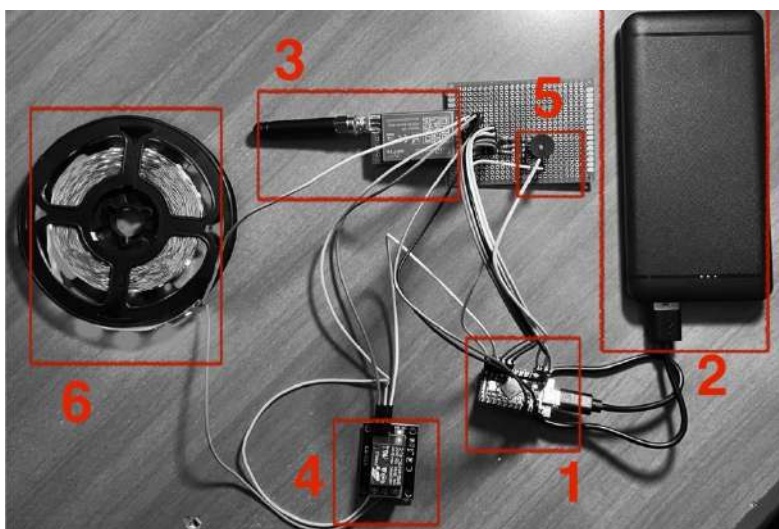


Рисунок 2 – Внешний вид приемной части макета: 1 – микропроцессорная плата Arduino Micro;
2 – источник питания (power banks); 3 – модуль беспроводной связи LoRa; 4 – реле Arduino;
5 – источник звуковой сигнализации; 6 – светодиодная лента (световая сигнализация)

На рисунке 3 представлен сигнальный жилет (соответствует ГОСТ Р 12.4.219–99). Жилет оборудован разрабатываемой системой оповещения: в него встроены приемник и устройства сигнализации (светодиодная лента и пьезоэлектрический зуммер).



Рисунок 3 – Модернизированный сигнальный жилет со встроенной системой оповещения:
1 – приемный модуль (контроллер), обеспечивающий прием сигнала от передатчика и управление звуковой и световой индикацией; 2 – светодиодная лента, обеспечивающая визуальное оповещение работников в случае приближения подвижного состава

В качестве датчика обнаружения состава предполагается использование электромагнитного датчика ШМП12, который уже эксплуатируется в составе устройств ДИСК и КТСМ. Он представляет собой модернизированную версию устаревшего датчика ШМП93 [7].

Принцип работы датчика заключается в следующем: катушка закреплена внутри головки на металлическом основании, а в ее центре расположен постоянный магнит. При установке

датчика зазор между ним и головкой рельса подбирается так, чтобы при прохождении колеса сохранялось минимальное расстояние между магнитом и гребнем, достаточное для предотвращения их соприкосновения даже при наибольшем возможном вертикальном ходе колеса. Установка датчика осуществляется на внутренней части рельса – подошве, а его конструктивные особенности предотвращают смещение магнита внутри катушки под воздействием вибраций от проезжающего состава, что позволяет значительно снизить уровень электрических помех [7 – 9]. Конструкция датчика и способ его установки представлены на рисунке 4.

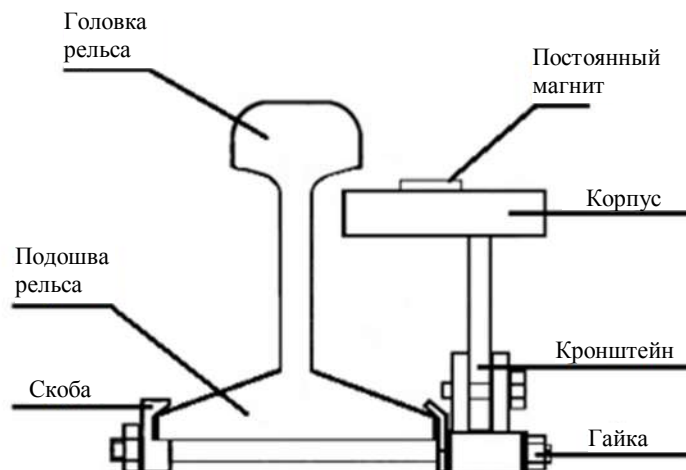


Рисунок 4 – Конструкция датчика и способ его установки на рельс

Основа работы магнитного датчика обнаружения состава заключается в явлении электромагнитной индукции. Когда гребень колеса приближается к датчику, магнитный поток возрастает, что вызывает появление в катушке, размещенной в корпусе датчика, ЭДС в форме колоколообразного импульса. При удалении гребня из зоны чувствительности магнитное поле уменьшается и в катушке возникает ЭДС с противоположной полярностью [7 – 9].

ЭДС индукции находится в прямой зависимости от скорости изменения магнитного потока через площадь, охватываемую замкнутым контуром, что соответствует основному положению закона электромагнитной индукции Фарадея:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где $\frac{d\Phi}{dt}$ – скорость изменения магнитного потока.

Площадь сектора (см. рисунок 4) окружности колеса

$$S_{\text{сек}} = S_{\text{сег}} - S_{\text{треуг}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{сег}}$ – площадь сегмента окружности колеса;

$$S_{\text{сег}} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot R = \pi \cdot \Theta \cdot R^2, \quad (3)$$

где $R = 0,625$ м – радиус колеса;

$S_{\text{треуг}}$ – площадь треугольника, вписанного в полуокружность колеса;

$$S_{\text{треуг}} = \frac{h \cdot l(x)}{2}, \quad (4)$$

где $l(x)$ – длина хорды прямой, идущей от точки соприкосновения колеса с рельсом x ,

$$l(x) = R \cdot \sqrt{\frac{x}{R} \cdot \left(2 \cdot \frac{x}{R}\right)}; \quad (5)$$

h – высота треугольника, вписанного в полуокружность колеса,

$$h = R \cdot \cos \Theta = R \cdot \cos \left(\arcsin \left(\frac{l(x)}{R} \right) \right), \quad (6)$$

где Θ – центральный угол.

Изменение площади окружности колеса в зависимости от точки соприкосновения с рельсом

$$S_{OK}(x) = \pi \cdot \Theta \cdot R^2 - \frac{h \cdot l(x)}{2} = \pi \cdot \arcsin \left(\frac{l(x)}{R} \right) \cdot R^2 - \frac{R \cdot \cos \left(\arcsin \left(\frac{l(x)}{R} \right) \right) \cdot l(x)}{2}. \quad (7)$$

Реально же площадь колеса представляет

$$S_{OK}(x) + S_{бан}(x), \quad (8)$$

где $S_{OK}(x)$ – площадь окружности колеса;

$S_{бан}$ – площадь бандажа колеса,

$$S_{бан}(x) = b \cdot L = b \cdot R \cdot \Theta = b \cdot R \cdot \arcsin \left(\frac{l(x)}{R} \right), \quad (9)$$

где $b = 0,014$ м – толщина бандажа, L – длина окружности колеса.

