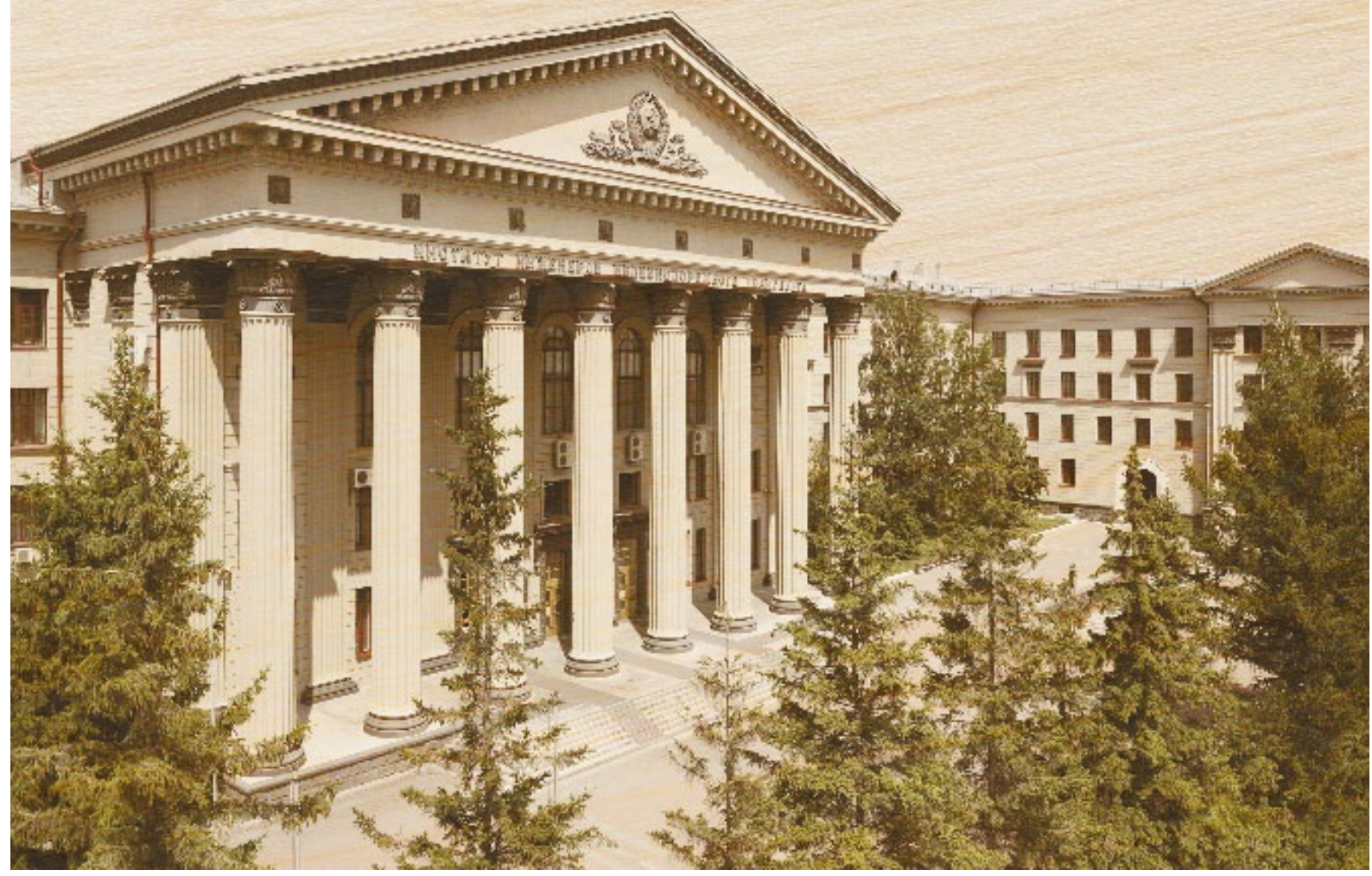


ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 2 (61). 2022 16+



УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

Манаков Алексей Леонидович – д-р техн. наук, доц.

Заместитель главного редактора

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

Заместитель главного редактора

Ильиных Андрей Степанович – д-р техн. наук, доц.

Ответственный секретарь

Галай Марина Сергеевна – канд. техн. наук

Члены редколлегии:

Бессоненко Сергей Анатольевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Воробьев Валерий Степанович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Герасимов Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Герасимов Виталий Владимирович – д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск

Головнич Александр Константинович – д-р техн. наук, доц., БелГУТ, г. Гомель, Белоруссия

Евсеев Дмитрий Геннадьевич – д-р техн. наук, проф., МИИТ, г. Москва

Исаков Александр Леонидович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Караулов Александр Михайлович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Карпущенко Николай Иванович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Комаров Константин Леонидович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Кондратьев Сергей Александрович – д-р техн. наук, ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Королев Константин Валерьевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Корягин Марк Евгеньевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Пронозин Яков Александрович – д-р техн. наук, проф., ТИУ, г. Тюмень

Хабаров Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Шахов Сергей Александрович – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Шварцфельд Вячеслав Семенович – д-р техн. наук, проф., ПГУПС, г. Санкт-Петербург

Черный Константин Анатольевич – д-р техн. наук, доц., ПНИПУ, г. Пермь

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

Редакторы: *Е. Е. Рыжкова, А. О. Елесина, Ю. В. Печенкина*

Корректор *Б. В. Устинов* – канд. техн. наук

Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*

Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Сайт журнала:

www.stu.ru (раздел «Научная деятельность»; журнал «Вестник СГУПС»)

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-79268 от 02 ноября 2020 г.

FOUNDER

The Siberian Transport University

Editors and Editorial Board

Editor-in-Chief

A. L. Manakov, Doctor of Engineering, Associate Professor

Deputy Editor

A. D. Abramov, Doctor of Engineering, Associate Professor

Deputy Editor

A. S. Ilinykh, Doctor of Engineering, Associate Professor

Executive Secretary

M. S. Galay, Candidate of Engineering

Editors

S. A. Bessonenko, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. S. Vorobyev, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. I. Gerasimov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. V. Gerasimov, Doctor of Engineering, Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk

A. K. Golovnich, Doctor of Engineering, Associate Professor, Belarusian State University of Transport, Belarus

D. G. Evseev, Doctor of Engineering, Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow

A. L. Isakov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

A. M. Karaulov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

N. I. Karpuschenko, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

K. L. Komarov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. A. Kondratyev, Doctor of Engineering, IGD SB RAS, Novosibirsk

K. V. Korolev, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

M. E. Koryagin, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

Y. A. Pronozin, Doctor of Engineering, Professor, TIU, Tyumen

V. I. Khabarov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. A. Shakhov, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. S. Shvartsfeld, Doctor of Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

K. A. Chernyi, Doctor of Engineering, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm

English Text Reviewer

I. I. Stepachkova, Senior Lecturer

Text Reviewers **E. E. Ryzhkova**, **A. O. Elesina**, **Yu. V. Pechenkina**

Managing Editor **B. V. Ustinov**, Candidate of Engineering

Layout Designer **Yu. V. Bortsova**

Cover Designer **A. S. Petrenko**

Main contact details

Siberian Transport University
room 307, 191, Dusi Kovalchuk St.
630049, Novosibirsk, Russia
Phone: (383) 328-04-36
Web: <http://www.stu.ru> (Scientific Activity section)
E-mail: vestnik.stu@yandex.ru

The journal was registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media in 2021.

ISSN: 1815-9265

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и на соискание ученой степени доктора наук, по группам научных специальностей 05.22.00 «Транспорт» и 05.23.00 «Строительство и архитектура», а также по специальности 05.02.22 «Организация производства (в отраслях транспорта)»

№ 2 (61) · 2022 · АПРЕЛЬ – ИЮНЬ · 16+

Выходит один раз в три месяца. Основан в 1999 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

<i>Псеровская Е. Д., Жаркова А. А., Дружинина М. Г.</i> Показатели взаимодействия ОАО «РЖД», грузоотправителей и операторских компаний	5
<i>Ковтун П. В., Дубровская Т. А., Стрижак А. И.</i> Анализ основных технических решений, направленных на повышение скоростей движения поездов в Республике Беларусь.....	16
<i>Югрина О. П., Жарикова Л. С.</i> Система организации работы с контейнерными поездами	24
<i>Пикалов А. С., Милорадович В. К., Севостьянов А. А.</i> Организация производства работ по капитальному ремонту пути на закрытом перегоне с учетом использования инновационной железнодорожно-строительной техники.....	33
<i>Семенов М. А.</i> Организация эксплуатации и рабочих процессов снегоуборочных машин типа СМ и ПСС на основе автоматизированного мониторинга.....	44

Строительство и архитектура

<i>Карпущенко Н. И., Река Е. М.</i> Интенсивность бокового износа рельсов в кривых в зависимости от эксплуатационных условий.....	57
<i>Косенко С. А., Величко Д. В., Богданович С. В., Хасенов С. С., Соколовский И. К.</i> Экономичное армирование железобетонной шпалы.....	67
<i>Шахов С. А.</i> Экологическая оценка утилизации осадка бытовых сточных вод в виде золы при производстве строительной керамики	77
<i>Боброва Т. В.</i> Структурно-модульная параметризация дорожно-строительного потока в системе информационного моделирования.....	86
<i>Глазков Д. В.</i> Опыт очистки нефтесодержащих сточных вод предприятий железнодорожного транспорта компактной передвижной установкой	96
<i>Королев К. В., Стахнев Я. О.</i> Статический анализ предельного равновесия свода обрушения при проходке подземных выработок в скальных и полускальных грунтах	103
<i>Караулов А. М., Донец А. Н., Савельев Ю. Н.</i> Анализ устойчивости оползневого склона в г. Сочи	116
<i>Гребенников И. О.</i> Особенности проектирования усиления грунтовых оснований зданий и сооружений армированием грунтоцементными колоннами.....	123

Included in the List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of candidate's thesis and doctoral thesis should be published in scientifically oriented groups 05.22.00 "Transport" and 05.23.00 "Construction and Architecture", as well as in the speciality 05.02.22 "Industrial engineering (in transport industry)"

№ 2 (61), 2022 April – June 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

- E. D. Pserovskaya, A. A. Zharkova, M. G. Druzhinina.* Indicators of interaction between Russian Railways, shippers and operator companies5
- P. V. Kovtun, T. A. Dubrovskaya, A. I. Strizhak.* Analysis of the main technical solutions aimed at increasing speeds train traffic in the Republic of Belarus16
- O. P. Yugrina, L. S. Zharikova.* Organization system of work with container trains24
- A. S. Pikalov, V. K. Miloradovich, A. A. Sevostyanov.* Proposals for improving the efficiency of railway track overhaul due to innovative equipment33
- M. A. Semenov.* Snowplows operation organization and work processes of the SM and PSS types based on automated monitoring44

Building and Architecture

- N. I. Karpushchenko, E. M. Reka.* Intensity of rail lateral wear in curves depending on operating conditions57
- S. A. Kosenko, D. V. Velichko, S. V. Bogdanovich, S. S. Khasenov, I. K. Sokolovskiy.* Reinforced concrete sleepers economical reinforcement67
- S. A. Shakhov.* Environmental assessment of the domestic sewage sludge disposal in the form of ash when producing building ceramics77
- T. V. Bobrova.* Structural modular parameterization of the road construction flow in the information modeling system86
- D. V. Glazkov.* Experience in the treatment of oily wastewater from railway transport enterprises with a compact mobile unit96
- K. V. Korolev, Ya. O. Stakhnev.* Static analysis of the ultimate equilibrium of the collapse arch during the excavation of underground workings in rocky and semi-horizontal soils103
- A. M. Karaulov, A. N. Donets, Yu. N. Savelyev.* Analysis of the stability of the landslide slope in Sochi116
- I. O. Grebennikov.* Design features of strengthening soil foundations of buildings and structures by reinforcing soil-cement columns123

ТРАНСПОРТ

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 5–15.
The Siberian Transport University Bulletin. 2022. No. 2 (61). P. 5–15.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.073
doi 10.52170/1815-9265_2022_61_5

Показатели взаимодействия ОАО «РЖД», грузоотправителей и операторских компаний

Елена Дмитриевна Псеровская¹, Анна Александровна Жаркова^{2✉},
Марина Григорьевна Дружинина³

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

^{2, 3} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

¹ eldp-55@yandex.ru

² annakuz.bass@mail.ru✉

³ druzhinina.mg@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности функционирования и взаимодействия участников перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. Определены научно-прикладные задачи взаимодействия участников перевозочного процесса в современных условиях. Предложены критерии и методы их определения для оценки процесса взаимодействия участников перевозочного процесса и обоснования управляющих решений при распределении вагонного парка. Проанализированы основные показатели, отражающие особенности деятельности игроков рынка железнодорожных перевозок (перевозчика, грузоотправителя и операторских компаний). Выведен комплексный показатель, учитывающий время и стоимость доставки вагонов, для выбора оптимального варианта распределения вагонов. Для рассматриваемого полигона определены возможные варианты маршрутов доставки вагонов, выполнены расчеты и построена гистограмма значений комплексного показателя при движении поезда по маршрутам следования. По результатам расчетов построены графики зависимости комплексного показателя от стоимости операций, выполняемых с подвижным составом по маршруту следования, и от времени на продвижение вагонов. Использование предлагаемого комплексного показателя позволяет оперативно выбрать маршрут, удовлетворяющий требованиям участников перевозочного процесса.

Ключевые слова: распределение вагонного парка, грузоотправители, операторские компании, взаимодействие участников перевозочного процесса

Для цитирования: Псеровская Е. Д., Жаркова А. А., Дружинина М. Г. Показатели взаимодействия ОАО «РЖД», грузоотправителей и операторских компаний // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 5–15. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_5.

TRANSPORT

Original article

Indicators of interaction between Russian Railways, shippers and operator companies

Elena D. Pserovskaya¹, Anna A. Zharkova^{2✉}, Marina G. Druzhinina³

¹ Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

^{2, 3} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

¹ eldp-55@yandex.ru

² annakuz.bass@mail.ru✉

³ druzhinina.mg@yandex.ru

Abstract. The features of the transportation process participants functioning and interaction on the railway transport are considered. Scientific and applied tasks of the transportation process participant interaction in modern

conditions are determined. The criteria and methods of their definition are proposed to assess the process of interaction between the transportation process participants and the rationale for the management solutions in the distribution of the freight car park. The main indicators reflecting the features of the railway transport market players (carrier, shipper and operator companies) are analyzed. An integrated indicator has been derived, taking into account the time and cost of freight car delivery, to select the optimal variant of the car distribution. For the polygon under consideration, possible options for car delivery routes were identified, calculations were made and a histogram of the comprehensive indicator values was built when the train along the routes. According to the results of the calculations, graphs of the complex indicator depending on the cost of operations performed with freight cars on the route and on time to promote cars are constructed. The use of the proposed comprehensive indicator allows you to quickly select a route that meets the requirements of the transportation process participants.

Keywords: distribution of the car fleet, shippers, operator companies, interaction of transportation process participants

For citation: Pserovskaya E. D., Zharkova A. A., Druzhinina M. G. Indicators of interaction between Russian Railways, shippers and operator companies. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):5–15. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_5.

Введение

После завершения реформ на железнодорожном транспорте, заключавшихся в демополизации отдельных сфер его деятельности и создании условий доступности инфраструктуры железных дорог для пользователей различных форм собственности, организация процесса перевозки грузов является результатом взаимодействия нескольких участников транспортного рынка.

За период реформирования появилась холдинговая компания ОАО «РЖД», владеющая инфраструктурой, и около 2 450 владельцев вагонов [1, 2]. Приватный парк подвижного состава к марту 2020 г. составил 1 182 тыс. вагонов (рис. 1) при потребности обеспечения перевозочного процесса в 950 тыс. вагонов [3]. Наличие значительного числа владельцев вагонов, несогласованность действий многочисленных компаний-операторов на транспортном рынке, несовершенство принципов управления небольшими парками вагонов,

фрагментация парка грузовых вагонов привели к ухудшению показателей эффективности использования подвижного состава и увеличению нагрузки на инфраструктуру, что отрицательно повлияло на эффективность перевозок и создало дополнительные затруднения в организации работы сети железных дорог [4, 5].

Соотношение вместимости станционных путей и рабочего парка вагонов практически достигло критического значения, учитывая, что за период с 1999 по 2007 г. эксплуатационная длина железнодорожных путей ОАО «РЖД» сократилась на 920 км и только с 2008 г. началось постепенное увеличение их протяженности (рис. 2) [6]. Это привело к увеличению загруженности железнодорожных направлений, узлов и станций, снижению пропускной способности участков железных дорог, увеличению маневровой работы на станциях и, как следствие, к снижению скорости доставки грузов, нарушению сроков доставки, снижению качества обслуживания клиентов компании.

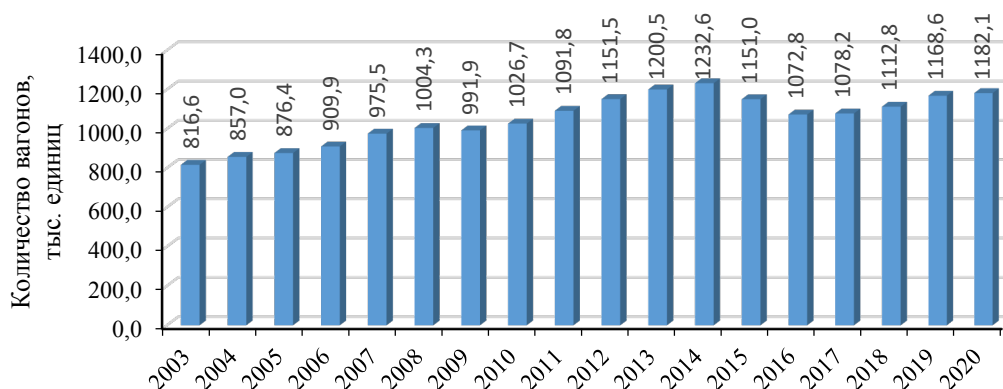


Рис. 1. Динамика изменения парка грузовых вагонов в 2001–2020 гг.