Изменение площади колеса в зависимости от точки соприкосновения с рельсом (рисунок 5):

$$S(x) = \pi \cdot \Theta \cdot R^2 - \frac{h \cdot l(x)}{2} = \pi \cdot \arcsin \left(\frac{l(x)}{R} \right) \cdot R^2 - \frac{R \cdot \cos \left(\arcsin \left(\frac{l(x)}{R} \right) \right) \cdot l(x)}{2} + b \cdot R \cdot \arcsin \left(\frac{l(x)}{R} \right). \quad (10)$$

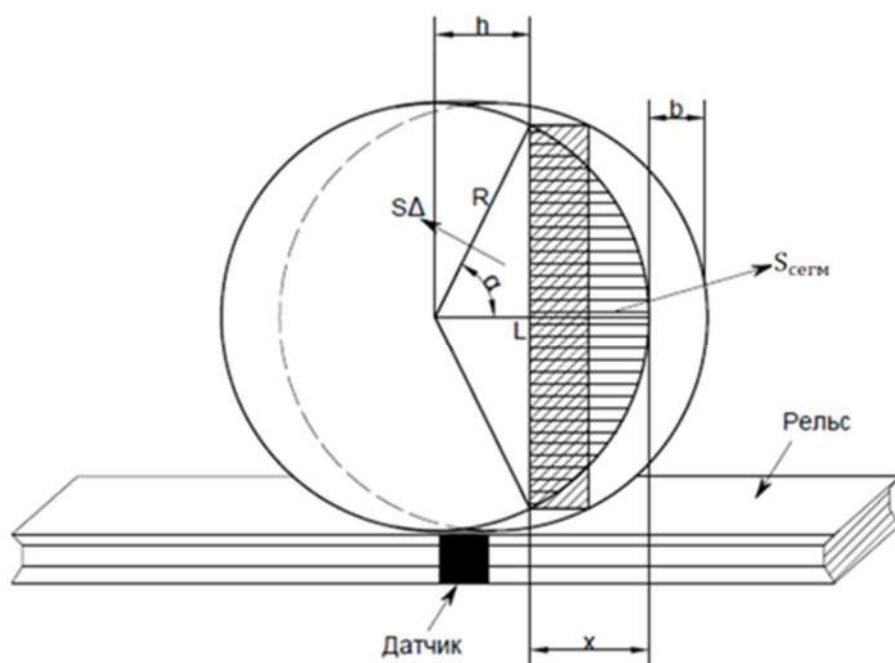


Рисунок 5 – Схематическое описание процесса нахождения зависимости изменения площади колеса от точки соприкосновения с рельсом

График зависимости $S(x)$ приведен на рисунке 6.

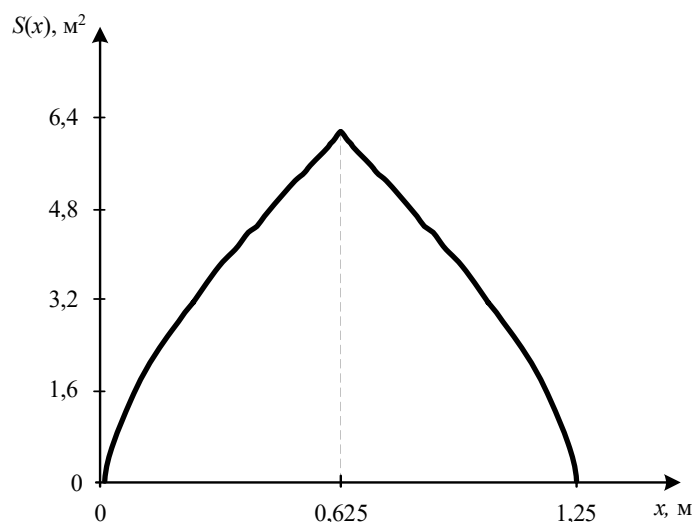


Рисунок 6 – Изменение площади в зависимости от точки соприкосновения с рельсом

В датчике ШМП12 магнитное поле создается постоянным магнитом, а приемная катушка не питается внешним током и служит лишь для съема индуцированной ЭДС. Поэтому следует применять такую модель магнитного потока:

$$\Phi(x) = \frac{F_{\text{маг}}}{R_{Fe} + R_{\text{возд}}(x)}, \quad (11)$$

где $F_{\text{маг}}$ – эквивалентная МДС постоянного магнита;

R_{Fe} – магнитное сопротивление стальной части (корпус датчика и головка рельса),

$R_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \cdot \mu_{Fe} \cdot A_{Fe}}$, где l_{Fe} (удельная намагниченность железа, $\frac{A}{m}$), A_{Fe} (площадь поперечного сечения сердечника из железа, m^2), μ_{Fe} (магнитная проницаемость материала сердечника) задаются геометрией и характеристиками материалов;

$R_{\text{возд}}(x)$ – магнитное сопротивление воздушного зазора между торцом магнита и гребнем колеса, $R_{\text{возд}}(x) = \frac{d_{\text{заз}}(x)}{\mu_0 \cdot S_{\text{торца}}}$, причем $d_{\text{заз}}(x) = d_0 - h(x) = d_0 - (R - \sqrt{R^2 - x^2})$, R – радиус колеса, x – смещение гребня относительно «нулевой точки», $S_{\text{торца}}$ – площадь поперечного сечения торца магнита.

Индукцированное напряжение катушки (ЭДС) определяется законом Фарадея:

$$e(x) = \frac{d\Phi(x)}{dt} = \frac{d\Phi(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{d\Phi(x)}{dx} \cdot v, \quad (12)$$

где v – скорость колесной пары.

Поскольку $x(t) = v \cdot t$, то $\frac{dx}{dt} = v$.

Без учета переменного магнитного сопротивления воздушного зазора $R_{\text{возд}}(x) = 0$ получаем слишком «плавную» форму $\Phi(x)$ и почти симметричный импульс $e(x)$.

Реально же учет $R_{\text{возд}}(x)$ (из-за малого μ_0 воздуха и изменяющегося зазора $d_{\text{заз}}(x)$) дает резкий рост $\Phi(x)$ при входе гребня в зону датчика и более пологий спад при выходе, что полностью соответствует экспериментальным осциллограммам ШМП12.

Графики зависимостей $\Phi(x)$ и $e(x)$ приведены на рисунке 7.

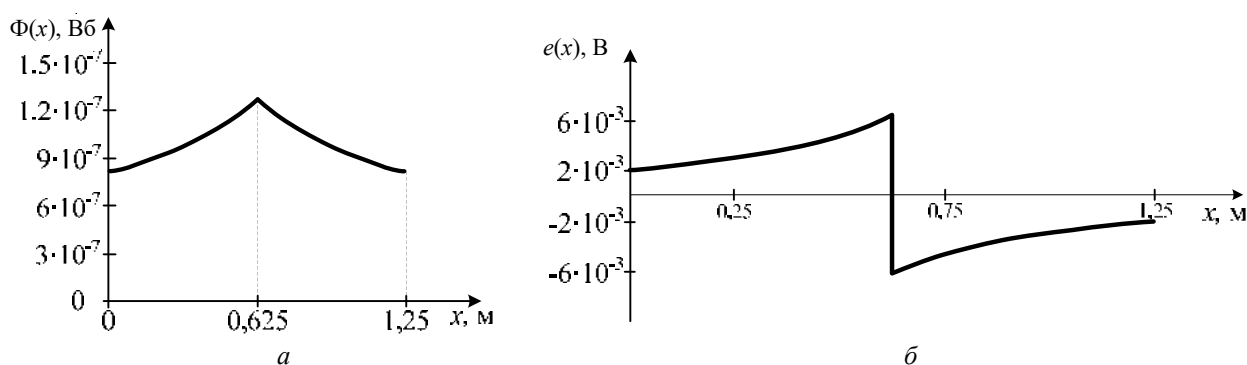


Рисунок 7 – Зависимость магнитного потока от параметра x (а) и математическая модель сигнала, возникающего при перемещении гребня колеса над датчиком (б)

В результате проведенного исследования получены следующие результаты.

1. Разработана и реализована концепция автономной системы оповещения о приближении подвижного состава, предназначенной для повышения безопасности работников, осуществляющих работы вблизи железнодорожных путей. Система использует электромагнитный датчик ШМП12 и беспроводную связь по технологии LoRaWAN.

2. Построена математическая модель электродвижущей силы, индуцируемой в катушке датчика при прохождении гребня колеса. Учтено изменение магнитного потока с учетом переменного воздушного зазора, что позволило достоверно описать форму реального сигнала.

3. Подтверждена зависимость амплитуды ЭДС от координаты прохождения колеса, показана асимметрия формы сигнала, совпадающая с экспериментальными осциллограммами, что указывает на корректность предложенной модели.

4. Разработан макетный образец системы, включающий в себя передающие модули с датчиками и приемные модули, встроенные в сигнальные жилеты, что подтвердило техническую реализуемость предложенной схемы.

5. Установлено, что предлагаемая система способна функционировать в автономном режиме, независимо от погодных условий и человеческого фактора, и может использоваться как основное или резервное средство оповещения.

Таким образом, полученные научные и технические результаты подтверждают перспективность внедрения разработанной системы в практику обеспечения промышленной безопасности на объектах железнодорожной инфраструктуры, в том числе в системе безопасности ОАО «РЖД».