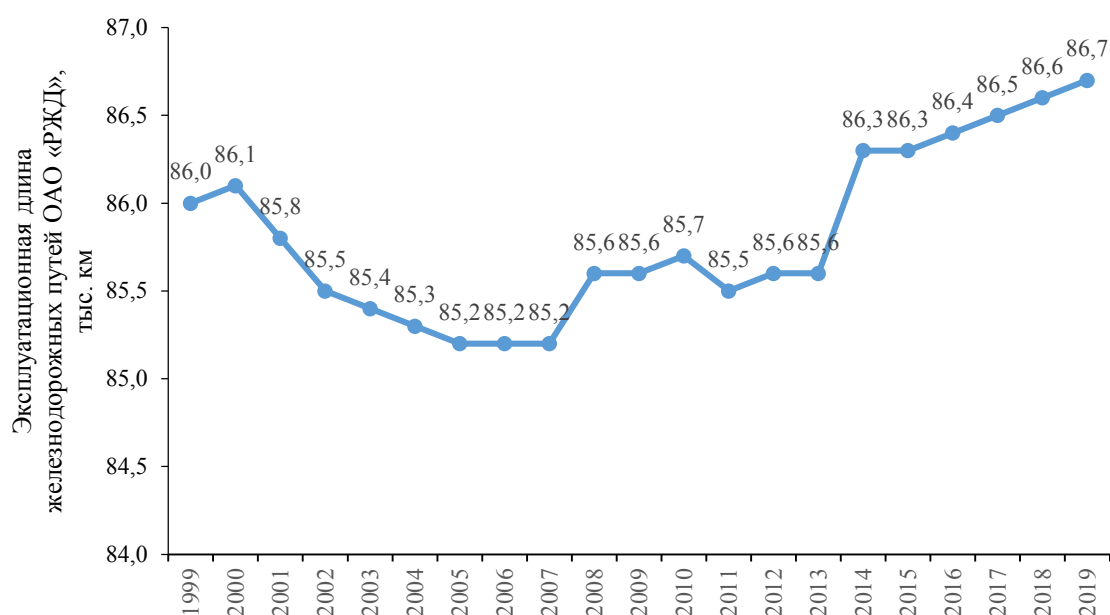


Рис. 2. Динамика изменения эксплуатационной длины железнодорожных путей ОАО «РЖД»

В 2014 г. Правительством РФ была предпринята попытка сокращения количества частных вагонов на сети железных дорог путем запрета использования вагонов с истекшим сроком эксплуатации. Тем не менее с 2016 г. количество частного подвижного состава, обращающегося на общей сети железных дорог, имеет тенденцию роста.

Проблемы несоответствия вместимости инфраструктуры количеству вагонов, находящихся на сети железных дорог, усугубляются отсутствием действенных механизмов управления частным вагонным парком. Изменение структуры транспортного рынка практически никак не отразилось на принципах управления вагонопотоками, а разнонаправленность интересов участников перевозочного процесса отрицательно сказывается на эффективности работы железнодорожного транспорта.

Стремясь получить максимальную прибыль и повысить другие экономические показатели своей деятельности, операторы зачастую пренебрегают перевозками низкодоходных грузов. Чтобы отдать подвижной состав под погрузку высокодоходных грузов, операторские компании часто согласовывают длительный простой вагонов или не стремятся обеспечить их загрузку при следовании в об-

ратном направлении [7]. Поэтому на сети железных дорог наблюдается увеличение порожнего пробега вагонного парка, снижение уровня использования грузовых вагонов по времени их оборота и производительности, сокращение количества сдвоенных операций с вагонами.

В результате грузоотправители вынуждены либо долго искать операторскую компанию для перевозки груза, зачастую на невыгодных для себя условиях, либо выбирать альтернативные способы перевозки, в основном с использованием автотранспорта.

В условиях профицита подвижного состава увеличение оборота вагона и порожнего пробега снижает эффективность использования железнодорожной инфраструктуры. В до-реформенный период целью организации вагонопотоков была экономия вагоно-часов, т. е. решалась задача поиска путей ускорения оборота вагона, в том числе за счет задержки локомотивов, чрезмерного расширения погрузочно-разгрузочных фронтов у клиентов для обработки целых маршрутов и т. д. В условиях дефицита инвентарных вагонов данные меры позволяли перевозить большее количество грузов ограниченным парком подвижного состава. С переходом инвентарного парка вагонов в частную собственность существовавшая

система распределения вагонопотоков перестала отвечать современным условиям и требует пересмотра.

Таким образом, в настоящее время целесообразно совершенствование инструментария системы распределения вагонного парка, для чего необходимо решение следующих задач:

- совершенствование системы распределения вагонопотоков с применением современных информационно-управляющих систем и цифровых технологий транспорта;

- совершенствование методов распределения вагонопотоков на сети железных дорог с учетом интересов всех участников перевозочного процесса;

- расширение взаимодействия участников перевозочного процесса за счет интеграции технологических процессов грузоотправителей и операторских компаний в перевозочную деятельность ОАО «РЖД»;

- разработка рекомендаций по совершенствованию нормативной базы железнодорожного транспорта.

При решении поставленных задач необходимо разработать критерии взаимодействия участников перевозочного процесса как инструментарий обоснования управляющих решений при распределении вагонного парка операторских компаний.

Материалы и методы исследования

В качестве критериев взаимодействия участников перевозочного процесса целесообразно принять приведенные ниже показатели функционирования перевозчика, грузоотправителя и операторских компаний, которые отражают основные особенности деятельности каждого игрока рынка железнодорожных перевозок.

Показатель 1. Скорость доставки груженого вагона, скорость порожнего вагона, сут. В дореформенный период качество использования вагонного парка отражал показатель *оборот вагона*. После реформирования железнодорожной отрасли владельцев вагонов стал интересовать не оборот вагона, а его доходность и рентабельность перевозки. В связи с чем одни авторы отмечают, что оборот вагона перестал быть единственным показателем качества эксплуатационной работы [8, 9], а другие, что этот показатель и вовсе потерял свою актуальность [10, 11].

Однако для перевозчика оборот вагона остается одним из наиболее важных показателей работы, поскольку имеет непосредственное влияние на загруженность инфраструктуры [12]. В условиях дефицита пропускной способности на основных направлениях сети железных дорог ускорение оборота вагона позволит снизить нагрузку на инфраструктуру и работников, занятых в эксплуатационной работе. Следует отметить, что для ОАО «РЖД» целесообразнее рассматривать оборот вагона не в традиционном виде, представленном в формуле (1), а отдельно для груженого [формула (2)] и порожнего [формула (3)] рейсов вагона. Применение такого подхода обосновано тем, что время простоя вагонов в пункте выгрузки в ожидании отправления по новому назначению зависит от оператора подвижного состава и в отдельных случаях, даже при наличии грузов для перевозки в пунктах отправления, оператор подвижного состава предпочитает простой в ожидании более доходного груза.

Оборот вагона равен:

$$Q_v = \frac{1}{24} \left(\frac{l_n}{V_{уч}} + \frac{l_n}{L_B} t_{tex} + k_m t_{гр} \right), \quad (1)$$

где $\frac{l_n}{V_{уч}}$ – время нахождения вагона в пути следования; $\frac{l_n}{L_B} t_{tex}$ – средневзвешенное время нахождения вагона на технических станциях; $k_m t_{гр}$ – средневзвешенное время нахождения вагона на станциях погрузки и выгрузки.

Время доставки груза

$$T_{гр} = t_{ст}^п + T_{гр} + t_{tex} k_{tex} + t_{ст}^в, \quad (2)$$

где $t_{ст}^п$ – время, затраченное на операции с вагонами на станции погрузки, ч; $T_{гр}$ – время на продвижение вагонов по перегонам, ч; $t_{tex} k_{tex}$ – время нахождения вагонов на технических станциях, ч; $t_{ст}^в$ – время, затраченное на операции с вагонами на станции выгрузки, ч.

Время доставки порожнего вагона

$$T_{пор} = t_{ст}^о + T_{пор} + t_{tex} k_{tex} + t_{ст}^н, \quad (3)$$

где $t_{ст}^о$ – время, затраченное на операции с вагонами на станции отправления, ч; $T_{пор}$ – время на продвижение вагонов по перегонам, ч; $t_{ст}^н$ – время, затраченное на операции с вагонами на станции назначения, ч.

Для оценки качества перевозки по времени доставки более информативным показате-

телем будет скорость доставки как груза, так и порожнего вагона:

$$V_{гр} = \frac{l_n}{T_{гр}}, \quad (4)$$

$$V_{пор} = \frac{l_n}{T_{пор}}, \quad (5)$$

где $V_{гр}$ – скорость доставки груза, км/ч; l_n – расстояние доставки груза, км; $V_{пор}$ – скорость доставки порожнего вагона, км/ч.

Прибыль ОАО «РЖД» зависит от провозной платы, следовательно, чем быстрее будет осуществлена доставка груза или вагона из пункта отправления в пункт назначения, тем быстрее освободится инфраструктура железнодорожного транспорта общего пользования, что позволит быстрее выполнить следующий заказ. Как видно из формул (2) и (3), для реализации такой доставки важен каждый этап перевозочного процесса. Однако для увеличения пропускной способности перегонов и станций требуются дополнительные инвестиции, в то время как сокращение простоев на технических и грузовых станциях (относящиеся к зоне ответственности перевозчика) можно получить за счет организационных мер, в том числе оптимизации регулирования вагонных парков.

Показатель 2. Затраты на продвижение вагонов, р. Затраты перевозчика на продвижение вагонов по сети железных дорог целесообразно рассчитать методом единичных расходных ставок. Метод предполагает установление измерителей, которые определяют расходы. Таким образом, можно судить об изменении расходов по изменению измерителя.

В данном случае интерес представляют расходы на перемещение вагонов, связанные с использованием поездных и маневровых локомотивов, работой сотрудников, осуществляющих обработку поездов. Тогда затраты на продвижение вагонов по путям общего пользования будут рассчитываться следующим образом:

$$E_B = \sum Mt_{лок} e^{лчп} + \sum Mt_{ман} e^{лчм} + \sum Nt_{обр} e^{обр}, \quad (6)$$

где $\sum Mt_{лок}$ – сумма поездных локомотиво-часов; $e^{лчп}$ – расходная ставка 1 ч работы поездного локомотива; $\sum Mt_{ман}$ – сумма маневровых локомотиво-часов; $e^{лчм}$ – расходная ставка 1 ч работы маневрового локомотива; $\sum Nt_{обр}$ – сумма часов работы бригад ПТОВ и

ПКО; $e^{обр}$ – расходная ставка 1 ч работы бригады ПТОВ и ПКО.

Показатель 3. Доходность вагона, р. Оператора подвижного состава прежде всего интересует прибыль, получаемая от использования собственных вагонов. Соответственно, важнейший интерес для такой компании представляет доходность вагона в сутки [13]. Доходность вагона рассматривается как экономический показатель эффективности работы подвижного состава операторских компаний и является надежным механизмом оценки рентабельности перевозок.

Этот показатель определяется как отношение разницы выручки от перевозки и затрат на перемещение порожнего вагона к обороту вагона:

$$d = \frac{\sum n_i (C_B - C_3)}{\sum n_i t_i}, \quad (7)$$

где n_i – сумма родов вагонов i -го оператора, ваг; C_B – выручка, полученная от перевозки в вагонах i -й операторской компании, р.; C_3 – затраты на содержание вагона (текущий и плановый ремонт, лизинг, кредиты или аренду) и штата сотрудников; $\sum n_i t_i$ – сумма вагоно-суток подвижного состава i -го оператора, ваг.-сут.

Как следует из формулы (7), доходность вагона операторской компании зависит в том числе и от времени нахождения вагона в пути. Таким образом, чем быстрее вагон перемещается от грузоотправителя к грузополучателю, тем больший доход он может принести.

Показатель 4. Рентабельность перевозки, %. В общем случае рентабельность – это один из важнейших обобщающих показателей, характеризующий экономические результаты и эффективность работы железнодорожного транспорта [14]. Для операторской компании рентабельность отражает эффективность принимаемых управленческих решений по организации перевозок в собственных вагонах и рассчитывается как отношение прибыли к расходам в процентах:

$$R_{пер} = \frac{\Pi_{пер}}{C} \cdot 100 \%, \quad (8)$$

где $\Pi_{пер}$ – балансовая прибыль, вырученная от перевозок грузов, р.; C – затраты на перевозку, р.

Показатель 5. Производительность вагона, т-км. Для операторских компаний производительность вагона, как обобщающий показатель качества использования подвижного

состава, интересен с точки зрения использования вагонов во времени. Иными словами, определяющим фактором становится соотношение груженого и порожнего рейсов:

$$F_{\text{ваг}} = \frac{P_{\text{дин}}^{\text{гр}} S_{\text{ваг}}}{(1 - \alpha_{\text{пор}})}, \quad (9)$$

где $P_{\text{дин}}^{\text{гр}}$ – динамическая нагрузка груженого вагона, т/ваг.; $S_{\text{ваг}}$ – среднесуточный пробег вагона, км; $\alpha_{\text{пор}}$ – коэффициент, определяющий отношение порожнего пробега вагона к груженому пробегу.

Показатель 6. Удовлетворение заявок на перевозки, ваг. Оператор подвижного состава всегда стремится обеспечить своими вагонами погрузку высокодоходных грузов, в результате чего часть грузоотправителей сталкиваются с трудностями в поиске операторской компании из-за своего географического положения, тарифного класса производимой продукции или других параметров [15]. Поэтому задача своевременного обеспечения заявок грузоотправителей подвижным составом является актуальной на современном этапе развития железнодорожного транспорта. В этом случае необходимо стремиться к соблюдению равенства:

$$\sum A_i = \sum B_j, \quad (10)$$

где $\sum A_i$ – количество вагонов i -го оператора подвижного состава; $\sum B_j$ – количество заявок j -го грузоотправителя.

Показатель 7. Стоимость доставки, р. Одной из основных производственных задач любого предприятия является минимизация всех видов издержек. Минимизация издержек, в том числе транспортных, – задача грузоотправителя, поэтому в поле его интересов находится поиск путей доставки грузов с наименьшей стоимостью перевозки, которая складывается из следующих составляющих:

$$C = C_{\text{в}} + A_{\text{и}} + B_{\text{л}} i_{\text{ж}}, \quad (11)$$

где $C_{\text{в}}$ – тарифная ставка за вагон, р.; $A_{\text{и}}$ – ставка за использование инфраструктуры, р./ваг.; $B_{\text{л}}$ – тарифная ставка за использование локомотива, р./ваг.-км; $i_{\text{ж}}$ – среднее поясное расстояние, км.

Показатель 8. Срок доставки, сут. С увеличением парка грузовых вагонов одним из основных критериев качества работы железнодорожного транспорта стало соблюдение срока

доставки [8]. Для клиентов нежелательной является как просроченная доставка, так и досрочная подача вагонов. За нарушение сроков доставки ОАО «РЖД» несет материальную ответственность. Как отмечалось в [16], количество претензий от клиентов за несоблюдение сроков доставки постоянно растет, соответственно, растут выплаты по искам за несвоевременную доставку грузов. В результате доходы перевозчика снижаются, а неудовлетворенность качеством предоставляемых ОАО «РЖД» услуг растет.

Важнейшим условием для соблюдения срока доставки $T_{\text{д}}$ является отсутствие задержек по отправлению и в пути следования:

$$T_{\text{д}} = t_{\text{пр}} + t_{\text{отпр}} + t_{\text{дв}} + t_{\text{доп}}, \quad (12)$$

где $t_{\text{пр}}$, $t_{\text{отпр}}$ – время, затраченное на операции по прибытию и отправлению поезда соответственно; $t_{\text{дв}}$ – время на перемещение груза по перегонам или участкам; $t_{\text{доп}}$ – нормы времени на дополнительные операции, связанные с перемещением груза.

Результаты исследования

Проанализировав вышеприведенные показатели, можно сделать вывод, что такие составляющие, как время вагона в пути, объем маневровой работы на станциях, тарифная ставка за вагон, плата за пользование локомотивами, плата за пользование инфраструктурой, имеют непосредственное влияние как на работу каждого отдельно взятого участника перевозочного процесса, так и на их взаимодействие между собой. В связи с этим целесообразно использовать рассмотренные показатели для обоснования управляющих решений при распределении вагонного парка операторских компаний.

Основными показателями, интересующими всех участников перевозочного процесса, являются время продвижения вагона по маршруту и стоимость его перемещения.

Время продвижения вагона по маршруту $T_{\text{д}}$ можно условно разделить на время движения по перегонам и время простоя вагона на станции под операциями или без них:

$$T_{\text{д}} = t_{\text{дв}} + t_{\text{ст}}, \quad (13)$$

где $t_{\text{дв}}$ – время движения вагона по перегонам, ч; $t_{\text{ст}}$ – время простоя вагонов на станции, ч.

При этом маршрут необходимо составлять таким образом, чтобы сократить не только время в пути, но и издержки на перемещение вагонов.

Так как величина платы за вагон C и затраты операторских компаний C_3 формируются исходя из затрат на продвижение вагона по инфраструктуре, то при выборе маршрута следования целесообразно оперировать издержками перевозчика на продвижение вагона по маршруту:

$$E_d = E_{дв} + E_{ст}, \quad (14)$$

где $E_{дв}$ – стоимость продвижения вагона по перегону, р./ч; $E_{ст}$ – стоимость станционных операций, р./ч.

Таким образом, для принятия рациональных управляющих решений по распределению вагонов в промузле необходим комплексный показатель, учитывающий время и стоимость доставки:

$$\sum TE = \sum_1^k t_{двi} E_{двi} + \sum_1^m t_{стj} E_{стj} \rightarrow \min, \quad (15)$$

где $t_{двi}$ – время движения поезда по i -му перегону, ч; k – количество перегонов на маршруте; $E_{двi}$ – средняя стоимость продвижения вагонов по i -му перегону, р./ч; m – количество станций на маршруте; $t_{стj}$ – время простоя вагонов на j -й станции, ч; $E_{стj}$ – средняя стоимость простоя вагона на j -й станции с учетом станционных операций, р./ч.

Рассмотрим выбор оптимального маршрута доставки порожних вагонов на основе

комплексного показателя $\sum TE$ на примере полигона, представленного на рис. 3.

Для данного полигона предложено пять маршрутов доставки вагонов на станцию S с установленным временем прохождения поездов по перегонам, временем обработки поездов на станциях, стоимостью перемещения вагонов по перегонам и затратами на обработку вагонов на каждой станции (таблица).

На основе этих данных были выполнены расчеты и построена гистограмма значений комплексного показателя $\sum TE$ при движении поезда по маршрутам следования (рис. 4). При разработке графиков учитывалось, что требуемые вагоны для станции S могут находиться на станциях отправления рассматриваемых маршрутов.

Исходя из условий минимизации затрат времени и финансов можно сделать вывод, что маршрут 1 является наиболее оптимальным.

По результатам расчетов построены графики зависимости комплексного показателя $\sum TE$ от стоимости выполняемых операций с подвижным составом по маршруту следования (рис. 5, а) и времени продвижения вагонов (см. рис. 5, б).

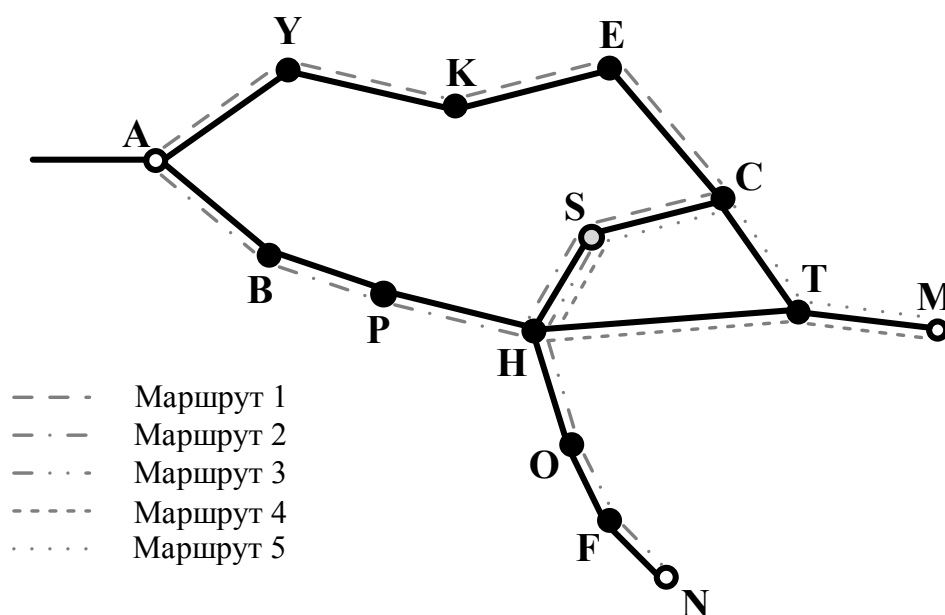


Рис. 3. Схема расположения станций полигона

Параметры рассматриваемых маршрутов

Номер маршрута	Станция маршрута	Время простоя вагонов на j -й станции $t_{стj}$, мин	Стоимость простоя вагона на j -й станции с учетом станционных операций $E_{стj}$, р./ч	Перегон	Время движения по i -му перегону $t_{двi}$, мин	Стоимость продвижения вагонов по i -му перегону $E_{двi}$, р./ч
1	Ст. А	97	4,98	Ст. А – ст. У	20	12,49
	Ст. У	63	4,38	Ст. У – ст. К	40	12,49
	Ст. К	120	5,27	Ст. К – ст. Е	30	11,69
	Ст. Е	81	5,51	Ст. Е – ст. С	20	11,69
	Ст. С	77	6,97	Ст. С – ст. S	30	11,69
	Ст. S	150	5,96	–	–	–
2	Ст. А	97	4,98	Ст. А – ст. В	30	12,49
	Ст. В	120	7,23	Ст. В – ст. Р	10	10,86
	Ст. Р	95	6,87	Ст. Р – ст. Н	60	10,86
	Ст. Н	84	6,47	Ст. Н – ст. S	70	10,86
	Ст. S	150	5,96	–	–	–
3	Ст. N	61	5,96	Ст. N – ст. F	30	14,21
	Ст. F	248	5,24	Ст. F – ст. О	50	12,49
	Ст. О	128	6,91	Ст. О – ст. Н	20	12,49
	Ст. Н	157	6,47	Ст. Н – ст. S	60	12,49
	Ст. S	150	5,96	–	–	–
4	Ст. М	122	7,68	Ст. М – ст. Т	40	11,69
	Ст. Т	165	8,94	Ст. Т – ст. Н	60	11,69
	Ст. Н	157	6,14	Ст. Н – ст. S	50	11,69
	Ст. S	150	5,96	–	–	–
5	Ст. М	122	7,68	Ст. М – ст. Т	40	11,69
	Ст. Т	165	8,94	Ст. Т – ст. С	60	11,69
	Ст. С	77	6,97	Ст. С – ст. S	30	11,69
	Ст. S	150	5,96	–	–	–

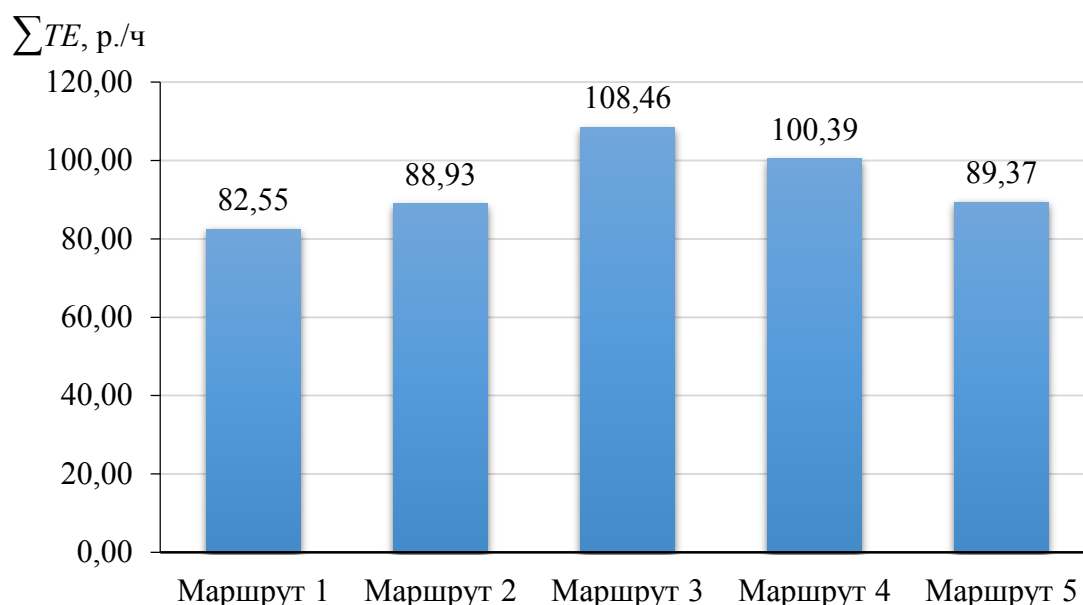


Рис. 4. Гистограмма значений комплексного показателя $\sum TE$ при движении поезда по маршрутам следования

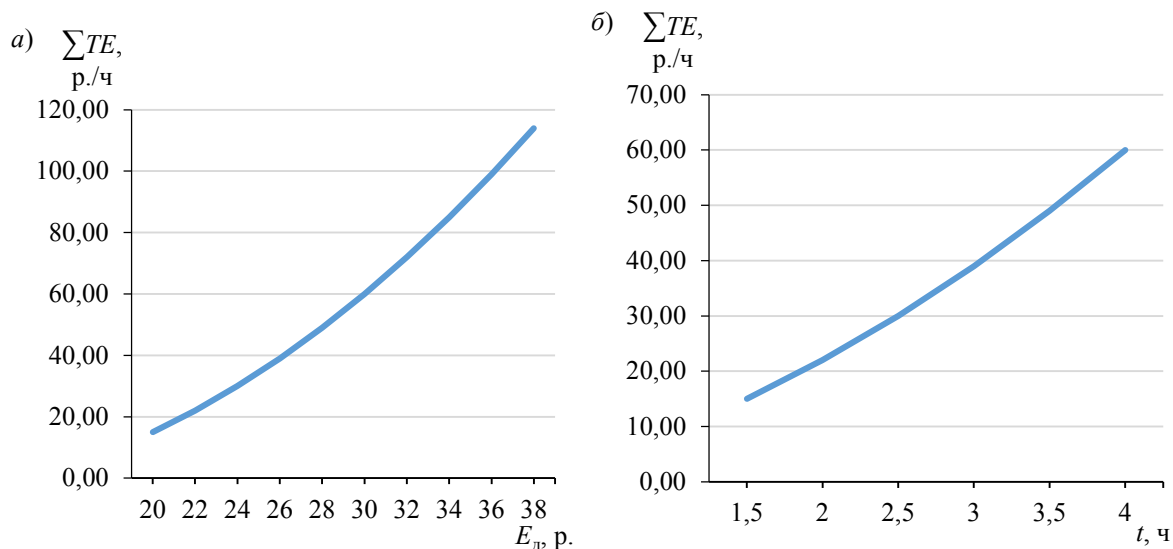


Рис. 5. График зависимости комплексного показателя $\sum TE$:

а – от стоимости продвижения поезда по маршруту; б – от времени продвижения поезда по маршруту

Выводы

Таким образом, предложенный комплексный показатель $\sum TE$ может служить в качестве критерия выбора оптимального распределения вагонов в промышленном узле.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что основной проблемой функционирования перевозчика, операторских компаний и грузоотправителей в современных условиях является разнонаправленность интересов и отсутствие глубокого взаимодействия участников перевозочного процесса.

В связи с этим необходимо совершенствовать систему распределения вагонного парка,

для чего были рассмотрены показатели взаимодействия участников перевозочного процесса, характеризующие основные особенности деятельности перевозчика, грузоотправителей и операторских компаний. На основе рассмотренных показателей предложен комплексный показатель, который можно использовать в качестве критерия оптимальности при выборе рациональной схемы взаимодействия участников перевозочного процесса и определении оптимального маршрута следования в условиях загруженности инфраструктуры.

Список источников

1. Перевозки грузов промышленных предприятий в вагонах операторских компаний / А. М. Островский, М. Г. Дружинина, А. А. Жаркова, Д. Ю. Жарков // Железнодорожный транспорт. 2013. № 3. С. 76–77.
2. Специальный проект. Рейтинг операторских компаний // РЖД-Партнер. 2012. № 11 (231). С. 46–52.
3. Раскрытие информации: грузовые перевозки // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9388> (дата обращения: 20.09.2021).
4. Островский А. М., Дружинина М. Г., Кузьмина А. А. Взаимодействие операторских компаний с промышленными предприятиями и железной дорогой // Железнодорожный транспорт. 2011. № 2. С. 61–63.
5. Жаркова А. А., Дружинина М. Г. Модель организации перевозок массовых грузов в промышленном регионе // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 265–268.
6. Статистические издания // Федеральная служба государственной статистики : [сайт]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210> (дата обращения: 20.09.2021).
7. Зайцева В. С. Чем ниже погрузка, тем лучше услуга? // РЖД-Партнер. 2019. № 15/16. С. 46–49.
8. Левин Д. Ю. Организация вагонопотоков в рыночных условиях // Мир транспорта. 2017. Т. 15, № 4 (71). С. 178–192.

9. Ерофеева Е. А., Зубков В. Н. Совершенствование методики технического нормирования показателя «оборот вагона» в условиях множественности операторов подвижного состава // Электронный научный журнал. 2016. № 6 (9). С. 80–89.
10. Шенфельд К. П. О значении показателя «оборот вагона» в современных условиях // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2008. № 6. С. 10–12.
11. Хусаинов Ф. И. Экономическая статистика железнодорожного транспорта. Очерки. М. : Наука, 2016. 100 с.
12. Варгунин В. И., Копейкин С. В., Гуляева О. А. Роль и место показателя оборота вагона в системе показателей эксплуатационной работы // Вестник Самарской государственной академии путей сообщения. 2007. № 7. С. 27–30.
13. Бородин А. Ф. Емкость железных дорог и управление вагонными парками // РЖД-Партнер. 2011. № 5. С. 32–34.
14. Экономика промышленного железнодорожного транспорта : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / В. А. Дмитриев, В. И. Зеленков, В. В. Клигман [и др.] ; под ред. В. А. Дмитриева. М. : Транспорт, 1981. 293 с.
15. Боднар И. Н. Оптимальное регулирование порожних вагонопотоков в условиях множества собственников железнодорожного подвижного состава // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4 (36). С. 22–32.
16. Эрлих Н. В., Эрлих А. В. Ответственность перевозчика за доставку грузов «точно в срок» // Наука и образование транспорта. 2015. № 1. С. 60–62.

References

1. Ostrovsky A. M., Druzhinina M. G., Zharkova A. A., Zharkov D. Yu. Cargo transportation of industrial enterprises in wagons of operator companies. *Railway Transport*. 2013;(3):76–77. (In Russ.).
2. Special project. Rating of operator companies. *RZD-Partner*. 2012;11(231):46–52. (In Russ.).
3. Disclosure of information: cargo transportation. *JSC “Russian Railways”: [site]*. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/ru/9388>.
4. Ostrovsky A. M., Druzhinina M. G., Kuzmina A. A. Interaction of operator companies with industrial enterprises and railways. *Railway Transport*. 2011;(2):61–63. (In Russ.).
5. Zharkova A. A., Druzhinina M. G. Model of organization of bulk cargo transportation in an industrial region. *Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources*. 2017;(3):265–268. (In Russ.).
6. Statistical publications. *Federal State Statistics Service: [site]*. (In Russ.). URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210>.
7. Zaitseva V. S. The lower the load, the better the service. *RZD-Partner*. 2019;(15–16):46–49. (In Russ.).
8. Levin D. Yu. Organization of Car Flows in Market Conditions. *World of transport*. 2017;15(4):178–192. (In Russ.).
9. Erofeeva E. A., Zubkov V. N. The improvement of technical regulation methodology increased “the turnover of the wagon” in terms of rolling stock operators plurality. *Electronic scientific journal*. 2016;6(9):80–89. (In Russ.).
10. Shenfeld K. P. On the significance of the indicator “wagon turnover” in modern conditions. *The Russian Railway Science Journal*. 2008;(6):10–12. (In Russ.).
11. Khusainov F. I. Economic statistics of railway transport. Essays. M.: Nauka; 2016. 100 p. (In Russ.).
12. Vargunin V. I., Kopeikin S. V., Gulyaeva O. A. The role and place of the car turnover indicator in the system of operational work indicators. *Vestnik Samara State Transport Academy*. 2007;(7):27–30. (In Russ.).
13. Borodin A. F. Capacity of railways and management of car fleets. *RZD-Partner*. 2011;(5):32–34. (In Russ.).
14. Dmitriev V. A., Zelenkov V. I., Kligman V. V., Shishkov A. D. Economics of industrial railway transport: A textbook for universities of railway transport. M.: Transport; 1981. 293 p. (In Russ.).
15. Bodnar I. N. Optimal adjusting of empty car traffic volume in the condition of great number of railway rolling stock owners. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2017;4(36):22–32. (In Russ.).
16. Erlich N. V., Erlich A. V. The responsibility of the carrier for the delivery of goods “just in time”. *Science and Education for transport*. 2015;(1):60–62. (In Russ.).

Информация об авторах

Е. Д. Псеровская – доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

А. А. Жаркова – старший преподаватель кафедры транспорта и логистики Сибирского государственного индустриального университета.

М. Г. Дружинина – доцент кафедры транспорта и логистики Сибирского государственного индустриального университета, кандидат технических наук.

Information about the authors

E. D. Pserovskaya – Associate Professor of the Freight Operation and Rolling Stock Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

A. A. Zharkova – senior lecturer of the Transport and Logistics Department, Siberian State Industrial University.

M. G. Druzhinina – Associate Professor of the Transport and Logistics Department, Siberian State Industrial University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 03.12.2021; одобрена после рецензирования 17.01.2022; принята к публикации 05.04.2022.

The article was submitted 03.12.2021; approved after reviewing 17.01.2022; accepted for publication 05.04.2022.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.21
doi 10.52170/1815-9265_2022_61_16

Анализ основных технических решений, направленных на повышение скоростей движения поездов в Республике Беларусь

Павел Владимирович Ковтун¹, Татьяна Алексеевна Дубровская²✉,
Алена Игоревна Стрижак³

^{1, 2, 3} Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

¹ sed@bsut.by

² rt-555@yandex.ru ✉

³ aliona.roshchyna@gmail.com

Аннотация. В настоящее время высокоскоростные железные дороги обеспечивают не только высокую скорость передвижения, но и высокий уровень надежности и безопасности, комфорта, экономичности. Новые поезда, построенные на основе инновационных технологий, формируют скорость в 300–350 км/ч, благополучно соперничают со всеми типами транспорта. Высокоскоростной наземный транспорт в современном представлении – это железнодорожный транспорт, гарантирующий движение поездов со скоростью более 200 км/ч. Его движение осуществляется либо колесным подвижным составом по рельсовому пути, либо подвижным составом на магнитной подушке.

Проблема повышения технической скорости движения поездов является важной задачей, стоящей перед Белорусской железной дорогой. Реконструктивные мероприятия по повышению скоростей движения на железной дороге должны проектироваться так, чтобы были гарантированы безопасность и бесперебойность движения поездов, сократилось время нахождения пассажиров в пути при обеспечении потребных размеров перевозок и наименьших строительно-эксплуатационных затратах.

При скоростном движении для обеспечения комфортабельности езды пассажиров предъявляются более жесткие требования к плану линии: кривые малых радиусов, длины прямых вставок и переходных кривых увеличиваются для стабилизации подвижного состава на концах круговых кривых, пересечения с автодорогами осуществляются в разных уровнях, заменяются стрелочные переводы, переустраиваются пассажирские платформы. Кроме того, модернизируются устройства системы блокировки и связи, усиливаются контактная сеть и тяговые подстанции, принимаются меры по защите окружающей среды.