Список литературы

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-п) // static.government.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (дата обращения: 14.04.2025).

2. Распоряжение ОАО «РЖД» от 18.06.2024 № 1459р «О внесении изменений в Правила по безопасному нахождению работников ОАО «РЖД» на железнодорожных путях» (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 24 декабря 2012 г. № 2665р) // garant.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://base.garant.ru/409333510/> (дата обращения: 14.04.2025).

3. Распоряжение ОАО «РЖД» от 24.12.2012 № 2665р «Об утверждении Правил по безопасному нахождению работников ОАО «РЖД» на железнодорожных путях» // <https://www.consultant.ru/> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=550752#xZcpGqUd7a5V4911> (дата обращения: 15.04.2025).

4. Рыжаков, С. А. Разработка системы оповещения рабочих бригад об опасности / С. А. Рыжаков, А. С. Дробязко. – Текст : непосредственный // Молодежная наука : труды XXVIII Всероссийской студенческой научно-практической конференции. Красноярск, 25 апреля 2024 г. / Иркутский государственный университет путей сообщения. – Красноярск, 2024. – С. 16–21. – EDN BFASZI.
5. Копылов, О. Д. Система контроля состояния сигнальной установки числовой кодовой автоблокировки с использованием радиоканала на базе модуля LoRa / О. Д. Копылов, Н. А. Семенов. – Текст : непосредственный // Молодежная наука : труды XXVIII Всероссийской студенческой научно-практической конференции. Красноярск, 25 апреля 2024 г. / Иркутский государственный университет путей сообщения. – Красноярск, 2024. – С. 30–35. – EDN YLDOPD.
6. Подключение модуля LoRa SX1278 (Ra-02) к Arduino // microkontroller.ru : сайт. – Текст : электронный – URL: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/podklyuchenie-modulya-lora-sx1278-ra-02-k-arduino/> (дата обращения: 14.04.2025).
7. Кукушкина, Н. С. Особенности применения датчиков прохода колес в системах контроля параметров подвижного состава / Н. С. Кукушкина, В. А. Алексеенко. – Текст : непосредственный // Молодая наука Сибири. – 2023. – № 1 (19). – С. 79–89. – EDN OXYRSW.
8. Магнитный точечный датчик прохода колес // scbist.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://scbist.com/scb/uploaded/sbor-inf-na-jd/7.htm> (дата обращения: 14.04.2025).
9. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 (approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r). Available at: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOpQhLI0nUT91RjCbeR.pdf> (accessed 14.04.2025). (In Russian).
2. Russian Railways Order No. 1459r dated 06/18/2024 "On Amendments to the Rules for the Safe Presence of Russian Railways Employees on Railway Tracks (approved by Russian Railways Order No. 2665r dated December 24, 2012)". Available at: <https://base.garant.ru/409333510/> (accessed 14.04.2025). (In Russian).
3. Russian Railways Order No. 2665r dated 12/24/2012 "On Approval of the Rules for the Safe Stay of Russian Railways Employees on Railway Tracks". Available at: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=550752#xZcpGqUd7a5V4911> (accessed 14.04.2025). (In Russian).
4. Ryzhakov S.A., Drobyazko A.S. [Development of a system for warning work crews about danger]. *Molodezhnaia nauka : trudy XXVIII Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Krasnoyarsk, 25 apreliia 2024 goda* [Youth science : Proceedings of the XXVIII All-Russian Student Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, April 25, 2024]. Krasnoyarsk, 2024, pp. 16-21. EDN BFASZI. (In Russian).
5. Kopylov O. D., Semenov N.A. [A system for monitoring the status of a numerical code auto-lock alarm system using a radio channel based on the LoRa module]. *Molodezhnaia nauka : trudy XXVIII Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Krasnoyarsk, 25 apreliia 2024 goda* [Youth science : Proceedings of the XXVIII All-Russian Student Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, April 25, 2024]. Krasnoyarsk, 2024, pp. 30-35. EDN YLDOPD. (In Russian).
6. *Podkliuchenie modul'ia LoRa SX1278 (Ra-02) k Arduino* [Connecting the LoRa SX1278 (Ra-02) module to the Arduino]. Available at: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/podklyuchenie-modulya-lora-sx1278-ra-02-k-arduino/> (accessed 14.04.2025).

7. Kukushkina N.S., Alekseenko V.A. Peculiarities of using wheel passage sensors in rolling stock parameter control systems. *Molodaia nauka Sibiri – Young science of Siberia*, 2023, no. 1(19), pp. 79-89. EDN OXYRSW. (In Russian).

8. *Magnitnyi tochechnyi datchik prokhoda koles* [Magnetic point sensor for wheel passage]. Available at: <http://scbist.com/scb/uploaded/sbor-inf-na-jd/7.htm> (accessed 14.04.2025).

9. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. *Osnovy teorii tsepei* [Fundamentals of circuit theory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 528 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дробязко Алексей Сергеевич

Красноярский институт железнодорожного транспорта (КРИЖТ) – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС).

Ладо Кецховели ул., д. 89, Новая Заря ул., д. 2и, г. Красноярск, 660028, Российская Федерация.

Студент кафедры «Системы обеспечения движения поездов», КРИЖТ – филиал ИрГУПС.

Тел.: +7 (9232) 15-90-22.

E-mail: alekseydrobyazko2002@mail.ru

Рыжаков Семен Алексеевич

Красноярский институт железнодорожного транспорта (КРИЖТ) – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС).

Ладо Кецховели ул., д. 89, Новая Заря ул., д. 2и, г. Красноярск, 660028, Российская Федерация.

Студент кафедры «Системы обеспечения движения поездов», КРИЖТ – филиал ИрГУПС.

Тел.: +7 (9135) 92-76-20.

E-mail: semenrz@yandex.ru

Мудрая Наталия Георгиевна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Соискатель кафедры «Автоматизация производственных процессов», ИрГУПС.

Тел.: +7 (9086) 42-16-76.

E-mail: mydrayanatali@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Дробязко, А. С. Анализ сигналов, формируемых магнитным датчиком обнаружения приближающегося состава, в системе оповещения работающих на железнодорожных путях / А. С. Дробязко, С. А. Рыжаков, Н. Г. Мудрая. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 127 – 136.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Drobyazko Alexey Sergeevich

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (KRIZHT) is a branch of Irkutsk State University of Railway Communications (IrGUPS).

89, Lado Ketskhoveri st., 2i Novaya Zarya st., Krasnoyarsk, 660028, the Russian Federation.

Student of the department «Train Safety Systems», KRIZHT IrGUPS.

Phone: +7 (9232) 15-90-22.

E-mail: alekseydrobyazko2002@mail.ru

Ryzhakov Semyon Alekseevich

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (KRIZHT) is a branch of Irkutsk State University of Railway Communications (IrGUPS).

89, Lado Ketskhoveri st., 2i Novaya Zarya st., Krasnoyarsk, 660028, the Russian Federation.

Student of the department «Train Safety Systems», KRIZHT IrGUPS.

Phone: +7 (9135) 92-76-20.

E-mail: semenrz@yandex.ru

Mudraya Natalia Georgievna

Irkutsk State Transport University (IrGUPS).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Candidate of the department «Automation of production processes», ISTU.

Phone: +7 (9086) 42-16-76.

E-mail: mydrayanatali@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Drobyazko A.S., Ryzhakov S.A., Mudraya N.G. Analysis of signals generated by a magnetic sensor for detecting an approaching train in a warning system operating on railway tracks. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 127-136. (In Russian).

С. Т. Болтаев, Э. Ш. Жоникулов, О. О. Мухиддинов

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА МЕСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос совершенствования системы местного управления и контроля стрелок на железнодорожных станциях на основе беспроводных технологий. Вместо традиционной четырехпроводной схемы управления стрелками предложена система беспроводной связи, основанная на использовании микроконтроллера и радиомодуля LoRa. Специальное приложение, установленное на планшет, обеспечивает авторизацию пользователя с помощью логина, пароля и NFC-карты. Приложение предоставляет функции отображения состояния стрелки, перевода в необходимое положение, отправки управляющих команд, регистрации и архивирования данных. Каждая отправленная команда сохраняется как во внутренней памяти планшета (локальной базы данных), так и в серверной базе данных через интернет. По каждой команде фиксируются дата, имя пользователя, номер стрелки, ее состояние и тип выполненной операции. Разработанная схема и мобильное приложение позволяют управлять стрелками из кабины тепловоза по беспроводной связи. Это создает возможность осуществления маневровых операций без участия маневрового агента. В статье представлены алгоритм работы системы, интерфейс пользователя, схематические решения и основные функции планшетного приложения. Приведены также структурная схема беспроводного управления стрелками и практическая модель, построенная на основе экспериментального макета.