При проходе подвижного состава по кривым возникают центробежные силы, стремящиеся опрокинуть его наружу кривой. Центробежная сила неблагоприятно действует на пассажиров, вызывает боковое воздействие на путь, перераспределение вертикальных давлений на рельсы обеих нитей и перегруз наружной нити, что приводит к усиленному боковому износу рельсов и гребней колес. Кроме того, возможны раскаты рельсов, уширение колеи или поперечный сдвиг рельсошпальной решетки, т. е. расстройство положения пути в плане.

Ключевые слова: железная дорога, реконструкция, повышение скорости, критерии, подвижной состав

Для цитирования: Ковтун П. В., Дубровская Т. А., Стрижак А. И. Анализ основных технических решений, направленных на повышение скоростей движения поездов в Республике Беларусь // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 16–23. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_16.

TRANSPORT

Original article

Analysis of the main technical solutions aimed at increasing speeds train traffic in the Republic of Belarus

Pavel V. Kovtun¹, Tatyana A. Dubrovskaya²✉, Aloyna I. Strizhak³

^{1, 2, 3} Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

¹ sed@bsut.by

² rt-555@yandex.ru ✉

³ aliona.roshchyna@gmail.com

Abstract. Currently, high-speed railways provide not only a high speed of movement, but also a higher level of reliability and safety, comfort, and efficiency. The newest trains, built on the basis of innovative technologies, develop speeds of 300–350 km/h, successfully compete with all types of transport. High-speed ground transport in the modern concept is a railway transport that provides train traffic at a speed of more than 200 km/h. Its movement is carried out either by wheeled rolling stock on a rail track.

The problem of increasing the speed of trains on the railway is an important task facing the Belarusian Railway. Reconstructive measures to increase the speed of movement on the railway should be designed so that the safety and uninterrupted movement of trains are guaranteed; the time of passengers on the way is reduced while ensuring the required size of transportation and the lowest construction and operating costs.

In high-speed traffic, to ensure the comfort of passengers' ride, more stringent requirements are imposed on the plan of the line: curves of small radii, the length of straight inserts and transition curves increase to stabilize the rolling stock at the ends of circular curves, intersections with roads are carried out at different levels, turnouts are replaced transfers, passenger platforms are being rebuilt. In addition, the devices of the central blocking and communication system are being modernized, the contact network and traction substations are being strengthened, and measures are being taken to protect the environment.

When the rolling stock passes along curves, centrifugal forces arise that tend to overturn the crew out of the curve. This can only happen in exceptional cases. However, the centrifugal force adversely affects passengers, causes lateral impact on the track, redistribution of vertical pressures on the rails of both threads and overloading of the outer thread, which leads to increased lateral wear of the rails and wheel flanges. In addition, rails can be skimmed, track widening or lateral displacement of the rail and sleeper lattice, that is, the disorder in the position of the track in the plan.

Keywords: railway, reconstruction, speed increase, criteria, rolling stock

For citation: Kovtun P. V., Dubrovskaya T. A., Strizhak A. I. Analysis of the main technical solutions aimed at increasing speeds train traffic in the Republic of Belarus. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):16–23. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_16.

Введение

Железные дороги идеально подходят для организации относительно дешевых, быстрых, удобных и минимально воздействующих на окружающую среду массовых перевозок. Многие железнодорожные предприятия и компании-операторы уже используют предоставляемые в этом отношении возможности [1].

Анализ последних исследований, проведенный авторами, показал, что вопрос повышения скоростей движения поездов в современном мире очень популярен.

Анализу реконструкции существующих железнодорожных линий под скоростное движение посвящены работы Г. З. Верцмана, Г. М. Шахунянца, А. И. Иоаннисяна, В. А. Лазаряна, И. В. Турбина, В. О. Певзнера, В. С. Мирнова, В. А. Подвербного, Г. Л. Аккермана, В. А. Копыленко, Л. З. Прасова, Е. С. Свинцова, С. В. Шкурникова, Д. Н. Кургана, Н. Б. Кургана и др.

Большинство европейских стран успешно решают проблему повышения скоростей движения поездов за счет мероприятий, которые проводятся как на существующих железных дорогах путем их модернизации, так и на специально построенных линиях [2–5].

На примере железных дорог Китая реализована полная оценка скоростей в процессе эксплуатации [6, 7]. В статье представлены

показатели и интегрированная структура для комплексной оценки рабочей скорости на высокоскоростной железной дороге.

Статья [8] посвящена анализу доступности высокоскоростных железных дорог в Корее. В качестве инструментов оценки используются тест дисперсионного анализа (ANOVA) и картографический аудит на основе географических информационных систем (ГИС).

В Российской Федерации разработана Программа организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации, в основу которой легли государственные программные документы. Проект предполагает как строительство новых высокоскоростных магистралей со скоростями до 400 км/ч (Москва – Казань), так и реконструкцию существующих участков со скоростями движения до 200 км/ч (Москва – Смоленск – Красное).

Основные пути повышения скоростей движения поездов

При решении задач развития скоростного движения по существующим линиям железной дороги дорога рассматривается как целостная система, состоящая из устройств и сооружений, которые из-за несовершенства технического состояния могут ограничивать скорость движения поездов на конкретном участке. Поэтому необходимо знать допустимую скорость движения

поездов на каждом участке железной дороги, а также параметры устройств, согласно которым железная дорога должна быть перестроена для реализации этих скоростей.

Согласно исследованию [1], существует четыре типа моделей повышения скоростей движения поездов, которые в настоящее время работают во всем мире, и их связи с обычными железнодорожными системами.

Модель первого типа предполагает использование подвижного состава на магнитной подушке, применяется в Японии.

Вторая модель эксплуатации – это смешанная высокоскоростная модель, в которой скоростной поезд может двигаться как по специально построенной новой линии, так и по модернизированным участкам обычных линий, что в конечном итоге приводит к снижению затрат на строительство. Эта модель соответствует французской системе TGV (Train à Grande Vitesse).

Третья модель работы – это смешанная традиционная модель, принятая в испанской железнодорожной системе, которая позволяет управлять некоторыми обычными поездами на высокоскоростных железных дорогах.

Четвертая модель – это полностью смешанная модель. Она предполагает использование как скоростных, так и обычных поездов на одной инфраструктуре. Эта модель используется для немецкой системы ICE, где высокоскоростные поезда используют модернизированные обычные линии, а грузовые поезда – резервную пропускную способность высокоскоростных линий в ночное время.

Таким образом, изучив опыт разных стран по повышению скоростей движения поездов, авторы ставят основной целью данной статьи дальнейшее изучение основных технических решений по повышению скоростей движения поездов в Республике Беларусь. На рисунке схематично представлены основные технические решения по повышению скоростей движения поездов.

Повышение скоростей движения поездов за счет изменения нормативно-технической документации связано с различными обоснованными «упрощениями» допусков по содержанию и эксплуатации железнодорожного пути. Так, увеличение норматива величины непогашен-

ного ускорения с 0,7 до 0,9 м/с² (например, подвижного состава «Ласточка») позволяет быстрее проходить существующие криволинейные участки с большей скоростью.

Повысить скорости движения поездов на существующих железнодорожных линиях можно и за счет использования улучшенного подвижного состава. Например, с 2010 г. в Беларуси производится современный подвижной состав Stadler, который может эксплуатироваться на железных дорогах колеи 1520 мм с эксплуатационной скоростью до 160 км/ч.

Подвижной состав «Стриж» курсирует между Москвой и Берлином и проходит транзитом через территорию республики. Его особенностью является возможность изменения ширины колеи с 1520 на 1435 мм и обратно при скорости движения до 15 км/ч.

Подвижной состав «Ласточка» проходит по участку второго транспортного коридора и соединяет две столицы – Москву и Минск. Развивает скорость до 140–160 км/ч и может проходить криволинейные участки пути быстрее за счет увеличенного значения допускаемого непогашенного ускорения.

Повышение скоростей, связанное со строительством высокоскоростных магистралей (ВСМ), характеризуется высокой стоимостью и является, как правило, одним из наиболее крупных инфраструктурных проектов в реализующих их странах. Такие проекты оказывают значительное долгосрочное влияние на национальную транспортную систему и ее развитие. Как показывает мировой опыт, создание сети ВСМ может вызывать существенные социально-экономические эффекты, оправдывающие затраты на их строительство. Однако, зачастую, строительство новых магистралей связано с ограничением места (особенно это касается второго и третьего пути) и наличием существующей инфраструктуры, которая не позволяет строить дополнительные пути.

Реконструкция железнодорожного пути ориентирована на увеличение несущей способности, прочности, долговечности и иных характеристик надежности как железнодорожного пути в целом, так и его составных частей, обеспечивающих продление продолжительности жизненного цикла, уменьшение трудозатратности и цены технического об-



Основные технические решения по повышению скоростей движения поездов

служивания пути, а также получение экономического эффекта при его эксплуатации, в том числе за счет повышения скоростей движения поездов.

К реконструкции железнодорожного пути относятся работы, приводящие к изменению категории пути, а также к увеличению грузоподъемности искусственных сооружений, возможности пути и искусственных сооружений нести повышенные осевые и погонные нагрузки, изменению пространственных характеристик (плана и профиля пути, геомет-

рии балластной призмы, земляного полотна, негабаритных мест), изменению конструкции пути с устройством новых водоотводных, защитных и укрепительных сооружений.

При разработке проекта реконструкции существующей железной дороги решают следующие задачи: оптимизация плана и профиля существующей железнодорожной линии; улучшение состояния верхнего строения пути, позволяющее пропускать скоростные поезда; модернизация станционных устройств и т. д.

Реконструкция плана линии заключается в увеличении радиусов криволинейных участков пути, так как кривые малых радиусов сдерживают скорости движения поездов. Однако не всегда есть возможность это реализовать, так как существующие пути и развитая инфраструктура в данном случае препятствуют этому мероприятию.

Допускаемая разность уклонов Δi на участке со скоростями движения поездов 160 км/ч не должна превышать 6 %. Если разность уклонов превышает нормативное значение, уклон спрямляется и проводится проверка путем тягового расчета. После этого на данном участке будет проведена реконструкция пути с целью повышения скорости движения.

Контактная подвеска во взаимодействии с токоприемниками электроподвижного состава должна обеспечивать бесперебойный токосъем при движении поездов с установленной скоростью, расчетных климатических условиях района и оптимальном сроке службы как контактного провода, так и контактных вставок (пластин) токоприемников. При повышении скоростей движения поездов существует необходимость переустройства контактной сети в связи с изменением положения центров стрелочных переводов для увеличения вставок между ними и осей путей для расширения пассажирских платформ, что потребует переноса опор, а также модернизации конструкции контактной подвески в соответствии с требованиями скоростного движения.

Применение полимерных материалов на электрифицированных железных дорогах во многих случаях позволяет найти совершенно новые простые пути для решения сложных технических задач, связанных с повышением скоростей движения поездов, надежности работы устройств, безопасности работ на контактной сети под напряжением, снижением стоимости изготовления конструкций, монтажа и эксплуатации, экономией дефицитных цветных металлов, продлением срока службы и улучшением внешнего вида конструкций контактной сети.

При размещении в плане промежуточных станций на прямых прежде всего необходимо устранить обратные кривые, устраиваемые на подходах для увеличения расстояния между осями главных путей (с 4,10 до 5,30 м). С этой

целью производится сдвигка одного из главных путей для обеспечения такой же величины междупутья на станции, как и на прилегающих перегонах. При увеличении скоростей движения убираются пассажирские платформы между главными путями, а расположенные рядом с главными путями доводятся по ширине до 8 м с устройством переходов в разных уровнях и переустраивается путевое развитие для реализации указанных требований, поскольку стрелочные переводы для скоростного движения имеют большую длину, чем обычные.

При повышении скоростей движения поездов верхнее строение пути должно соответствовать всем требованиям для реализации на нем высоких скоростей. Стрелочные переводы на главных путях требуется заменить на скоростные с непрерывной поверхностью катания и увеличить прямые вставки между ними до 25 м, а в трудных условиях – до 12,5 м, провести реконструкцию электрической централизации стрелок и сигналов, так как скоростные переводы имеют подвижные сердечники крестовины, требующие дополнительных электроприводов.

Изменение вида тяги, в частности электрификация железных дорог, является предпосылкой для развития транспортной инфраструктуры, обновления подвижного состава (в том числе приобретения подвижного состава нового поколения, предназначенного для высоких скоростей движения пассажирских и грузовых поездов) и обеспечивает доступность, высокое качество и безопасность услуг транспорта; увеличение скорости доставки грузов, перевозки пассажиров; повышение эффективности функционирования транспортного комплекса.

Результаты технических решений по повышению скоростей движения поездов в Беларуси

Эффективность повышения скоростей движения поездов на территории Республики Беларусь вполне обоснована [9], так как расстояния и характер перевозок соответствуют факторам, определяющим сферу рационального его применения, в частности:

– протяженность направлений, на которых наблюдается наибольшая интенсивность перевозок, предполагающая затраты времени, которые соответствуют затратам времени на воздушном транспорте;

– обслуживание скоростными поездами ряда относительно близко расположенных один к другому крупных населенных пунктов, обеспечивающих достаточно большое число пассажиров;

– перевозка большого потока пассажиров, совершающих деловые поездки;

– перевод грузовых поездов на параллельный путь.

На Белорусской железной дороге внедрение скоростного движения пассажирских поездов возможно в следующих вариантах [3]:

– строительство новых линий;

– реконструкция существующих линий, в том числе изменение геометрических параметров линии (плана и продольного профиля), что потребует значительных капитальных вложений;

– введение усовершенствованного подвижного состава с возможностью реализации непогашенного поперечного ускорения $a_{\text{нп}} = 0,9 \text{ м/с}^2$ при безусловном обеспечении уровня комфортабельности езды пассажиров (включая изменение вида тяги).

На сегодняшний день на Белорусской железной дороге проводятся изыскания по повышению скоростей на направлениях транспортных коридоров, проходящих через территорию республики. IX коридор имеет два направления: IX А проходит через Терюху – Гомель – Витебск – Езерище (489 км), а IX В – через населенные пункты Гудогай – Молодечно – Минск – Жлобин (372 км). II транспортный коридор соединяет Москву и Берлин и по территории Беларуси проходит через Оршу – Минск – Брест.

Стратегия развития железнодорожного транспорта обеспечивает увеличение перевозок и качественное их изменение, чтобы не только сохранить, но и расширить позиции железных дорог на рынке транспортных услуг.

В настоящее время в Республике Беларусь доля строительства новых линий совсем незначительна. Строятся в основном пути необщего пользования с примыканием к существующим станциям и узлам (пути необщего пользования ОАО «Нафтан», Петриковского ГОК ОАО «Беларуськалий» и др.). На всех магистральных и дорогах общего пользования назначается реконструкция. Тем не менее на железных дорогах стран мира есть примеры строительства отдельных линий для грузо-

вого и пассажирского движения с различными скоростями.

Чтобы развивать у себя скорость до 160 км/ч, необходим соответствующий подвижной состав. В первую очередь такие поезда запускаются между Брестом и Минском, а также между Гомелем и Минском.

В рамках реализации госпрограммы развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016–2020 г. [10] в 2019 г. на дорогу было поставлено три шестивагонных дизель-поезда ДП6, а в 2020 г. – еще три польского производства. Это позволило реализовывать новый современный формат пассажирских перевозок на неэлектрифицированных направлениях со скоростями до 140 км/ч.

В 2019 г. между Белорусской железной дорогой и компанией ЗАО «Штадлер Минск» был подписан контракт на поставку 10 современных пятивагонных электропоездов серии ЭПМ. В настоящее время поступило уже три электропоезда. Новый подвижной состав будет задействован на наиболее востребованных у пассажиров электрифицированных участках Белорусской железной дороги, например на направлении Гомель – Минск. Белорусская железная дорога с 6 сентября приступила к пробной эксплуатации с пассажирами. Максимальная скорость новых пятивагонных электропоездов составляет 160 км/ч. Поставка еще семи электропоездов запланирована на октябрь 2021 – апрель 2022 г. [11].

В настоящее время кафедрой «Проектирование, строительство и эксплуатация» Белорусского государственного университета транспорта проводятся технические изыскания на предмет установления «барьерных» мест, препятствующих повышению скоростей движения на направлении Гомель – Брест. Направление разбито на отдельные участки, так как причиной ограничения скорости является состояние объектов путевого хозяйства. К ним относятся: криволинейные участки малых радиусов (перегон Калинковичи – Лунинец), стрелочные переводы крутых марок (участок Гомель – Калинковичи) и др.

На направлении Могилев – Жлобин – Гомель для того, чтобы вышеуказанный маршрут был востребован у пассажиров и грузоперевозчиков, время следования должно быть минимальным. По участку предполагается по-

вышение установленных скоростей движения грузовых поездов до 100 км/ч, а пассажирских – до 140 км/ч. По всему направлению имеются проблемные места с точки зрения плана линии. Кривые радиусами 500–600 м встречаются на подходах к раздельным пунктам (ст. Быхов, р. п. Старосельский и др.). Однако в связи с достаточно развитой инфраструктурой населенных пунктов увеличение данных радиусов является затруднительным из-за значительных сдвижек кривых и переноса инженерных коммуникаций.

Предварительный анализ технических характеристик данного участка показал, что на протяжении от ст. Быхов до границы обслуживания Могилевской дистанции пути можно уве-

личить скорости движения поездов до 140 км/ч и более за счет проведения необходимых путеремонтных мероприятий. Наличие остальных криволинейных участков и их существующие радиусы позволяют выполнить путеремонтные мероприятия без переустройства кривых, за исключением «барьерного» места.

Вывод

Выбор возможных вариантов повышения скоростей движения поездов в любом случае является технико-экономической задачей высокого уровня сложности. Возможны как отдельные реконструктивные мероприятия, так и их различные сочетания. Решение зависит от рассматриваемых факторов в каждом конкретном случае.

Список источников

1. How Do High-Speed Railways Spur Innovation? / D. Sun, S. Zeng, H. Ma, J. J. Shi // *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2021. P. 1–14. URL: https://www.researchgate.net/publication/353378434_How_Do_High-Speed_Railways_Spur_Innovation (дата обращения: 10.09.2021).
2. The effectiveness of EC policies to move freight from road to rail: Evidence from CEE grain markets / R. Pittman, M. Jandová, M. Król [et al.] // *Research in Transportation Business & Management*. 2020. Vol. 37. P. 100482.
3. Дубровская Т. А. Обоснование проектных решений при реконструкции железных дорог для скоростного движения пассажирских поездов в Республике Беларусь : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.06. М., 2021. 159 с.
4. Horvat F., Fischer S. Magistrale for Europe // *Közlekedésépítési Szemle*. 2009. Vol. 59, no. 5. P. 3337.
5. Identification of the railway reconstruction parameters at imposition of high speed traffic on the existing lines / I. Lebid, I. Kravchenya, T. Dubrovskaya [et al.] // *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. P. 05003.
6. Zhang J., Zhang J. Comprehensive Evaluation of Operating Speeds for High-Speed Railway: A Case Study of China High-Speed Railway // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Vol. 1. P. 1–16.
7. Youtong Fang, Yuehong Zhang. *China's High-Speed Rail Technology*. Singapore : Zhejiang University Press, 2018. 587 p.
8. Chang J. S., Lee J.-H. Accessibility Analysis of Korean High-speed Rail: A Case Study of the Seoul Metropolitan Area // *Transport Reviews*. 2008. Vol. 28, no. 1. P. 87–103.
9. Миронов В. С., Руденко Т. А. Анализ эффективности скоростного движения пассажирских поездов в Республике Беларусь // *Материалы III Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса»*. Гомель : Белорусский государственный университет транспорта, 2013. С. 300–302.
10. Государственная программа развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016–2020 годы : официальный текст. М., 2016. 62 с.
11. БЖД начнет пробную эксплуатацию новых 5-вагонных электропоездов межрегиональных линий бизнес-класса // *Белта* : [сайт]. URL: <https://www.belta.by/society/view/bzhd-nachnet-probnuju-ekspluatatsiju-novyh-5-vagonnyh-elektropoezdov-mezhregionalnyh-linij-biznes-457633-2021/> (дата обращения: 02.09.2021).

References

1. Sun D., Zeng S., Ma H., Shi J. J. How Do High-Speed Railways Spur Innovation? *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2021:1–14.
2. Pittman R., Jandová M., Król M., Nekrasenko L., Paleta T. The effectiveness of EC policies to move freight from road to rail: Evidence from CEE grain markets. *Research in Transportation Business & Management*. 2020;37:100482.
3. Dubrovskaya T. A. Substantiation of design solutions for the reconstruction of railways for high-speed passenger trains in the Republic of Belarus: dissertation ... Candidate of Engineering. M., 2021. 159 p. (In Russ.).
4. Horvat F., Fischer S. Magistrale for Europe. *Közlekedésépítési Szemle*, 2009;59(5):3337.

5. Lebid I., Kravchenya I., Dubrovskaya T., Luzhanska N., Berezovyi M., Demchenko Y. Identification of the railway reconstruction parameters at imposition of high speed traffic on the existing lines. *MATEC Web of Conferences*. 2019;294:05003.
6. Zhang J., Zhang J. Comprehensive Evaluation of Operating Speeds for High-Speed Railway: A Case Study of China High-Speed Railway. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021;1:1–16.
7. Youtong Fang, Yuehong Zhang. China's High-Speed Rail Technology. Singapore: Zhejiang University Press; 2018. 587 p.
8. Chang J. S., Lee J.-H. Accessibility Analysis of Korean High-speed Rail: A Case Study of the Seoul Metropolitan Area. *Transport Reviews*. 2008;28(1):87–103.
9. Mironov V. S., Rudenko T. A. Efficiency analysis of high-speed passenger trains in the Republic of Belarus. *Proceedings of the III Intern. scientific-practical conf. "Problems and prospects for the development of transport systems and the construction complex"*. Gomel: Belarusian State University of Transport; 2013. P. 300–302.
10. State program for the transport complex development of the Republic of Belarus for 2016–2020: official text. M.; 2016. 62 p.
11. Belarusian Railways will start trial operation of new 5-car business-class interregional electric trains. *Belta: [site]*. 2021. (In Russ.). URL: <https://www.belta.by/society/view/bzhd-nachnet-probnuju-ekspluatatsiju-novyh-5-vagonnyh-elektropoezdov-mezhregionalnyh-linij-biznes-457633-2021/>.

Информация об авторах

П. В. Ковтун – заведующий кафедрой «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов» Белорусского государственного университета транспорта, доцент.

Т. А. Дубровская – доцент кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов» Белорусского государственного университета транспорта.

А. И. Стрижак – магистрант кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов» Белорусского государственного университета транспорта.

Information about the authors

P. V. Kovtun – Head of the Design, Construction and Operation of Transport Facilities Department, Belarusian State University of Transport, Associate Professor.

T. A. Dubrovskaya – Associate Professor of the Design, Construction and Operation of Transport Facilities Department, Belarusian State University of Transport.

A. I. Strizhak – Master Student of the Design, Construction and Operation of Transport Facilities Department, Belarusian State University of Transport.

Статья поступила в редакцию 18.10.2021; одобрена после рецензирования 25.01.2022; принята к публикации 05.04.2022.

The article was submitted 18.10.2021; approved after reviewing 25.01.2022; accepted for publication 05.04.2022.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.222.6
doi 10.52170/1815-9265_2022_61_24

Система организации работы с контейнерными поездами

Ольга Павловна Югина¹, Лариса Сергеевна Жарикова²✉

^{1, 2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ yugrinaop@yandex.ru

² kazantsevals1@gmail.com✉

Аннотация. На всей сети ОАО «РЖД» одним из основных является проект развития Восточного полигона. Он объявлен полигоном опережающего развития. Одними из главных задач развития Восточного полигона являются наращивание объемов международных железнодорожных контейнерных перевозок, а также снижение их себестоимости. Организация работы в этом направлении на Западно-Сибирской железной дороге предусматривает для повышения провозной способности внедрение длинносоставных контейнерных поездов.

Целями исследования являются рассмотрение вопроса совершенствования технологии работы ст. Клешиха при формировании длинносоставных поездов и экономическое обоснование изменения технологии работы с такими поездами. Актуальность предлагаемой темы определяется необходимостью развития формирования и отправления ускоренных поездов на Восточное направление. Поскольку ст. Клешиха является пунктом взаимодействия нескольких видов транспорта и играет большую роль в развитии Новосибирского узла, необходимо определить целесообразность внедрения технологии формирования длинносоставных поездов (100 усл. ваг.) на станции.

В статье предложены технические решения при планировании перевозок грузов железнодорожным транспортом. Разработанная авторами технология работы станции позволит избежать критической загрузки станций и участков, не прибегать к излишним мерам оперативного вмешательства диспетчерского персонала, что сократит эксплуатационные затраты на перевозку.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, контейнерный поезд, грузовая перевозка, маршрутизация, регулирование перевозок, календарное планирование

Для цитирования: Югина О. П., Жарикова Л. С. Система организации работы с контейнерными поездами // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 24–32. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_24.

TRANSPORT

Original article

Organization system of work with container trains

Olga P. Yugrina¹, Larisa S. Zharikova²✉

^{1, 2} Siberian State University, Novosibirsk, Russia

¹ yugrinaop@yandex.ru

² kazantsevals1@gmail.com✉

Abstract. One of the main projects in the entire network of the railway of Russian Railways is the development of the Eastern landfall. It has been declared a testing ground for advanced development. One of the main tasks for the development of the Eastern Polygon is to increase the volume of international rail container traffic, as well as reduce their cost. The organization of work in this direction on the West Siberian Railway provides for the introduction of long-container trains to increase the carrying capacity.

The purpose of the study is to consider the issue of improving the technology of the Kleshchikha station when forming long trains and the economic justification for changing the technology of working with trains of their own formation. The relevance of the proposed topic is determined by the need to develop the formation and departure of accelerated trains to the Eastern direction. Since the Kleshchikha station is a point of interaction for several modes of transport and plays an important role in the development of the Novosibirsk hub, it is necessary to determine the feasibility of introducing the technology for the formation of long trains (100 standard cars) at the station.

The article proposes technical solutions for planning the transportation of goods by rail. The station operation technology developed by the authors will make it possible to avoid the critical loading of stations and sections, not to resort to excessive measures of operational intervention of the dispatching personnel, which will reduce the operating costs of transportation.

Keywords: railway transport, container train, freight transportation, routing, traffic regulation, scheduling

For citation: Yugrina O. P., Zharikova L. S. Organization system of work with container trains. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):24–32. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_24.

Введение

Российские железные дороги являются ключевым способом перевозки грузов и пассажиров. В связи с этим повышение устойчивости работы железнодорожного транспорта, его доступности, безопасности и качества предоставляемых им услуг является наиважнейшей задачей.

В настоящее время из-за недостаточного развития станций ОАО «Российские железные дороги» испытывает затруднения в пропуске вагонопотоков, так как темпы наращивания технической мощности отстают от роста объема перевозок. Это приводит к значительному увеличению неравномерности работы станций, уменьшению их маневренности и повышению загрузки устройств. В работе железнодорожного транспорта требуются новые идеи в организации местной работы, обеспечивающие взаимодействие с путями необщего пользования и снижение эксплуатационных расходов при простое местного вагона.

На всей сети ОАО «РЖД» одним из основных является проект развития Восточного полигона, объявленного полигоном опережающего развития. Одной из его главных задач является наращивание объемов международных железнодорожных контейнерных перевозок. В настоящий момент холдинг проводит системную работу по выходу на рынок транспортно-логистических услуг Азиатско-Тихоокеанского региона в сегменте контейнерных перевозок, а именно организации транзитных интермодальных перевозок. Одновременно планируется увеличивать объемы перевозок к 2025 г. в 1,5–2 раза по сравнению с существующим [1].

В связи с ростом размеров грузовых перевозок и увеличением объемов переработки вагонов одной из приоритетных стратегических целей ОАО «РЖД» является повышение пропускной и перерабатывающей способности сети железных дорог. В связи с модернизацией локомотивного парка увеличилась мощ-

ность локомотивов, поэтому появилась возможность повысить длину грузовых поездов. В свою очередь строительство новых путей в парках станций позволяет реализовать еще одну стратегическую задачу ОАО «РЖД» – развитие длинносоставного движения. Его актуальность сегодня рассматривается как эффективный инструмент, с помощью которого достигается повышение провозных способностей участков и направлений, производительности локомотивов и локомотивных бригад, создается резерв пропускной способности и обеспечивается сокращение потребления энергоресурсов на тягу поездов. Однако формирование длинносоставных поездов требует дополнительного количества путей для накопления составов, так как эти поезда формируются с учетом дополнительных условий вследствие безусловного выполнения требований безопасности движения [2, 3].

Материалы и методы исследования

В современных условиях основным инструментом повышения эффективности использования железнодорожной инфраструктуры является маршрутизация вагонопотоков и организация движения поездов по строго установленному расписанию. Принципы, согласно которым происходит формирование отправительских и технических маршрутов, оказывают большое влияние на результаты деятельности ОАО «РЖД». Маршрутизация перевозок способствует уменьшению юридических сроков доставки и их прогнозированию, сокращению времени в пути следования и потребного рабочего парка вагонов, позволяет реально планировать имеющиеся корреспонденции [4, 5].

Для освоения перспективных объемов перевозок к 2025 г. целесообразно рассмотреть возможность внедрения на ст. Клещиха новой технологии формирования длинносоставных контейнерных поездов (до 100 усл. ваг.) в направлении Восточного полигона. Рациональное использование имеющейся инфраструктуры стан-

ций требует внедрения маршрутизации с мест погрузки и организации технических маршрутов на путях наиболее оснащенных для этого станций (соответствующее путевое развитие, требуемая длина путей). Это способствует распределению сортировочной работы между станциями в узле или в рамках полигона [6].

Формирование технических маршрутов применяется для организации составов поездов из вагонов, загруженных одним или несколькими клиентами на одной или нескольких станциях. Технические маршруты проследуют максимально возможные расстояния без переработки в пути следования на станцию назначения (выгрузки) или расформирования. Порядок операций при маршрутообразовании от момента погрузки до момента прибытия на станцию назначения представлен на рис. 1 [5].

Кроме того, в связи с ростом перевозок грузов в контейнерах целесообразно реализовать услугу по ускоренной доставке грузов – *грузовой экспресс*. Формирование такого технического маршрута позволяет в значительной степени сокращать время нахождения грузов клиентов в пути посредством проследования поездом участка пути по специально разработанному расписанию. Внедрение грузового экспресса позволило вступить в конкурентную борьбу с автомобильным транспортом по скорости доставки грузов [7].

На примере ст. Клевшиха проанализирована возможность организации контейнерных поездов из вагонопотока различного назначения. Для этого были изучены объемы формируемого поездопотока за месяц и посуточно. Со станции поезда отправляются в основном по четырем

направлениям, значительное число составов – назначением Инская (66 поездов/мес.). Контейнерные поезда формируются на следующие станции Восточного полигона: Забайкальск, Владивосток, Уссурийск, Хабаровск – 50 поездов/мес. (в том числе Китай – 6). Данные представлены в табл. 1 и на рис. 2.

По данным табл. 1 и рис. 2 видно, что направление поездов со станции не всегда является равномерным. В отдельные дни оно составляет от двух до восьми составов в сутки. На неритмичность вывода вагонов со станции могут оказывать влияние такие факторы, как перерыв в погрузке (выгрузке) в выходные или праздничные дни, технические неисправности погрузочно-выгрузочных устройств на путях необщего пользования, несвоевременное оформление перевозочных документов, задержки во время проведения «окон» при выполнении ремонтно-строительных работ, а также излишние ожидания сформированными составами готовности поездных локомотивов и др.

Часть контейнеропотока образуется на ст. Клевшиха из погруженных контейнеров на путях необщего пользования (ПНОП), примыкающих к станции. Также Клевшиха принимает поезда из вагонов с контейнерными грузами, сформированные на станциях: Новосибирск-Восточный, Забайкальск, а также со станций Кузбасса. Максимальное количество вагонопотока поступает в разборочных поездах со ст. Инская (46 поездов).

Данные о прибывающих в расформирование поездах на ст. Клевшиха приведены в табл. 2 и на рис. 3.

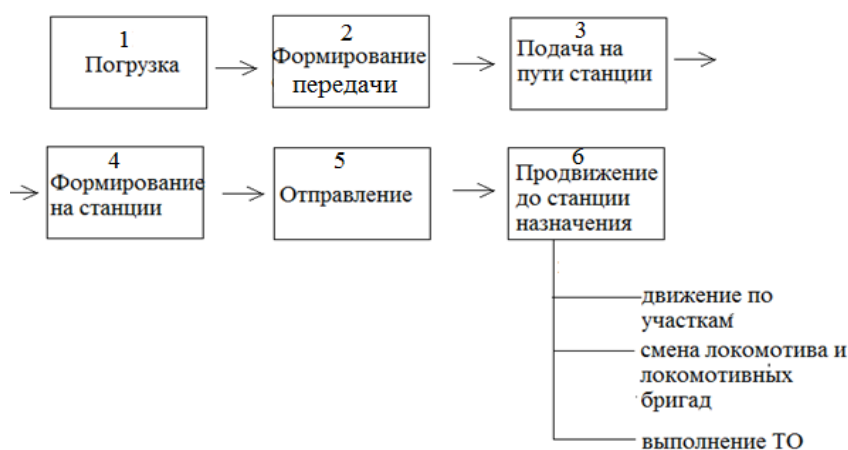


Рис. 1. Схема маршрутообразования от погрузки до станции назначения

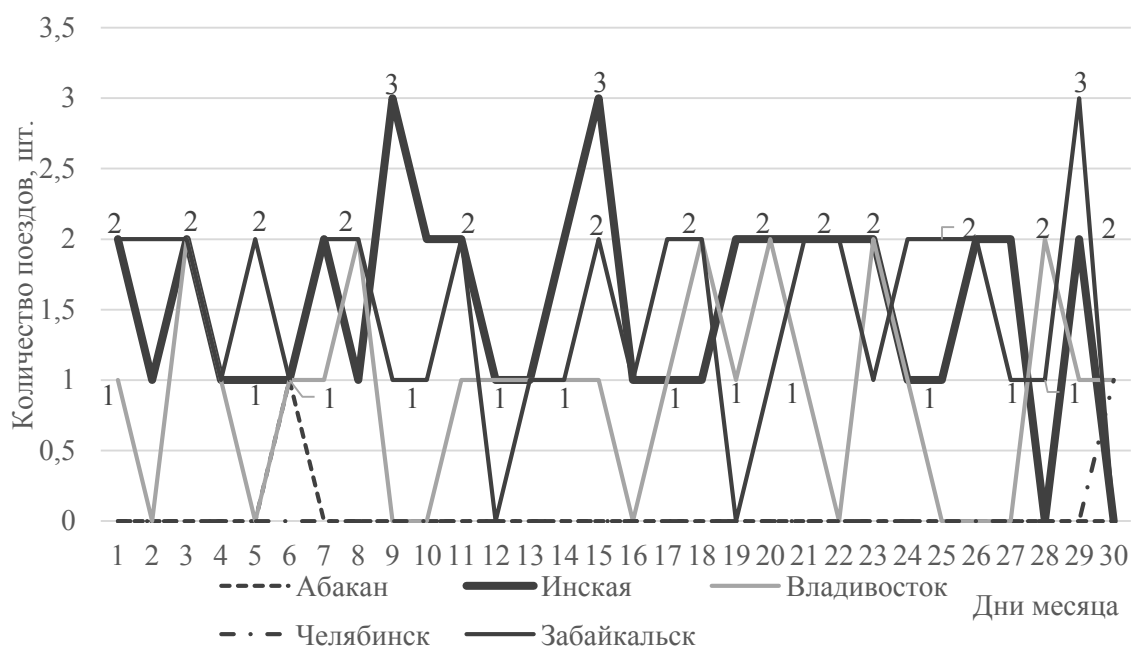


Рис. 2. Назначение сформированных поездов по ст. Клевиха



Рис. 3. Назначение поездов, прибывших в расформирование на ст. Клевиха

Из данных табл. 2 и рис. 3 следует, что прибытие поездов на станцию не всегда является равномерным. Как указывалось выше, неравномерность перевозок влияет на размеры перевозочных средств, необходимых для освоения заданных объемов работы. В свою очередь это определяет необходимость иметь резерв пропускной способности. Особенно это касается поездопотока в направлении морских портов к местам массовой выгрузки. Одно из решений проблемы неравномерности – организация работы по твердым «ниткам» графика. Эта технология в существующих условиях оперативного планирования поездной работы на удлиненных

участках обращения локомотивов позволит обеспечить своевременную пересылку последних [8, 9].