При разработке программно-технических решений были проанализированы требования к обеспечению безопасности движения на основе схем управления стрелками, и они были учтены посредством следующих мер: перед переводом стрелки на местное управление автоматически проверяется свобода секции, обеспечивается визуальная индикация положения стрелки на планшете, все команды, передаваемые пользователем, архивируются в локальной и серверной базах данных. Кроме того, возможность дистанционного управления стрелкой позволила осуществлять безопасное управление без участия маневрового агента.

Предлагаемый подход технически пригоден для применения в автоматизации железнодорожной инфраструктуры и может быть рекомендован как практико-ориентированное решение.

Ключевые слова: электрическая централизация, местное управление, беспроводная связь, стрелка, микроконтроллер, радиомодуль, маневровая колонка, пульт-табло, авторизация, база данных.

Sunnatillo T. Boltayev, Egamberdi Sh. Jonikulov, Obidjon O. Muhiddinov

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, the Republic of Uzbekistan

IMPROVING THE METHOD OF LOCAL MANAGEMENT AND CONTROL OF SWITCHES AT RAILWAY STATIONS USING WIRELESS TECHNOLOGIES

Abstract. This article examines the enhancement of local control and monitoring systems for railway turnouts at stations based on wireless technologies. Instead of the traditional four-wire turnout control scheme, a wireless communication system utilizing a microcontroller and LoRa radio module is proposed. A custom-developed application installed on a tablet authenticates users via login credentials, password, and an NFC card. The application provides functionalities such as viewing the current status of the turnout, switching it to the required position, sending control commands, and recording and archiving operational data. Each command issued is saved both in the tablet's internal storage (local database) and in a remote server database via the internet. For every command, parameters such as date, username, turnout number, status, and type of operation performed are logged. The newly developed scheme and mobile application enable wireless control of turnouts from the locomotive cabin, creating the possibility of performing shunting operations without the involvement of a shunting operator. The article presents the system's operating algorithm, user interface, schematic solutions, and key functions of the tablet application. Furthermore, a structural diagram of the wireless turnout control system and a practical model based on an experimental prototype are provided.

During the development of the software and hardware solutions, the requirements for ensuring traffic safety based on switch control schemes were thoroughly analyzed and taken into account through the following measures: prior to switching to local control, the section's occupancy status is automatically verified; the switch position is visually indicated on the tablet; and all commands issued by the user are archived in both local and server databases. Furthermore, the ability to remotely control the switch enables safe operation without the involvement of a maneuvering agent.

The proposed approach is considered technically suitable and practice-oriented for implementation in the automation of railway infrastructure.

Keywords: Electric interlocking, local control, wireless communication, switch, microcontroller, radio module, shunting post, control panel, authorization, database.

Схемы управления стрелками на железнодорожных станциях являются важнейшей составной частью железнодорожной инфраструктуры. Они играют решающую роль в обеспечении безопасного и эффективного регулирования движения поездов, а также в оптимизации эксплуатационной деятельности станции. Стрелки выполняют функцию перевода поездов с одного пути на другой, что обеспечивает непрерывность и надежность движения в железнодорожной сети [1 – 4].

Перевод централизованных стрелок на местное управление либо управление нецентрализованными стрелками (в условиях отсутствия дежурного по станции) при выполнении маневровых операций предусматривает прямое управление стрелками со стороны составителя или локомотивной бригады. Перевод стрелок, как правило, осуществляется без автоматического или аппаратного контроля занятости стрелочного участка, что требует от руководителя маневров повышенного внимания и бдительности [1, 2].

В условиях электрической централизации управление маневровыми передвижениями осуществляется двумя способами:

1. **С пульта управления** – в этом случае маневровые движения осуществляются по закрытым направлениям, аналогичным маршруту поезда. Отличие в том, что маневровый светофор может открываться на занятый путь или на участок без стрелок в начале станции. Однако он закрывается сразу после прохождения поезда или после освобождения следующего первого стрелочного участка (т. е. выключение светофора отличается от стандартного сигнала поезда).

2. **С маневровых колонок, постов и башен** – этот способ применяется в случаях, когда невозможен или нецелесообразен полный проход по маневровому маршруту, например, при движении с толканием или на коротких маневровых маршрутах.

На станциях с большим объемом маневровой работы устройства электрической централизации позволяют перевести управление стрелками, расположенными в маневровых зонах, на местное управление – как с помощью пультов, так и с применением маневровых колонок.

У местного управления стрелками существуют две схемы, которые применяются в следующих системах [1]:

1) релейная централизация с центральными зависимостями и местным источником питания;

2) релейная централизация с центральными зависимостями и центральным источником питания.

В данной статье рассматривается способ управления стрелкой с использованием первого метода местного управления через беспроводную связь.

Первый способ называется четырехпроводным управлением стрелкой. То есть для управления и контроля стрелки от поста ЭЦ до релейного шкафа стрелки прокладывается всего семь проводов. Из них четыре провода предназначены для централизованного управления и контроля стрелки, а оставшиеся три – для перевода стрелки из режима центрального управления в режим местного управления и наоборот [3].

На рисунке 1 представлена структурная схема управления. Данная схема работает следующим образом:

– Дежурный по станции нажимает кнопку перевода на пульте-табло для перевода стрелки.

– Выданная команда от пульта-табло поступает на пост электрической централизации (ЭЦ), откуда передается в релейный шкаф, где осуществляются управление и контроль за электроприводом стрелки.

- Для перевода стрелки в режим местного управления дежурный по станции нажимает кнопку перевода в местное управление на пульте-табло, после чего на посту ЭЦ проверяются условия перевода стрелки в местное управление.

– Если условия выполнены, маневровый агент подтверждает перевод стрелки на местное управление с помощью маневровой колонки.

– Маневровый агент управляет стрелкой с маневровой колонки.

Когда стрелка переходит на местное управление, индикация контроля стрелки отображается на пульте-табло, но не отображается в колонке маневра [5 – 9].