Результаты исследования

Из ранее приведенных данных следует, что на ст. Клевиха формируются контейнерные поезда (прямые отправительские маршруты) назначением на припортовые и пограничные станции Владивосток и Забайкальск, но доля таких поездов невелика. Однако в составе разборочных поездов назначением на ст. Инская можно выделить наиболее значительную корреспонденцию вагонопотока назначением на ст. Тайшет и далее (23 ваг./сут). Данную корре-

спонденцию предлагается рассматривать как прицепную часть прямых отправительских маршрутов в адрес Восточного полигона с целью упорядочения работы с вагонопотоками.

В настоящее время более актуальной становится работа по формированию длинносоставных поездов. По ст. Клешиха целесообразно использовать организацию составов длиной до 100 усл. ваг. путем прицепки к контейнерным поездам на Восток групп вагонов направлением Тайшет и далее. В результате реализации данного решения повысится транзитность корреспонденции вагонопотока на ст. Тайшет и далее путем исключения заезда на ст. Инская для смены локомотива и локомотивной бригады, а также для переформирования состава поезда. Кроме того, снизится загрузка ст. Инская, связанная с переработкой данных вагонов [10].

Накопление вагонов предлагается организовать на путях 7 и 9 (длиной 1 050 м). Контейнерные поезда на ст. Клешиха формируются только на путях общего пользования, так как длина ПНОП, примыкающих к станции, недостаточна. Основной состав контейнерного поезда назначением Владивосток или Забайкальск до 71 усл. ваг. накапливается на девятнадцатом пути, группа для пополнения из вагонопотока Тайшет и далее – на седьмом пути.

В результате проведенного анализа веса и длины поездов, сформированных на ст. Клешиха и отправленных на Восточный полигон, установлено, что он не превышает 4 000 т брутто, а для прогнозируемого веса длинносоставных поездов составит не более 5 300 т. Это соответствует установленным весовым нормам на заданном направлении.

Затраты времени на формирование длинносоставного контейнерного поезда на путях общего пользования железнодорожной станции рассчитываются с момента выставления первой группы на путь общего пользования и до готовности к отправлению по формуле

$$T_{\text{дл}} = T_{\text{нак}} + T_{\text{хв}} + T_{\text{гол}} + T_{\text{соед}} + T_{\text{обр.дл}},$$

где $T_{\text{нак}}$ – время накопления контейнерного поезда (КП), мин, исчисляется с момента выдачи первой группы вагонов КП на пути ст. Клешиха до момента выдачи последней группы КП, составляет 704 мин согласно анализу работы; $T_{\text{хв}}$ – время, затрачиваемое на формирование хвостовой части состава, мин; $T_{\text{гол}}$ –

время, затрачиваемое на формирование головной части состава, мин; $T_{\text{соед}}$ – время, затрачиваемое на соединение головной и хвостовой части состава, мин; $T_{\text{обр.дл}}$ – время, затрачиваемое на обработку длинносоставного поезда перед отправлением, мин.

Итоговое время на формирование состава значительно.

Меры по рациональной организации вагонопотоков должны быть основаны на комплексных решениях. Целями согласованного подвода вагонов определенных назначений к техническим станциям являются сокращение переработки вагонов и уменьшение их простоя под накоплением [5].

Разработка и внедрение новых технологических решений должны обеспечить повышение эффективности организации вагонопотоков за счет:

- увеличения транзитности вагонопотоков, включая снижение количества переработок, приходящихся на один вагон за рейс;
- сокращения количества повторно перерабатываемых и угловых вагонов;
- концентрации сортировочной работы на меньшем количестве станций.

Согласованный подвод вагонов определенных назначений к техническим станциям обеспечивается календарным планированием погрузки по назначениям и организацией на участках, примыкающих к техническим станциям, поездов отдельных назначений, следующих по постоянным расписаниям или в определенные периоды суток.

Календарное планирование целесообразно использовать на станциях погрузки и формирования контейнерных поездов для сокращения времени накопления. Совместно с грузоотправителем необходимо планировать погрузку по назначениям формируемых поездов и групп на определенные сутки. Заранее назначаются дни отправления для станций назначения груза [11, 12].

Формирование прицепных групп к контейнерным поездам позволит минимизировать эксплуатационные расходы на перевозку, определить более точные сроки доставки грузов, исключить простой с переработкой данных вагонов на ст. Инская, не увеличивая простой вагонов на ст. Клешиха. Отправителям заранее назначаются дни отправления для станций

Таблица 1

Назначение сформированных поездов по ст. Клещиха

Станция назначения	Дни месяца																														Количество поездов в сутки	Всего поездов
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
Абакан	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,033	1
Инская	2	1	2	1	1	1	2	1	3	2	2	1	1	2	3	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	0	2	0	1,533	46
Владивосток	1	0	2	1	0	1	1	2	0	0	1	1	1	1	1	0	1	2	1	2	1	0	2	1	0	0	0	2	1	1	0,900	27
Челябинск	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,033	1
Забайкальск	2	2	2	1	2	1	2	2	1	1	2	0	1	1	2	1	2	2	0	1	2	2	1	2	2	2	1	1	3	0	1,467	44
Всего	5	3	6	3	3	4	5	5	4	3	5	2	3	4	6	2	4	5	3	5	5	4	5	4	3	4	3	6	2	—	—	119

Таблица 2

Назначение поездов, прибывших в расформирование на ст. Клещиха

Станция назначения	Дни месяца																														Количество поездов в сутки	Всего поездов	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
Инская	2	3	3	5	2	1	3	3	2	4	1	3	0	3	2	2	1	1	2	2	2	3	2	2	3	1	2	2	2	2	2	2,200	66
Владивосток	2	2	1	2	1	2	2	1	3	2	3	0	2	2	0	1	1	1	3	0	0	2	2	2	2	1	1	2	0	2	1	1,467	44
Станции Кузбасса	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0,200	6	
Станции до-рог Запада	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,100	3	
Всего	4	5	4	8	3	4	5	4	5	6	4	3	2	5	2	5	2	3	5	3	3	5	4	5	2	3	5	3	4	3	—	119	

Таблица 3

Схема календарного плана погрузки для ст. Клещиха в адрес Восточного полигона

Направление	Календарные дни																														Тайшет и далее
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	+		+	+	+		+	+		+	+	+		+	+	+	+	+		+	+	+		+		+	+			+	+

назначения груза. При распределении подвижного состава в первую очередь обеспечиваются отправители, отгружающие продукцию по календарному плану. Разработка календарного плана заключается в распределении погрузки по назначениям и дням календарного периода [13].

Работа станции на основе календарного плана становится более эффективной, менее затратной, она не требует дополнительной маневровой работы. За счет внедрения твердых «ниток» отправители более конкретно ориентированы по срокам доставки грузов и заранее знают число и время погрузки по станциям назначения. Такой порядок работы удобен и более экономичен как для железной дороги, так и для грузоотправителей. Прицепная группа должна иметь не менее 30 вагонов, а среднесуточный вагонопоток данного направления составляет 23 вагона, поэтому нужно учесть равномерность.

Разработанная схема календарного плана погрузки на ст. Клешиха приведена в табл. 3.

Выводы

Экономия рабочего парка при маршрутных перевозках образуется за счет сокращения оборота вагона, так как состав маршрута не обуславливает трату времени на переработку вагонопотока, а в пути следования у него будут только технические операции по смене локомотивов и локомотивных бригад. Применение календарного планирования при формировании длинносоставных контейнерных поездов с прицепными группами сокращает потребный парк локомотивов, количество поездов уменьшается, что, однако, не ухудшает другие показатели эксплуатационной работы. Уменьшение числа поездов на графике сокращает потребность в локомотивах и локомотивных бригадах, снижает расход топлива и электрической энергии, сокращает число скрещений поездов на однопутных линиях. Повышение эффективности перевозочного процесса обеспечивает увеличение провозной способности сети железных дорог в

условиях ограничения инвестиционных ресурсов в среднесрочной перспективе [14].

Экономическая эффективность предлагаемого варианта следующая:

- переход к календарному планированию позволяет высвободить вагоны от переработки по ст. Инская – это почти 2 млн р. в год;
- формируемые длинносоставные контейнерные поезда позволяют сэкономить затраты локомотивного парка на 350 лок.-ч или на девять поездов от Клешихи до Тайшета;
- экономия от сокращения локомотивного парка составляет более 500 тыс. р. в месяц или почти 6 млн р. в год.

Общая экономия от проекта составит более 8 млн р. в год. Результаты получены путем моделирования технологического процесса работы железнодорожного полигона с применением расходных ставок.

Для освоения возрастающих объемов перевозок необходимо, чтобы к моменту увеличения их в направлении Восточного полигона имелось достаточное путевое развитие на станциях, а также отлаженная технология работы каждой станции с целью минимизации простоев и увеличения объемов перевозок [15, 16].

В настоящее время не все станции на дальневосточном направлении могут принимать длинносоставные поезда (100 усл. ваг.), так как им не позволяет уровень путевого развития. Но для пропуска длинносоставных поездов удлинение путей требуется только на станциях выполнения технических операций, а их развитие планируется в ближайшем будущем. Поэтому для освоения перспективных объемов целесообразно рассмотреть возможность внедрения на ст. Клешиха новой технологии формирования длинносоставных поездов в направлении Восточного полигона, в частности ст. Тайшет. Это позволит обеспечить пропуск контейнерных поездов с отцепкой вагонов только на выбранных технических станциях, организовать доставку контейнеров по принципу «точно в срок» только за счет оптимизации технологического процесса формирования контейнеропотока.

Список источников

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р // Правительство России : сайт. URL: <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm> (дата обращения: 21.01.2022).
2. Валинский О. С. Повышать эффективность планирования и управления локомотивным парком // Железнодорожный транспорт. 2017. № 2. С. 41–44.
3. Гапанович В. А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 9–15.
4. Югина О. П., Танайно Ю. А., Жарикова Л. С. Эффективность маршрутизации грузовых перевозок // Железнодорожный транспорт. 2020. № 6. С. 14–18.
5. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД». М., 2018. 540 с.
6. Кужель А. Л., Шапкин И. Н., Вдовин А. Н. Сквозные технологии маршрутизации грузовых перевозок // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 14–19.
7. Шаламова О. А. Практическое применение концепции «точно в срок» в транспортной логистике и ее моделирование // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 2 (41). С. 22–26.
8. Технология автоматизированного планирования и управления маршрутными перевозками / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, С. Л. Щепанов, Д. В. Рубцов // Железнодорожный транспорт. 2018. № 3. С. 8–15.
9. Югина О. П., Казанцева Л. С. Нормирование сроков доставки грузов и технология перевозочного процесса // Бюллетень транспортной информации. 2015. № 6 (240). С. 29–33.
10. Анализ проблемы неравномерности прибытия вагонопотоков на технические станции / А. А. Шатохин, А. В. Харитонов, Г. М. Биленко, А. В. Буракова // Железнодорожный транспорт. 2019. № 4. С. 20–23.
11. Кужель А. Л. Движение по расписанию – основа повышения эффективности перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. 2013. № 9. С. 4–7.
12. Сотников Е. А. Эффективность внедрения полигонных технологий // Железнодорожный транспорт. 2018. № 3. С. 4–8.
13. Жарикова Л. С. Нормирование времени нахождения вагонов на станциях и срок доставки грузов // Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТ. 2016. № 1 (8). С. 9–13.
14. Югина О. П. Техническое нормирование эксплуатационной работы в современных условиях // Железнодорожный транспорт. 2010. № 10. С. 25–30.
15. Иванов П. А. Об эффективности технологии тяжеловесного движения и перспективах ее развития // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 16–18.
16. Распоряжение ОАО «РЖД» «О совершенствовании технологии управления тяговыми ресурсами на У2» от 26.02.2018 № 2274-р. М., 2018. 56 с.

References

1. Development strategy of the Railway transport holding in the Russian Federation until 2030: Order of the Government of the Russian Federation of 17.06.2008 № 877-p. *Government of Russia: [site]*. (In Russ.). URL: <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm>.
2. Valinsky O. S. Improve the efficiency of locomotive fleet planning and management. *Railway transport*. 2017;(2):41–44. (In Russ.).
3. Gapanovich V. A. Issues of interaction of rolling stock and infrastructure in heavy traffic. *Railway transport*. 2016;(10):9–15. (In Russ.).
4. Yugrina O. P., Tanaino Yu. A., Zharikova L. S. Efficiency of cargo transportation routing. *Railway transport*. 2020;(6):14–18. (In Russ.).
5. Instructional instructions on the organization of car traffic on the railways of JSC “Russian Railways”. М., 2018. 540 p. (In Russ.).
6. Kuzhel A. L., Shapkin I. N., Vdovin A. N. End-to-end freight routing technologies. *Railway transport*. 2015;(7):14–19. (In Russ.).
7. Shalamova O. A. Practical application of the just-in-time concept in transport logistics and its modeling. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2017;2(41):22–26. (In Russ.).
8. Borodin A. F., Panin V. V., Shchipanov S. L., Rubtsov D. V. Technology of automated planning and management of route transportation. *Railway transport*. 2018;(3):8–15. (In Russ.).
9. Yugrina O. P., Kazantseva L. S. Rationing of cargo delivery times and technology of the transportation process. *Transport Information Bulletin*. 2015;6(240):29–33. (In Russ.).
10. Shatokhin A. A., Kharitonov A. V., Bilenko G. M., Burakova A. V. Analysis of the problem of car traffic uneven arrival at technical stations. *Railway transport*. 2019;(4):20–23. (In Russ.).
11. Kuzhel A. L. Scheduled movement is the basis for improving the efficiency of the transportation process. *Railway transport*. 2013;(9):4–7. (In Russ.).

12. Sotnikov E. A. The effectiveness of the introduction of landfill technologies. *Railway transport*. 2018;(3):4–8. (In Russ.).
13. Zharikova L. S. Rationing of the time spent by wagons at stations and the delivery time of goods. *Bulletin of scientific works of the Bryansk branch of Russian University of Transport*. 2016;1(8):9–13. (In Russ.).
14. Yugrina O. P. Technical regulation of operational work in modern conditions. *Railway transport*. 2010;(10):25–30. (In Russ.).
15. Ivanov P. A. On the effectiveness of heavy-lift technology and the prospects for its development. *Railway transport*. 2016;(10):16–18. (In Russ.).
16. The Order of Russian Railways On improving the technology of managing traction resources on U2 26.02.2018 № 2274-р. М.; 2018. 56 p. (In Russ.).

Информация об авторах

О. П. Югринa – доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Л. С. Жарикова – доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

O. P. Yugrina – Associate Professor of the Management of Operational Work Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

L. S. Zharikova – Associate Professor of the Management of Operational Work Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 22.03.2022; принята к публикации 05.04.2022.

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 22.03.2022; accepted for publication 05.04.2022.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 658.512:625.173
doi 10.52170/1815-9265_2022_61_33

Организация производства работ по капитальному ремонту пути на закрытом перегоне с учетом использования инновационной железнодорожно-строительной техники

Александр Сергеевич Пикалов¹, Владимир Константинович Милорадович²,
Александр Александрович Севостьянов³✉

^{1, 2} Центр инфраструктурных технологий АО «СТМ», Москва, Россия

³ Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ pikalov_alex@mail.ru

² pp_1987@bk.ru

³ seva2233@yandex.ru✉

Аннотация. В статье представлен краткий обзор развития технологий капитального ремонта железнодорожного пути с 1930 по 2021 г. Приведен анализ количества проводимых ремонтов железнодорожного пути в «оконном» режиме и режиме закрытого перегона. Выполнено сравнение объемов капитального ремонта пути, а также применяемых технологий в 1968 и 2021 гг. в части производительности полного комплекса работ. Представлены данные фактической выработки железнодорожно-строительных машин, полученные при капитальном ремонте железнодорожного пути в 2021 г. на Западно-Сибирской железной дороге. Определены слабые стороны существующей технологии выработки ведущих машин и неравномерной загрузки персонала по рабочим суткам. Для оптимизации времени производства работ и исключения неравномерной потребности задействованного персонала при капитальном ремонте железнодорожного пути требуется пересмотр технологии производства работ и создание инновационных железнодорожно-строительных машин, что позволит увеличить производительность полного комплекса работ на участках ремонта.

В статье изложены результаты разработок предложений по модернизации существующей техники с целью повышения производительности полного комплекса работ и равномерной загрузки персонала. За счет применения инновационной техники при капитальном ремонте железнодорожного пути сокращается как время производства работ, так и объемы ручного труда. В статье также приведены рекомендации по организации капитального ремонта железнодорожного пути с максимальной выработкой на участках ремонта в режиме закрытого перегона с учетом анализа фактической работы каждой путевой машины. Повышение производительности при работах по укладке железнодорожного пути, вырезке загрязненного балласта и замене инвентарных рельс на длинномерные рельсовые плети позволит увеличить производительность полного комплекса работ до 3 000 м пути в сутки.

Ключевые слова: железнодорожный путь, капитальный ремонт, технологический процесс, организация производства, рельсошпальная решетка, загрузка персонала, полный комплекс работ, производительность железнодорожно-строительных машин

Для цитирования: Пикалов А. С., Милорадович В. К., Севостьянов А. А. Организация производства работ по капитальному ремонту пути на закрытом перегоне с учетом использования инновационной железнодорожно-строительной техники // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 33–43. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_33.

TRANSPORT

Original article

Proposals for improving the efficiency of railway track overhaul due to innovative equipment

Alexandr S. Pikalov¹, Vladimir K. Miloradovich², Alexandr A. Sevostyanov³✉

^{1, 2} Center for Infrastructure Technologies of STM, Moscow, Russia

³ Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ pikalov_alex@mail.ru

² pp_1987@bk.ru

³ seva2233@yandex.ru✉

Abstract. The article presents a brief overview of the railway track technologies development for the railway track overhaul from 1930 to 2021. The analysis of the number of railway track repairs carried out in the "window" mode and "closed stage mode" is given. The comparison of the volumes of track overhaul repairs, as well as the technologies used in 1968 and 2021, in terms of the productivity of the full range of works, is made. The data obtained during the overhaul of the railway track in 2021 on the West Siberian Railway in terms of the actual production of railway construction machines are presented. The weaknesses of the existing technology in terms of the development of leading machines and uneven loading of personnel on working days are determined. To optimize the time of work and eliminate the uneven needs of the personnel involved in the overhaul of the railway track, it is necessary to revise the technology of work production and create innovative railway construction machines that will increase the productivity of the full range of work on the repair sites.

The article presents the results of the proposal development for the modernization of existing equipment, in order to increase the productivity of the full range of work and uniform loading of personnel. Due to the use of innovative equipment during the overhaul of the railway track, both the time of work and the volume of manual labor is reduced. The article also provides recommendations on the organization of major repairs of the railway track with maximum output at the repair sites in the closed stage mode, taking into account the analysis of the actual operation of each track machine. Increasing productivity during the work on laying the railway track, cutting out contaminated ballast and replacing inventory rails with long-length rail lashes will increase the productivity of the full range of works up to 3000 meters of track per day.

Keywords: railway track, overhaul repairs, technological process, production organization, track grid, loading of personnel, full range of work, productivity of railway construction machines

For citation: Pikalov A. S., Miloradovich V. K., Sevostyanov A. A. Proposals for improving the efficiency of railway track overhaul due to innovative equipment. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):33–43. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_33.

Введение

Железнодорожный путь является неотъемлемой частью железнодорожной инфраструктуры, которая напрямую влияет на благополучие всей страны, поэтому за первые две послевоенные пятилетки были проведены большие работы по реконструкции и усилению пути, особенно на важнейших грузонапряженных направлениях. Также были внедрены новые конструкции и создан ряд машин и механизмов для выполнения путевых работ и контроля над состоянием пути [1].

В период с 1966 по 1970 г. была организована широкая экспериментальная проверка новых конструкций верхнего строения, в частности бесстыкового пути, пути на железобетонном основании, а также различных типов железобетонных шпал и рельсовых скреплений.

Реконструкция и капитальный ремонт пути возлагались на путевые машинные станции треста «Рекпуть» и железных дорог. Их работа требовала широкого применения путеукладчиков, электробалластеров с выгребными устройствами, щебнеочистительных машин, саморазгружающихся вагонов, передвижных электростанций с соответствующим инструментом.

Путевые машинные станции – механизированные передвижные производственные единицы, созданные еще в предвоенные годы, являлись основной ремонтной базой путевого хозяйства. Именно в них были сосредоточены

все необходимые машины. «Происходивший в 1951–1954 гг., хотя и в недостаточных размерах, выпуск новых путеукладчиков позволил увеличить в последнем году пятой пятилетки объем механизированной укладки пути в 3,3 раза по сравнению с первым ее годом. Более интенсивный, хотя тоже меньший, чем это предусматривалось планом, выпуск путеукладчиков в 1955 г. позволит с начала работ в 1956 г. удвоить количество работающих комплектов путеукладчиков и перевести на механизированный способ укладки пути не менее половины общего количества ПМС» – отмечал в начале 1956 г. главный инженер треста «Рекпуть» С. А. Пашинин, впоследствии – начальник ЦП МПС, затем заместитель министра путей сообщения.

На основании приказа Министерства путей сообщения СССР № 35Ц «О дальнейшем улучшении работы восстановительных средств железных дорог» были созданы 50 машинно-путевых станций. За период с 1936 по 1938 г. ими было реконструировано 2 258 км пути и капитально отремонтировано почти 4 500 км, что позволило дистанциям пути высвободить силы для улучшения текущего содержания рельсовой колеи.

Машинно-путевые станции использовали балластеры, струги, шпалоподбойки, рельсорезки, рельсосверлилки. Однако весь основной комплекс транспортных, погрузочно-выгрузочных работ, замена элементов верхнего строения

и выправочно-отделочные работы по-прежнему производились вручную (рис. 1).

Только в 1940 г. на Западной железной дороге в МПС-52 началась опытная эксплуатация путеукладчиков Платова (рис. 2).

Рассматривая технологии ремонтов пути 1960-х гг. и 2021 г. можно сделать вывод о том, что производительность полного комплекса работ возросла лишь на 19,6 %, с 1 344 м отремонтированного пути в сутки в 1960 г. до 1 608 м в 2021 г.

Но необходимо учитывать, что состав основных работ, выходящих в капитальный ремонт железнодорожного пути, увеличен с учетом роста требований к пути, экономической целесообразности и развития используемой путевой техники [2, 3].

Запланированный в Центральной дирекции по ремонту пути объем тяжелых видов ремонта железнодорожного пути (табл. 1) составлял в 2020 г. 3 795 км (табл. 2), в 2021 г. – 4 500 км, при этом годовой объем ремонта 30-летней дав-



Рис. 1. Укладка железнодорожного пути вручную в послевоенные годы



Рис. 2. Укладка железнодорожного пути вручную с использованием путеукладчика Платова

Таблица 1

Опытные путевые и путевые машинные станции

Дирекция по ремонту пути	Количество и наименование структурных подразделений						Всего опытных путевых и путевых машинных станций
	1-я группа	Номера опытных путевых и путевых машинных станций	2-я группа	Номера опытных путевых и путевых машинных станций	3-я группа	Номера опытных путевых и путевых машинных станций	
ОКТ	1	88	7	1, 8, 29, 77, 82, 199, 283	–	–	8
МОСК	2	58, 68	8	12, 55, 97, 96, 99, 101, 103, 104	–	–	10
ГОРЬК	1	205	4	31, 109, 215, 230	1	72	6
СЕВ	2	65, 113	3	110, 114, 262	2	111, 194	7
С-КАВ	–	–	6	3, 24, 27, 34, 51, 143	–	–	6
Ю-ВОСТ	–	–	3	35, 53, 138	1	140	4
ПРИВ	1	50	2	152, 196	1	154	4
КБШ	2	148, 208	2	38, 151	3	49, 146, 149	7
СВЕРД	3	168, 170, 171	3	43, 169, 254			6
Ю-УР	1	172	3	16, 42, 176	2	36, 173	6
З-СИБ	4	19, 20, 22, 177	2	2, 216	1	239	7
КРАС	1	197	3	48, 181, 256	1	257	5
В-СИБ	3	56, 66, 183	3	45, 303, 340	1	67	7
ЗАБ	3	11, 46, 54	4	184, 185, 225, 328	1	247	8
ДВОСТ	3	18, 74, 217	5	186, 219, 233, 249, 288	–	–	8
Итого	27	–	58	–	14	–	99

Таблица 2

Объемы ремонта железнодорожного пути на ОАО «РЖД»

Вид ремонта	Год ремонта	Объем ремонта, км пути	
1. Капитальный ремонт железнодорожного пути	1950	5 020	
	1960	7 820	
	1970	7 189	
	1980	10 400	
	1990	11 732	
	1991	10 506	
2. Капитальный ремонт на новых материалах	2019	923,6*	2 094,1**
	2020	1 070,7*	1 983,4**
3. Сплошная замена рельсов новыми, сопровождаемая работами в объемах среднего ремонта (С), в период между капитальными ремонтами железнодорожного пути на участках бесстыкового железнодорожного пути	2019	639,7*	1 295,7**
	2020	704,2*	1 037,2**

* В режиме «окна».

** В режиме закрытого перегона.

ности составлял 10 506 км при развернутой длине железных дорог 125 057 км пути [2].

Вопрос оптимизации процессов ремонта железнодорожного пути и повышения эффективности работ в настоящее время достаточно актуален. Активно ведутся исследования по вне-

рению цифровых технологий в технологический процесс ремонта пути [3, 4]. Исследуются вопросы совершенствования системы управления техническим обслуживанием за счет корректировки сроков назначения ремонтов в зависимости от условий эксплуатации [5, 6], опреде-

ления достоверного уровня потребности в ремонтах [7], а также рационального размещения производственных баз ремонтно-путевого комплекса ОАО «РЖД» [8] и улучшения методов ремонта звеньев путевой решетки [9, 10].

Материалы и методы исследования

Существующая технология капитального ремонта пути на новых материалах, которая применяется в филиалах компании ОАО «РЖД», а именно в Центральной дирекции по ремонту пути, обеспечивает среднюю выработку полным комплексом работ 1 608 м отремонтированного пути в сутки. При этом задействуется более 200 ед. путевой техники и вагонов, а общая численность персонала, участвующего в данной технологии, достигает 350 чел. Причем распределение персонала происходит неравномерно в силу неоднородности распределения объемов ручных операций по всему фронту работ. В табл. 3 представлен перечень выполняемых операций и количество задействованного персонала, машинистов и монтеров

пути в стандартной технологии капитального ремонта пути.

Применение вышеперечисленных комплексов требует значительного объема ручного труда, если автоматизировать подпроцессы в каждом процессе, то можно достичь оптимизации задействованных человеческих ресурсов (табл. 4).

Кроме того, на численность персонала влияет производительность машин: если последние работают более 12 часов, для них требуется смена бригад, как машинистов, так и монтеров пути, и всего обслуживающего персонала.

Анализируя заявленную производительность железнодорожных машин заводами-изготовителями, можно сделать вывод, что на участках ремонта она не достигается из-за ограничения производительности на ведущей машине (табл. 5).

Например, фактическая выработка укладочного поезда на участках ремонта не достигает 300 м уложенного пути в час, при заявленной

Таблица 3

Количество задействованного персонала, машинистов и монтеров пути

Рабочие сутки	Выполняемая операция	Количество персонала, чел.	Итого за сутки, чел.
Первые	1. Установка заземлителей	4	186
	2. Работа струга	2	
	3. Работа комплекса № 1 УК (замена РШР)	72	
	4. Работа комплекса № 2 УК (замена РШР)	72	
	5. Работа ЩОМ № 1 + СЗ 800	25	
	6. Работа ЩОМ № 2 + СЗ 800	25	
Вторые	7. Работа ЩОМ № 1 + СЗ 800	25	145
	8. Работа ЩОМ № 2 + СЗ 800	25	
	9. Работа ХДВ № 1	4	
	10. Работа ВПО-С	4	
	11. Работа МКТ+СЗ	10	
	12. Работа ХДВ № 2	4	
	13. Работа Дуоматик + ДСП + РПБ	8	
	14. Перевод клемм в монтажное положение	20	
	15. Работа РВС	11	
	16. Работа комплекса № 1 (укладка плетей)	46	
	17. Работа комплекса № 2 (укладка плетей)	46	
	18. Работа машины ПРСМ № 1	6	
	19. Работа машины ПРСМ № 2	6	
Третьи	20. Работа комплекса № 1 (укладка плетей)	46	210
	21. Работа комплекса № 2 (укладка плетей)	46	
	22. Работа машины ПРСМ № 1	6	
	23. Работа машины ПРСМ № 2	6	
	24. Работа ХДВ № 3	4	
	25. Работа Дуоматик + ДСП + РПБ	8	
	26. Установка заземлителей	4	

Таблица 4

Предложение по автоматизации подпроцессов

Основной процесс	Подпроцесс	Предложение
1. Работа комплексов по замене рельсошпальной решетки	Перетяжки пакетов звеньев РШР	Разработка нового способа подачи пакетов РШР на кран
	Стыковка и рихтовка звена РШР при ее укладке	Разработка дополнительного оборудования, установленного на кран
	Сборка стыков и разгонка шпал по эпюре	Разработка оборудования для сборки стыков и разгонки шпал
2. Работа комплексов по замене инвентарных рельсовых плетей на длинномерные рельсовые плети	Демонтаж и монтаж скрепления	Разработка модуля (средней механизации) с возможностью съезда с пути
	Смена инвентарных рельсов на длинномерные рельсовые плети	Разработка модуля (средней механизации) с возможностью съезда с пути
3. Работа щебнеочистительных комплексов	Зарядка щебнеочистительного комплекса	Разработка дополнительного оборудования для автоматической зарядки комплекса
	Очистка балласта от загрязнителей	Изменение технологии очистки балласта от загрязнителей. Исключение вагонов-засорителей

Таблица 5

Производительность железнодорожно-строительных машин, задействованных в технологии капитального ремонта железнодорожного пути

Железнодорожно-строительная машина	Фактическая производительность на участке ремонта
1. Струг, м/ч	1 250
2. Укладочный кран (состоит из укладочного крана, моторных платформ, платформ, оборудованных универсальным съемным оборудованием), м/ч	294
3. Щебнеочистительные комплексы (состоят из щебнеочистительных машин и вагонов-засорителей), м/ч	193
4. Хоппер-дозаторные вагоны, м/ч	833
5. Выправочно-отделочные машины, м/ч	3 000
6. Кювето-траншейные машины, м/ч	1 250
7. Выправочно-отделочный комплекс (состоит из выправочной машины, распределителя-планировщика балласта и динамического стабилизатора пути), м/ч	833
8. Состав для перевозки рельсовых плетей, м/ч	500
9. Рельсосварочная самоходная машина, кол-во стыков в час	1

производительности крана 750 м уложенного пути в час. На производительность укладочного крана влияет перетяжка, подвоз пакетов рельсошпальной решетки, а также стыковка и рихтовка укладываемого звена. Данные операции не позволяют достичь заявленной производительности укладочного крана.

При существующей технологии щебнеочистительный комплекс является ведущей машиной в связи с наименьшей выработкой, так на участке длиной 5 000 м работа щебнеочистительного комплекса занимает 21 ч (28 % от общего времени работ).

Для достижения необходимой выработки по операциям при существующей технике требуется увеличение количества комплексов. Напри-

мер, в пооперационном графике указано, что работает два комплекса по замене рельсошпальной решетки, два комплекса для очистки балласта и два комплекса для замены инвентарных рельс на длинномерные рельсовые плети. Большее количество единиц увеличит риск поломки машин и снизит уровень надежности в целом.

На основе данных, полученных в 2021 г. из анализа картирования капитального ремонта пути, на закрытом перегоне Западно-Сибирской железной дороги отказоустойчивой техникой стали укладочные краны и выправочные машины (табл. 6, рис. 3).

На основании вышеизложенного готовность специализированных путевых машин можно определить исходя из данных о техни-

ческом обслуживании, учета наработки на отказ основных узлов и агрегатов. При соблюдении текущего обслуживания техники и плановой замены узлов и агрегатов техника на перегоне будет надежна, но повлиять на количество задействованных единиц на участке работ не представляется возможным.

Для оптимизации времени производства работ и исключения неравномерной потребности в персонале при капитальном ремонте железнодорожного пути требуется пересмотр технологии производства работ и создание инновационных железнодорожно-строительных машин, что позволит увеличить произво-

дительность полного комплекса работ на участках ремонта.

Для достижения вышеуказанных изменений необходимо рассмотреть требуемую производительность каждой железнодорожно-строительной машины (табл. 7).

Сравнение табл. 5 и 7 показало необходимость модернизации существующего или создания нового укладочного поезда, новой щебнеочистительной машины и комплекса по замене длиномерных рельсовых плетей.

При решении задач по автоматизации под-процессов (см. табл. 4) появляется возможность достичь необходимой производительности на

Таблица 6

Статистика отказов железнодорожно-строительных машин на закрытом перегоне Западно-Сибирской железной дороги

Железнодорожно-строительная машина	Количество техники, используемой на закрытом перегоне, ед.	Количество остановок из-за отказа машин	Количество техники, которая не смогла продолжить работу после отказа машины
1. Укладочный кран (демонтаж и укладка РШР)	6	3	0
2. Щебнеочистительный комплекс	5	12	2
3. Выправочный комплекс	2	1	0
4. Рельсосварочная машина	2	1	0

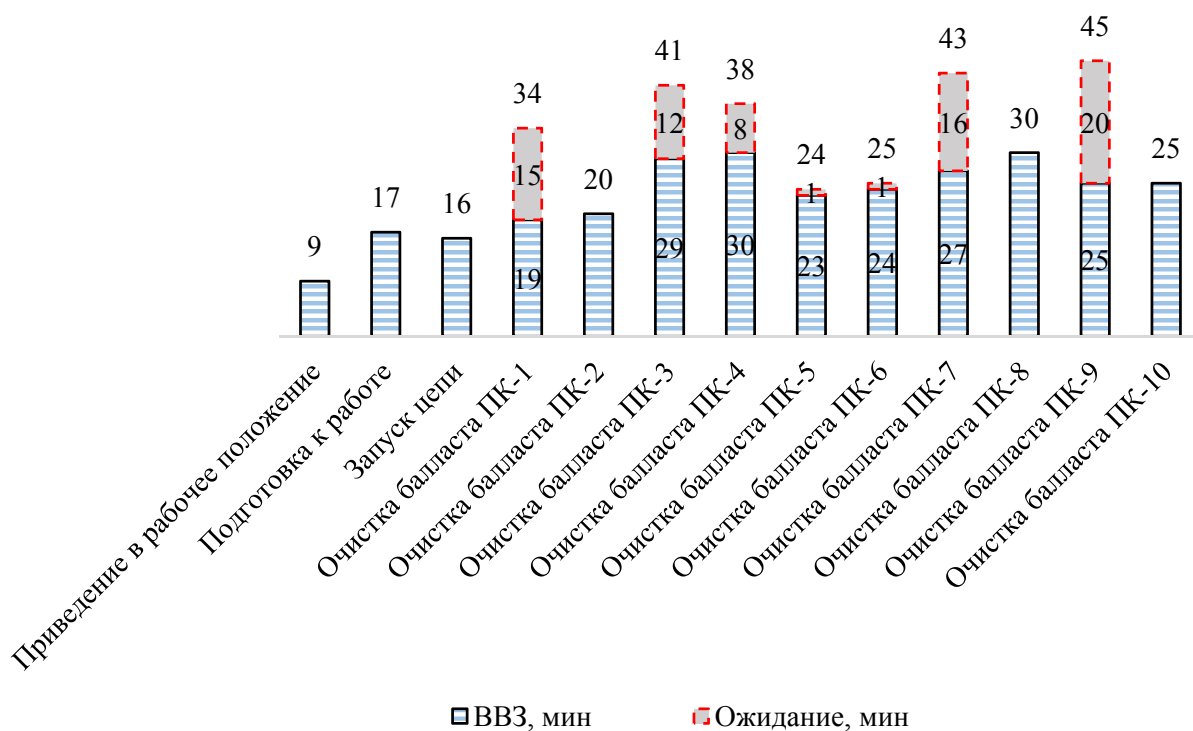


Рис. 3. Картирование работы щебнеочистительного комплекса на закрытом перегоне

Таблица 7

Требуемая производительность хозяйственных машин

Железнодорожно-строительная машина	Требуемая производительность на участке ремонта
1. Струг, м/ч	1 250
2. Укладочный кран (состоит из укладочного крана, моторных платформ, платформ, оборудованных универсальным съемным оборудованием), м/ч	500
3. Щебнеочистительные комплексы (состоят из щебнеочистительных машин и вагонов-засорителей), м/ч	500
4. Хоппер-дозаторные вагоны, м/ч	1 165
5. Выправочно-отделочные машины (ВПО, ВПО-С), м/ч	3 000
6. Кювето-траншейные машины, м/ч	1 250
7. Выправочно-отделочный комплекс (состоит из выправочной машины, распределителя-планировщика балласта и динамического стабилизатора пути), м/ч	1 500
8. Состав для перевозки рельсовых плетей, м/ч	500
9. Рельсосварочная самоходная машина, кол-во стыков в час	2

тех комплексах, которые являются ведущими в технологическом процессе капитального ремонта пути на новых материалах.