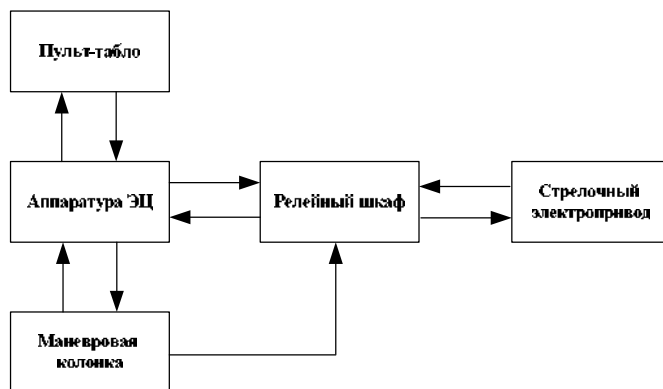


Рисунок 1 – Структурная схема четырехпроводного управления стрелкой

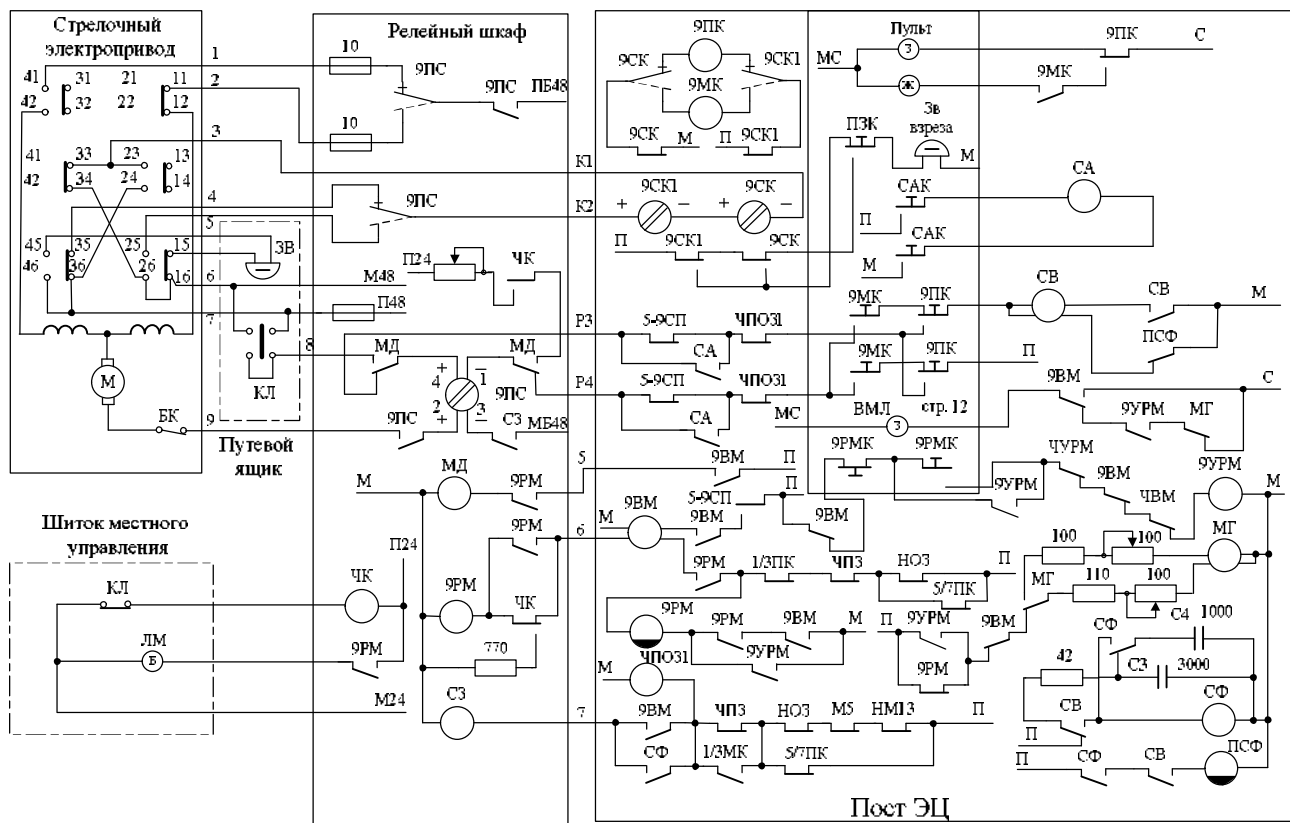


Рисунок 2 – Четырехпроводная схема управления стрелкой

На рисунке 3 показана четырехпроводная схема управления стрелкой на маневровой колонке с реализацией беспроводного способа управления. В данной схеме были внесены следующие изменения: удалены маневровая колонка, релейный шкаф, реле МД, ЧК, 9РМ, 9ВМ и их цепи. Реле 9ПС и СЗ были перенесены на пост ЭЦ.

Схема работает следующим образом: в цепь центрального управления стрелкой были

добавлены контакты реле 9УРМ. Эти контакты определяют перевод стрелки либо в местное, либо в центральное управление. Передний и общий контакты реле 9УРМ переводят стрелку в местное управление, а тыловой и общий – в центральное управление.

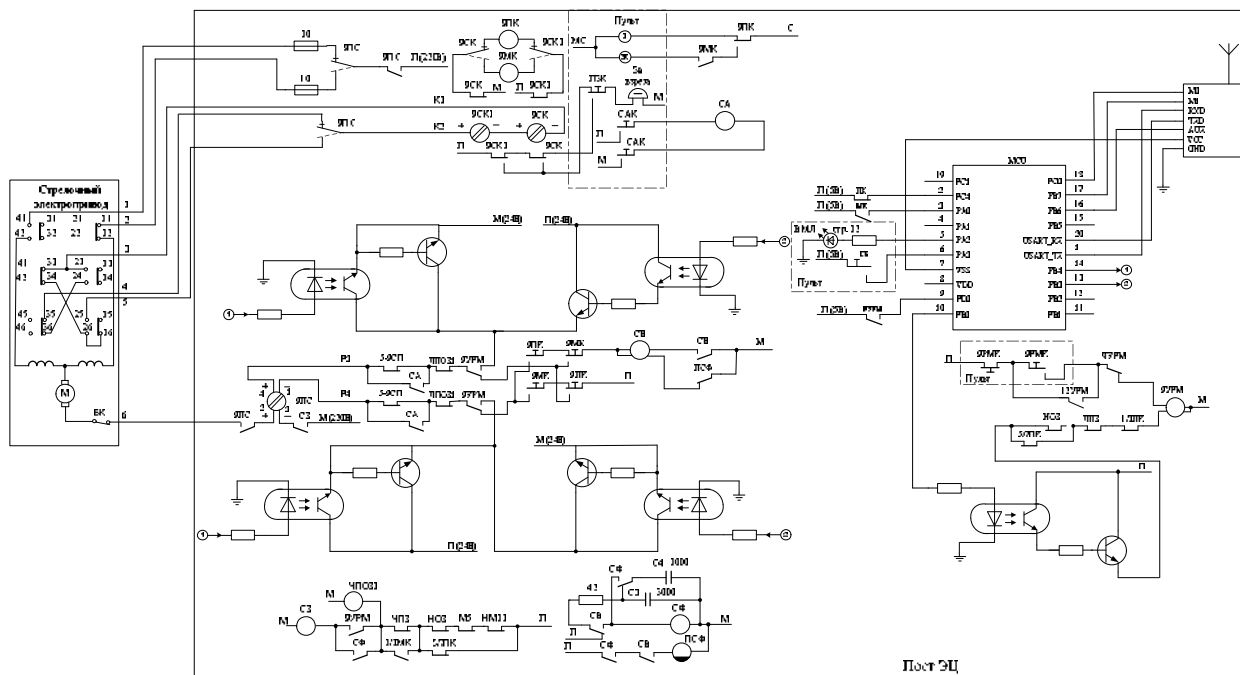


Рисунок 3 – Схема беспроводного управления стрелкой

Для перевода стрелки в местное управление дежурный по станции нажимает кнопку РМК, в результате чего реле 9УРМ на короткое время срабатывает. Фронтной и общий контакты реле 9УРМ подают сигнал на микроконтроллер, и с микроконтроллера через радиомодуль на планшет отправляется запрос на перевод в режим местного управления.

Далее запрос подтверждается на планшете, и команда на подтверждение отправляется с планшета на пост ЭЦ. После поступления команды подтверждения на микроконтроллер через 10-й пин микроконтроллер открывает ключ, состоящий из оптопары и транзистора. Вторая обмотка реле 9УРМ подключена к данному ключу, а также к контактам реле НОЗ, ЧПЗ, 1/3ПК, 5/7ПК, т. е. проверяются условия перевода стрелки в местное управление.

После срабатывания реле 9УРМ стрелка переходит на местное управление, и контроль стрелки, переведенной на местное управление, начинает передаваться на планшет. При подаче с планшета команды перевода стрелки, находящейся в местном управлении, в положение «плюс» или «минус», выводы 13 и 14 микроконтроллера открывают соответствующие ключи, состоящие из оптопары и транзистора, в результате чего происходит переключение полярности реле 9ПС, и стрелка переводится в требуемое положение. Выводы 13 и 14 микроконтроллера должны оставаться включенными в течение времени, необходимого для перевода стрелки. Это время рассчитывается по формуле:

$$t = t_{\text{ПС}} + t_n + t_{\text{рез}}$$

где: $t_{\text{ПС}}$ – время срабатывания реле 9ПС; t_n – время перевода стрелки; $t_{\text{рез}}$ – дополнительное резервное время.

В цепи включения реле СЗ контакт реле 9ВМ был заменен на контакт реле 9УРМ. Цель этой замены – обеспечить постоянную работу реле СЗ, защищающего реле 9ПС, в случае перехода стрелки на местное управление. То есть при переходе стрелки на местное управление защитная цепь реле 9ПС не срабатывает аналогично традиционной схеме управления.

Для перевода стрелки с местного на центральное управление необходимо нажать на

планшете кнопку «Отмена местного управления». После получения микроконтроллером команды на отмену он размыкает цепь, подключенную ко второй обмотке реле 9УРМ. В результате стрелка переходит с местного управления на центральное. К пятому выводу микроконтроллера подключен светодиод, который информирует дежурного по станции о текущем режиме управления стрелкой. В случае, если светодиод выключен, стрелка находится под центральным управлением; при мигании светодиода осуществляется переход стрелки в режим местного управления; при постоянном свечении светодиода стрелка уже находится в режиме местного управления.

Если возникнут проблемы с радиосвязью и команда «Отмена» не дойдет до микроконтроллера, переход стрелки на центральное управление можно осуществить с помощью кнопки «Сб», подключенной к микроконтроллеру. Эта кнопка используется только в аварийных ситуациях. На рисунке 4 представлена структурная схема беспроводного управления стрелкой в режиме местного управления. На рисунке 5 показано устройство для местного управления и контроля стрелки.

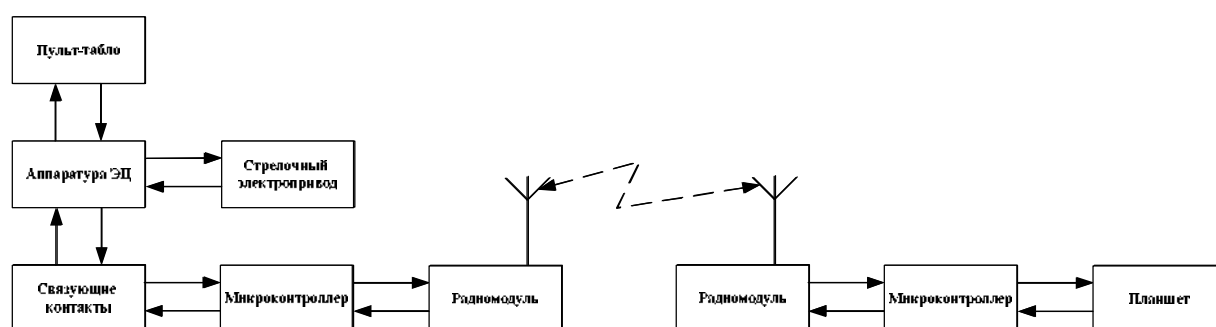
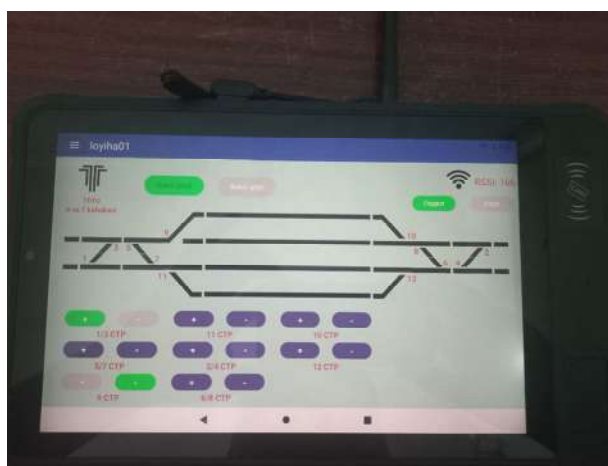


Рисунок 4 – Структурная схема беспроводного управления стрелкой в режиме местного управления



а



б

Рисунок 5 – Устройство местного управления и контроля стрелки: передняя сторона (а) и задняя сторона (б)

На рисунке 6 приведен алгоритм программы, установленной на планшете для беспроводного управления стрелками в режиме местного управления. В данной программе реализованы следующие функции.

При входе в главное окно приложения открывается окно авторизации, где пользователь может войти, указав логин, пароль и используя NFC-карту, т. е. ID-карту, после чего переходит в основное окно программы. В окне авторизации предусмотрена кнопка входа от имени администратора. При входе как администратор предоставляется возможность регистрировать новых пользователей, редактировать или удалять их логины, пароли и ID-карты.

После того как пользователь подтверждает логин, пароль и ID-карту на окне авторизации, он переходит в основное окно программы. Затем необходимо нажать на кнопку «Подключить»

в основном окне. Если к планшету подключен микроконтроллер, происходит его соединение с программой. Этот процесс показан в блоке 4 алгоритма. Добавление данной кнопки обусловлено требованиями системы безопасности операционной системы Android. После этого программа переходит в режим готовности к эксплуатации.

Когда дежурный станции нажимает на кнопку перевода на местное управление на пульте табло, через радиомодуль на планшет отправляется разрешающий сигнал, при этом в программе на планшете начинает мигать индикатор приема. Затем пользователь должен нажать на кнопку подтверждения приема, после чего на пост ЭЦ отправляется сообщение о принятии. Далее от поста ЭЦ на планшет по радиоканалу передаются данные о состоянии стрелок, переведенных на местное управление. После этого стрелка считается переведенной на местное управление. Данный процесс отражен в блоках 6, 7 и 8 алгоритма.

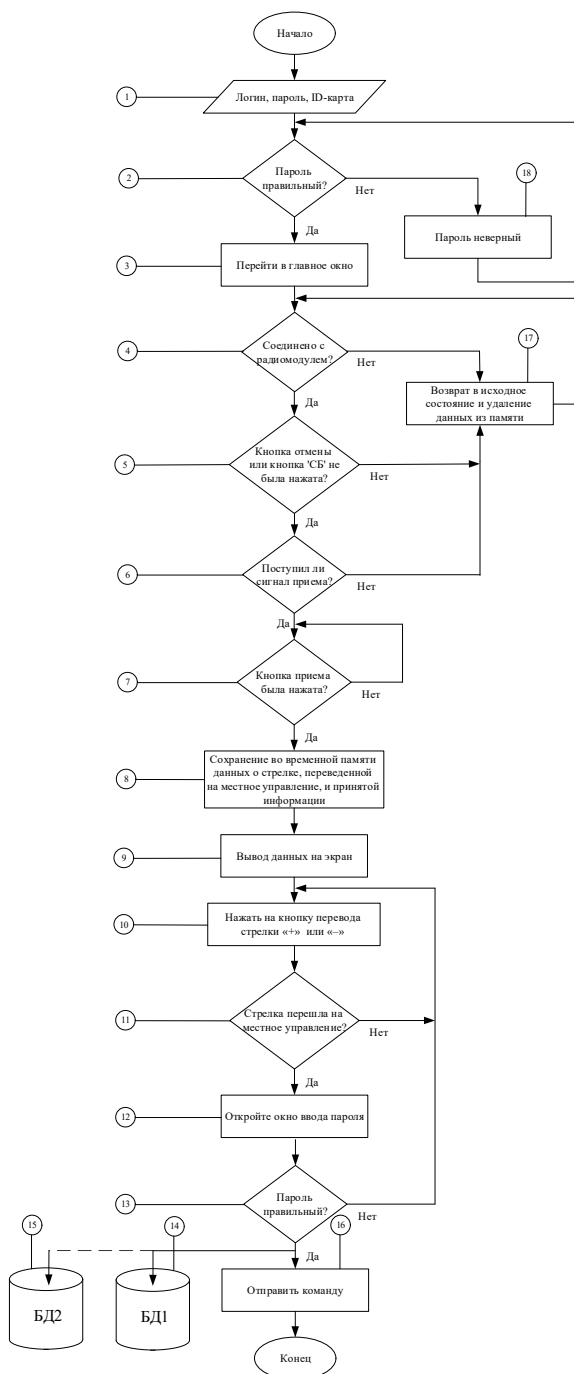


Рисунок 6 – Алгоритм работы программы, разработанной для планшета, реализует беспроводное управление стрелками в режиме местного управления

Информация о стрелке, переведенной на местное управление, временно сохраняется в памяти планшета. При нажатии кнопки перевода стрелки в приложении проверяется, находится ли стрелка в режиме местного управления. Если стрелка действительно переведена в этот режим, появляется окно ввода пароля для выполнения команды. При корректном вводе пароля отправляется команда на поворот выбранной стрелки. Если стрелка не переведена на местное управление, то с планшета невозможно отправить никакие команды. Данные процессы описаны в блоках 10, 11, 12, 13 и 16 алгоритма. При нажатии кнопки «Отмена» местного управления на планшете либо при поступлении сигнала с другой стороны через кнопку «Сб» стрелки переводятся обратно на централизованное управление. В результате управление стрелками с планшета становится невозможным, и основное окно возвращается в исходное состояние – исчезают все индикаторы контроля стрелок. Этот процесс отражен в блоках 5 и 17 алгоритма. На рисунке 7 показано основное окно устройства местного управления стрелкой.

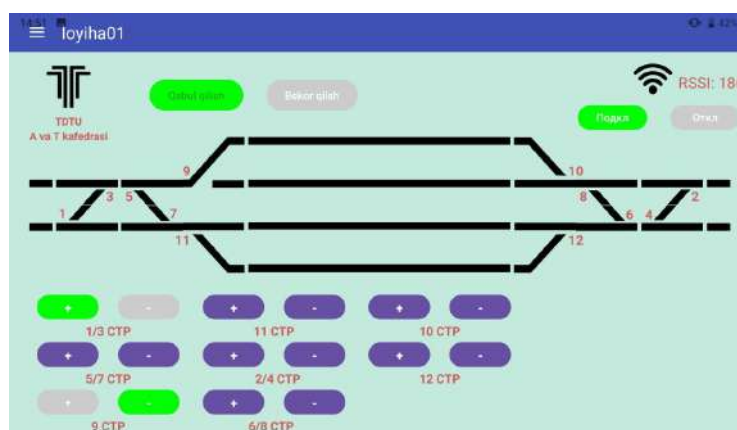


Рисунок 7 – Основное окно программы

После перехода стрелки в режим местного управления в основном окне отображаются состояние стрелок и уровень сигнала.

Для перевода стрелки пользователь каждый раз должен подтвердить действие с помощью пароля, ID-карты или пароля. После нажатия кнопки перевода стрелки, если введенный пароль подтверждается как правильный, на пост ЭЦ передается команда на перевод стрелки.

После этого переданные команды архивируются в двух базах данных: в локальной и в серверной.

Локальная база данных – это внутренняя память планшета, в которой команды сохраняются временно.

Серверная база данных – это место хранения, куда команды, отправленные с планшета, записываются через интернет. Серверная база данных создается как дополнительная мера хранения. Цель – обеспечение дополнительной безопасности. То есть в аварийных ситуациях если планшет будет поврежден, можно просмотреть ход операций через вторую базу данных. На рисунке 8 показан вид окон базы данных.

1	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
2	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
3	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
4	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
5	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
6	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
7	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
8	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
9	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
10	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
11	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен

а

1	Дата	Фамилия И.И.	Стрелка	Запрос
2	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
3	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
4	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
5	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
6	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
7	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
8	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
9	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
10	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
11	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
12	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
13	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
14	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен
15	2025/07/23 17:24:36	Янтарев Егор	1/3 стрелка переведена в положение «+»	Запрос отправлен

б

Рисунок 8 – Окна локальной (а) и серверной (б) баз данных

В базе данных сохраняются следующие параметры: дата выдачи команды; имя и фамилия пользователя; номер стрелки; состояние стрелки.

В представленной программе, установленной на планшете, в пользовательском интерфейсе невозможно заранее определить, какая стрелка переводится на местное управление. Только после перевода стрелки на местное управление можно узнать, какая именно стрелка была переведена.

После перевода одной стрелки на местное управление, если необходимо перевести на местное управление следующую стрелку, алгоритм, описанный выше, выполняется снова в том же порядке.

На рисунке 9 показана экспериментальная модель, собранная для проверки программы, разработанной для управления и контроля стрелки в местном управлении. В данной модели использовались шесть кнопок для проверки индикации стрелок 1/3 и девять на планшете – это кнопки «плюс», «минус» и «разрыв» для каждой стрелки. С помощью нажатия на эти кнопки проверялась корректность отображения состояния стрелок. Кроме того, в модели предусмотрены еще две кнопки, отвечающие за перевод стрелки на местное управление и возврат из местного управления. С помощью этих кнопок проверялась индикация кнопок «Принять» и «Отмена» на планшете. В макете установлены также два светодиода (LED), которые имитируют выполнение команды на перевод стрелки в положение «плюс» или «минус», подаваемой с планшета. В целом данная экспериментальная модель функционирует на основе алгоритма, приведенного на рисунке 6, и служит для проверки работоспособности разработанного программного приложения.

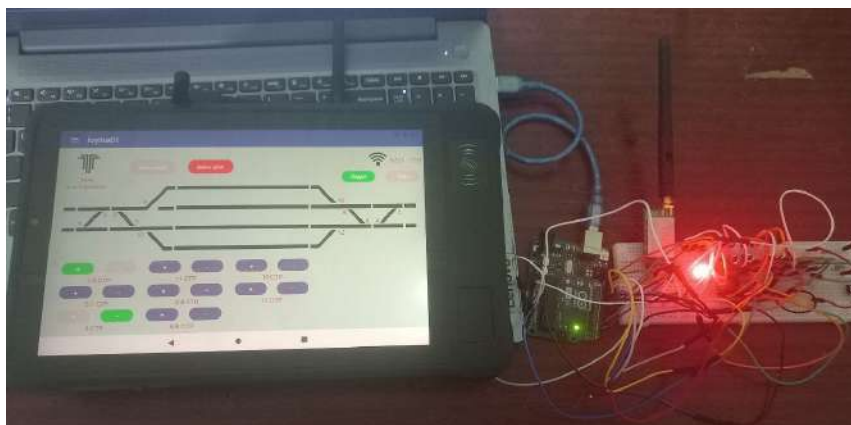


Рисунок 9 – Экспериментальная модель беспроводного управления и контроля стрелок в местном управлении

В рамках данного исследования была предложена и испытана практическая модель дистанционного управления и мониторинга стрелок в системе местного управления с использованием беспроводных технологий. По результатам эксперимента установлено, что система беспроводной связи, основанная на плате Arduino и модуле LoRa E220_400T_22D, обеспечивает эффективное управление положением стрелки в режиме реального времени. Разработанное приложение для планшета успешно интегрировало функции авторизации (логин, пароль и ID-карта) и индикации состояния. Система хранения команд и восстановления данных при аварийных ситуациях была реализована с использованием двух баз данных – локальной и серверной.

Основным отличием данной системы от традиционной четырехпроводной схемы управления стрелкой является возможность дистанционного управления. В классической схеме при местном управлении стрелкой не осуществляется контроль занятости секции, и за положением стрелки должен следить непосредственно маневровый агент. В новой разработанной схеме при переводе стрелки в режим местного управления осуществляется проверка занятости секции, положение стрелки отображается на планшете, а переданные команды архивируются. В дополнение к этому в новой схеме удалены и перенесены на пост ЭЦ некоторые полевые устройства, ранее применяемые при местном управлении стрелками.

Кроме того, в разработанных программно-технических решениях для обеспечения безопасности управления стрелками были всесторонне проанализированы требования к безопасности движения. В частности, при переводе стрелки на местное управление строго контролировались соответствующие условия – свобода секции, идентификация пользователя и процедура подтверждения команды. На всех этапах – от отправки и исполнения до регистрации команд – была обеспечена возможность сохранения операций как в локальной, так и в серверной базах данных. Благодаря пользовательскому интерфейсу планшета реализован непрерывный контроль за состоянием стрелки, а визуальная индикация позволила минимизировать вероятность ошибок со стороны оператора. Таким образом, предложенные решения сформировали надежный и современный механизм управления, способный обеспечить требуемый уровень безопасности на практике.

В заключение следует отметить, что предложенная система позволяет управлять стрелкой, находящейся в режиме местного управления, непосредственно из кабины тепловоза без участия маневрового агента.

Список литературы

1. Казаков, А. А. Станционные устройства автоматики и телемеханики / А. А. Казаков, В. Д. Бубнов, Е. А. Казаков. – Москва : Транспорт, 1990. – 431 с. – Текст : непосредственный.
2. Телеуправление стрелками и сигналами / под ред. А. С. Переборова. – Москва : Транспорт, 1981. – 390 с. – Текст : непосредственный.
3. Микропроцессорные системы централизации / под ред. Вл. В. Сапожникова. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. – 398 с. – Текст : непосредственный.
4. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / под ред. Вл. В. Сапожникова. – Москва : Транспорт, 1995. – 272 с. – Текст : непосредственный.
5. Никитин, А. Б. Управление стрелочными электроприводами в компьютерных системах горочной централизации / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин. – Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 51–62. – EDN UHFZTN.
6. Никитин, А. Б. Управление электроприводами в системе микропроцессорной централизации МПЦ-МПК / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин. – Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 362–378. – DOI 10.20295/2412-9186-2021-7-3-362-378. – EDN MLMQMR.
7. Никитин, А. Б. Использование функциональных преобразователей с несимметричным отказом для управления электроприводами переменного тока / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин. – Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 7–18. – EDN VXJDEJ.
8. Никитин, А. Б. Использование принципа релейно-полупроводниковой коммутации для управления стрелочными приводами в современных системах горочной централизации / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин. – Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 2. – С. 178–191. – EDN ZFNEVV.
9. Системы радиоуправления стрелками и сигналами на промышленном железнодорожном транспорте / А. В. Федухин, В. В. Федоровский, А. И. Сухомлин, А. М. Шалейко. – Текст : непосредственный // Математические машины и системы. – 2012. – № 4. – С. 75–83. – EDN PXTOKN.

References

1. Kazakov A.A., Bubnov V.D., Kazakov E.A. *Stantsionnye ustroistva avtomatiki i telemekhaniki* [Station Automation and Remote Control Devices]. Moscow, Transport Publ., 1990. 431 p. (In Russian).
2. Pereborov A.S. ed. *Teleupravlenie strelkami i signalami* [Remote Control of Switches and Signals]. Moscow, Transport Publ., 1981, 390 p. (In Russian).
3. Sapozhnikov V.I. ed. *Mikroprotsessornye sistemy tsentralizatsii* [Microprocessor Centralization Systems] Moscow, Educational and Methodological Center for Railway Transport Education Publ., 2008. 398 p. (In Russian).

4. Sapozhnikov V.I. ed. *Metody postroeniia bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki* [Methods of Designing Safe Microelectronic Systems in Railway Automation]. Moscow, Transport Publ., 1995, 272 p. (In Russian).

5. Nikitin A.B., Kovkin A.N. Point machines control in computer systems of hump interlocking. *Avtomatika na transporte – Transport automation research*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 51-62. EDN UHFZTN. (In Russian)

6. Nikitin A.B., Kovkin A.N. Electric point machines in the microprocessor controller and microprocessor interlocking system. *Avtomatika na transporte – Transport automation research*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 362-378. DOI 10.20295/2412-9186-2021-7-3-362-378. EDN MLMQMR. (In Russian).

7. Nikitin A.B., Kovkin A.N. Using of functional generators with asymmetrical failure for AC electric drive control. *Avtomatika na transporte – Transport automation research*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 7-18. EDN VXJDEJ. (In Russian).

8. Nikitin A.B., Kovkin A.N. Using the principle of relay-semiconductor communication for controlling points in modern hump interlocking systems. *Avtomatika na transporte – Transport automation research*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 178–191. EDN ZFNEVV. (In Russian).

9. Fedukhin A.V., Fedorovskiy V.V., Sukhomlin A.I., Shaleyko A.M. Radio control systems for switches and signals on industrial rail transport. *Matematicheskie mashiny i sistemy – Mathematical machines and systems*, 2012, no. 4, pp. 75-83. EDN PXTOKN. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Болтаев Суннатилло Туймуродович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», ТГТУ.

Тел.: +998 (90) 957-10-88.

E-mail: sunnat_3112@mail.ru

Жоникулов Эгамберди Шавкат-угли

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Автоматика и телемеханика», ТГТУ.

Тел.: +998 (91) 102-27-97.

E-mail: egamberdijonikulov@gmail.com

Мухиддинов Обиджон Омонжон-угли

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Автоматика и телемеханика», ТГТУ.

Тел.: +998 (91) 922-93-93.

E-mail: muhiddinovobidjon@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Болтаев, С. Т. Совершенствование метода местного управления и контроля стрелочных переводов на железнодорожных станциях с применением беспроводных технологий / С. Т. Болтаев, Э. Ш. Жоникулов, О. О. Мухиддинов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 2 (62). – С. 137 – 146.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boltaev Sunnatillo Tuymurodovich

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, professor of the department “Automation and Remote Control”, TSTU.

Phone: +998 (90) 957-10-88.

E-mail: sunnat_3112@mail.ru

Jonikulov Egamberdi Shavkat-o‘g‘li

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department “Automation and Remote Control”, TSTU.

Phone: +998 (91) 102-27-97.

E-mail: egamberdijonikulov@gmail.com

Muhiddinov Obidjon Omonjon-o‘g‘li

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department “Automation and Remote Control”, TSTU.

Phone: +998 (90) 922-93-93.

E-mail: muhiddinovobidjon@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Boltaev S.T., Jonikulov E.Sh., Muhiddinov O.O. Improving the method of local management and control of switches at railway stations using wireless technologies. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 2 (62), pp. 137-146. (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала, соответствующим научным специальностям Номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118:

- 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
 - 2.9.4. Управление процессами перевозок;
 - 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
 - 2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
 - 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника;
 - 2.4.5. Энергетические системы и комплексы;
 - 2.4.3. Электроэнергетика;
 - 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы;
 - 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.
- Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционного совета журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления материалов научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляются:

1. Текст статьи на бумаге формата А4.
2. Текст статьи в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc или фамилия.docx.
3. Экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати (по форме, принятой в организации авторов).
4. Отчет о проверке на заимствования в системе «Антиплагиат» (<https://www.antiplagiat.ru/>). Оригинальность должна составлять не менее 80 %.
5. Гарантийное письмо о передаче авторского права с подписями всех соавторов статьи (образец прилагается).
6. Согласие на обработку персональных данных от каждого автора (соавтора) статьи (образец прилагается).

В тексте статьи обязательно указываются тематический раздел журнала, в который подается статья, и научная специальность, которой эта статья соответствует.

Текст статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию авторов (место работы или учебы), заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова на русском и английском языках, текст статьи, список литературы в русском и латинском алфавитах, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Текст статьи оформляется в соответствии с установленным образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть: оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычной» (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы – формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей – 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста – Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (0); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»; в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (·);

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы, такие как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисовочные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт; необходимо использовать французские кавычки («ёлочки»); межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см; автоматическую нумерацию необходимо полностью исключить; инициалы и фамилии всегда должны находиться на одной и той же строке; каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде; рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следует список использованной литературы на русском языке и в латинском алфавите; ссылки на литературу в тексте статьи указываются арабскими цифрами в квадратных скобках; список использованной литературы на русском языке имеет заголовок *Список литературы* и оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100–2018; список использованной литературы в латинском алфавите имеет заголовок *References* и оформляется в соответствии с установленным образцом; при публикации научной статьи на русском или английском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках.

Материалы статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число авторов статьи не должно превышать трех человек, в ином случае необходимо отдельное согласование с редакцией. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц без учета аннотации и списка литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также необходимо согласовывать с редакцией. Иллюстрации, схемы и таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации в разных выпусках журнала.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией окончательного текста.

Принятые к публикации материалы статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные с нарушением указанных выше требований, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

По всем вопросам, связанным с подготовкой, представлением и публикацией материалов статей, необходимо обращаться в редакцию журнала.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies»

№ 2 (62) 2025

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором), регистрационный номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в интернет-каталоге «Пресса по подписке» (www.akc.ru) – E28002.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

С июля 2011 г. журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издание выходит с периодичностью 4 выпуска в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Технический редактор – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии:
644046, Омская область, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;
тел.: +7 (3812) 31-05-54;
e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 19.09.2025.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 25.09.2025.