Результаты исследования

Повышение производительности при работах по укладке железнодорожного пути, вырезке загрязненного балласта и замене инвентарных рельс на длинномерные рельсовые

плети позволит увеличить производительность полного комплекса работ до 3 000 м пути в сутки (рис. 4).

Использование представленной инновационной техники позволит оптимизировать и исключить неравномерную потребность в персонале.

В табл. 8 представлено количество задействованного персонала по рабочим суткам при выполнении операций.

Таблица 8

Количество задействованного персонала по рабочим суткам

Операция	Бригада	Часы											
		Первые сутки (первая половина)											
		1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00
Снятие заземлений с опор контактной сети	№ 1 (4 чел.)	4	4	4									
УП № 1 (укладка)	№ 2 (6 чел.)	6	6	6	6	6	6	6	6				
Работа ЩОМ № 3 (очистка балласта)	№ 1 (4 чел.)				4	4	4	4	4	4	4	4	4
Работа ЩОМ № 2 (очистка балласта)	№ 3 (4 чел.)						4	4	4	4	4	4	4
Работа ЩОМ № 1 (очистка балласта)	№ 2 (4 чел.)									4	4	4	4
Работа ХДВ № 1 (выгрузка щебеночного балласта)	№ 2 (2 чел.)										2	2	2
Операция	Бригада	Первые сутки (вторая половина)											
		13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
Работа ЩОМ № 1 (очистка балласта)	№ 3 (4 чел.)	4	4	4	4								
Работа ХДВ № 1 (выгрузка щебеночного балласта)	№ 4 (2 чел.)	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
Работа ХДВ № 2 (выгрузка щебеночного балласта)	№ 5 (2 чел.)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Работа РВС (выгрузка длинномерных рельсовых плетей)	№ 6 (6 чел.)						6	6	6	6	6	6	6
Сбор инвентарных рельс крапом УК	№ 7 (4 чел.)									4	4	4	4
Работа ХДВ № 3 (выгрузка щебеночного балласта)	№ 4 (2 чел.)										2	2	2

Операция	Бригада	Часы											
		Вторые сутки (первая половина)											
		1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00
Работа ХДВ № 2 (выгрузка щебеночного балласта)	№ 5 (2 чел.)	2											
Работа РВС (выгрузка длинномерных рельсовых плетей)	№ 6 (6 чел.)	6	6	6	6								
Сбор инвентарных рельс кра-ном УК	№ 7 (4 чел.)	4	4	4	4	4	4	4	4				
Работа ХДВ № 3 (выгрузка щебеночного балласта)	№ 2 (2 чел.)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
Постановка заземлений опор контактной сети	№ 1 (4 чел.)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Операция	Бригада	Вторые сутки (вторая половина)											
		13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
Постановка заземлений опор контактной сети	№ 7 (4 чел.)	4											

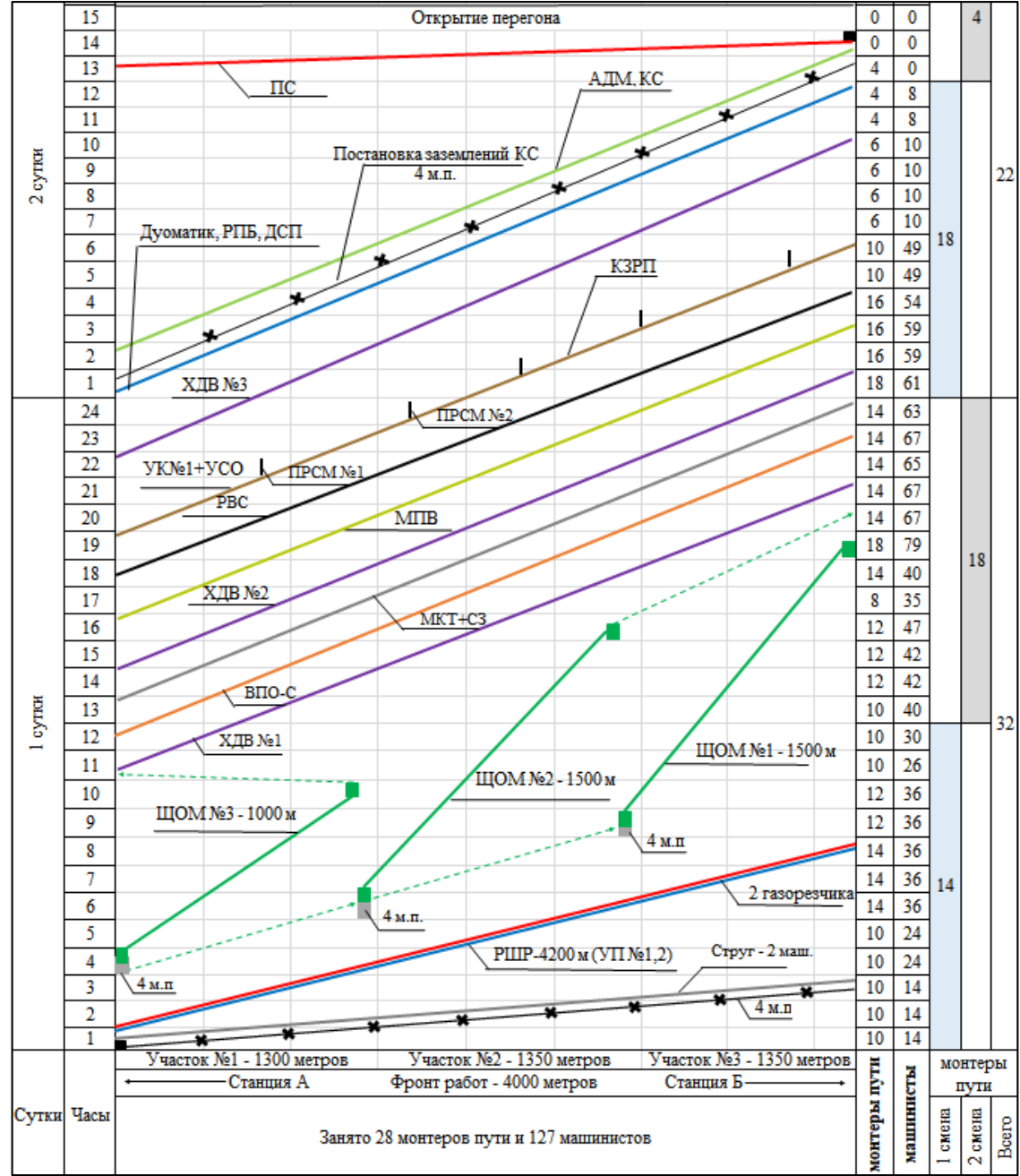


Рис. 4. Пооперационный график капитального ремонта пути с использованием инновационной техники

Таблица 9

Анализ эффективности перспективного технологического процесса

Бригада	Количество задействованного персонала (монтеры пути)		Эффект
	в стандартной технологии ЦДРП (к1201ц-20 ТП (КР 1600))	в перспективной технологии капитального ремонта пути	
№ 1	4	4	–
№ 2	54	6	–48
№ 3	54	4	–50
№ 4	4	2	–2
№ 5	4	2	–2
№ 6	2	6	+4
№ 7	42	4	–38
№ 8	42	0	–42
Итого	206	28	–178

Выводы

Разработанный новый технологический процесс капитального ремонта пути позволяет увеличить суточную выработку с 1 608 км до 2 700 км пути (на 68 %).

Применение инновационных железнодорожно-строительных машин (новый укладоч-

ный поезд и комплекс по замене длинномерных рельсовых плетей) позволяет оптимизировать задействованный персонал монтеров пути с 206 до 28 чел. (табл. 9). Новая технология позволяет сократить количество задействованных на перегоне укладочных кранов с 7 до 3 ед. (на 57 %).

Список источников

1. Пашин С. А. Славный юбилей путевых машинных станций. URL: <http://zeldortrans-journal.narod.ru/publik/history/2006/aprel-04-06.htm> (дата обращения: 09.08.2021).
2. Карпущенко Н. И., Пикалов А. С., Труханов П. С. Оценка надежности технологических процессов реконструкции железнодорожного пути по данным об отказах путевых машин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 2 (49). С. 5–11.
3. Ермаков В. М., Манойло Д. С. Технические требования к путевым машинам для реализации цифровой технологии ремонта пути // Железнодорожный транспорт. 2019. № 9. С. 30–33.
4. Пикалов А. С., Величко Д. В., Севостьянов А. А. Использование системы 3D нивелирования ICON LEICA GEOSYSTEMS при работах по планировке основной площадки земляного полотна // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 1-2. С. 37–40.
5. Певзнер В. О. Система определения потребности в путевых работах требует корректировки // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 3. С. 8–11.
6. Певзнер В. О., Гринь Е. Н. Совершенствование системы управления техническим обслуживанием пути // Железнодорожный путь. 2021. № 2. С. 54–59.
7. Определение потребности в путевых работах в современных условиях / В. О. Певзнер, А. И. Чечельницкий, А. И. Лисицын [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 1. С. 14–20.
8. Пикалов А. С., Клементов А. С., Куликов О. Н. Актуальные вопросы рационального размещения, специализации и мощности производственных баз ремонтно-путевого комплекса ОАО «РЖД» в современных условиях // Наука и бизнес: Пути развития. 2020. № 1 (103). С. 50–54.
9. Комплексный процесс ремонта звеньев путевой решетки / А. С. Пикалов, А. С. Клементов, А. А. Севостьянов, О. Н. Куликов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1 (56). С. 5–11.
10. Рябинин И. А., Киреев Ю. Н. Надежность электроэнергетических систем и судового электрооборудования. Л. : Судостроение, 1974. 141 с.

References

1. Pashin S. A. The glorious anniversary of track machine stations. (In Russ.). URL: <http://zeldortrans-journal.narod.ru/publik/history/2006/aprel-04-06.htm>.
2. Karpushchenko N. I., Pikalov A. S., Trukhanov P. S. Assessment of reliability of technological processes of railway track reconstruction based on data on track machine failures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(49):5–11. (In Russ.).

3. Ermakov V. M., Manoilo D. S. Technical requirements for track machines for the implementation of digital track repair technology. *Railway transport*. 2019;(9):30–33. (In Russ.).
4. Pikalov A. S., Velichko D. V., Sevostyanov A. A. The use of the ICON LEICA GEOSYSTEMS 3D Leveling system during the planning of the main site of the roadbed. *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2017;(1-2):37–40. (In Russ.).
5. Pevsner V. O. The system of determining the need for travel work requires adjustments. *Bulletin of VNIIZHT*. 2012;(3):8–11. (In Russ.).
6. Pevsner V. O., Grin E. N. Improvement of the track maintenance management system. *Railway track*. 2021;(2):54–59. (In Russ.).
7. Pevsner V. O., Chechelnitsky A. I., Lisitsyn A. I., Grin E. N., Petropavlovskaya I. B., Baronaite R. A. Determination of the need for travel work in modern conditions. *Path and travel economy*. 2021;(1):14–20. (In Russ.).
8. Pikalov A. S., Klementov A. S., Kulikov O. N. Actual issues of rational placement, specialization and capacity of production bases of the repair and track complex of JSC “Russian Railways” in modern conditions. *Science and business: Ways of development*. 2020;(103):50–54. (In Russ.).
9. Pikalov A. S., Klementov A. S., Sevostyanov A. A., Kulikov O. N. The complex process of repairing the links of the track grid. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(56):5–11. (In Russ.).
10. Ryabinin I. A., Kireev Yu. N. Reliability of electric power systems and ship electrical equipment. L.: Shipbuilding; 1974. 141 p. (In Russ.).

Информация об авторах

A. С. Пикалов – директор Центра инфраструктурных технологий АО «СТМ», кандидат технических наук.
В. К. Милорадович – главный специалист Центра инфраструктурных технологий АО «СТМ».
А. А. Севостьянов – преподаватель кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. S. Pikalov – Director of the Center for Infrastructure Technologies of STM, Candidate of Engineering.
V. K. Miloradovich – Chief Specialist of the Center for Infrastructure Technologies of STM.
A. A. Sevostyanov – Lecturer of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 08.02.2022; одобрена после рецензирования 08.04.2022; принята к публикации 13.04.2022.

The article was submitted 08.02.2022; approved after reviewing 08.04.2022; accepted for publication 13.04.2022.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 658.51
doi 10.52170/1815-9265_2022_61_44

Организация эксплуатации и рабочих процессов снегоуборочных машин типа СМ и ПСС на основе автоматизированного мониторинга

Михаил Андреевич Семенов

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия,
MikeSemenov13111996@yandex.ru

Аннотация. Гарантией бесперебойной и безопасной работы железнодорожного транспорта и соблюдения срока перевозок является в первую очередь оперативная очистка путей от снега. Причем научных исследований, посвященных решению проблем, связанных с оптимизацией эксплуатации снегоуборочных машин, применимо к ОАО «РЖД» нет, что и обусловило выбор темы данного исследования.

Цель исследования – выявление закономерностей рабочих процессов снегоуборочных машин в зависимости от длины убранных путей и объема возможной загрузки, с учетом влияния факторов окружающей среды. Предметом исследования выступают: совокупность методов и средств автоматизированного мониторинга и пути повышения эффективного функционирования и совершенствования рабочего процесса снегоуборочной техники.

Объем убранного снега и время работы снегоуборочной машины в рабочем режиме являются изменяющимися величинами, на которые оказывает влияние множество других факторов, поэтому целесообразно не использовать эти данные для сравнительной характеристики и статистического анализа. В качестве сравнительного показателя, на который внешние факторы оказывают не столь существенное влияние, предложено использовать длину убранных путей. Разработано математическое обоснование зависимости между длиной убраемых путей и объемом убранного снега, временем рабочего цикла, количеством выпавшего снега, температурой окружающего воздуха посредством множественной регрессии. Из полученной математической зависимости можно выразить время рабочего цикла и определить затраты на проведение ремонтов, необходимое количество топлива, количество задействованных людей, а следовательно, спланировать фонд заработной платы и премиальный фонд.

Теоретическая значимость исследования состоит в создании математической модели процесса уборки снега и оценки эффективности эксплуатации снегоуборочных машин типа СМ и ПСС. Практическая значимость работы заключается в разработке предложения по реформированию системы принятия плановых решений и контроля эффективности работ по уборке снега посредством автоматизированного мониторинга системой АС КРСПС.

Ключевые слова: снегоуборочные машины типа СМ и ПСС, АСУ СПС, АС КРСПС, автоматизированный мониторинг, анализ использования снегоуборочной техники, организация эксплуатации, математическая модель, оптимизация структуры затрат, новый регламент

Для цитирования: Семенов М. А. Организация эксплуатации и рабочих процессов снегоуборочных машин типа СМ и ПСС на основе автоматизированного мониторинга // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 44–56. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_44.

TRANSPORT

Original article

Snowplows operation organization and work processes of the SM and PSS types based on automated monitoring

Mikhail A. Semenov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, MikeSemenov13111996@yandex.ru

Abstract. The guarantee of the uninterrupted and safe railway transport operation and the fulfillment of the term of transportation is, first of all, the prompt cleaning and removal of snow from the tracks. Moreover, there are no scientific studies devoted to solving problems related to optimizing the operation of snowplows applicable to Russian Railways – this led to the choice of the study.

The purpose of the study: to identify the snowplow work processes patterns, depending on the length of the removed paths and the volume of possible loading, taking into account the influence of environmental factors. The subject of the study is: a set of methods and means of automated monitoring and ways to improve the efficient functioning and improvement of the snowplow workflow.

The amount of snow removed and the operating time of the snow blower in the operating mode are changing values that are influenced by many other factors, so it is advisable not to use these data for comparative characteristics and statistical analysis. As a comparative indicator, on which external factors do not have such a significant impact, we propose to use the length of the removed paths. We will develop a mathematical justification for the relationship between the length of the removed paths and the volume of snow removed, the time of the working cycle, the amount of snow that has fallen, and the ambient temperature through multiple regressions. From the obtained mathematical dependence, we can express the time of the working cycle and determine the costs of repairs, the required amount of fuel, the number of people involved, and therefore plan the payroll and bonus fund.

The theoretical significance of the study lies in the creation of a mathematical model of the snow removal process and the snowplow operating efficiency evaluation of the SM and PSS types. The practical significance of the work lies in the development of a proposal for reforming the system for making planned decisions and monitoring the effectiveness of snow removal operations through automated monitoring by the AS KRSPS system.

Keywords: snowplows of the SM and PSS types, ACS SPS, AS KRSPS, automated monitoring, analysis of the use of snowplows, organization of operation, mathematical model, optimization of the cost structure, new regulations

For citation: Semenov M. A. Snowplows operation organization and work processes of the SM and PSS types based on automated monitoring. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):44–56. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_44.

Введение

Снегоборьба (термин, встречающийся только на железной дороге) – это система мероприятий и средств по предотвращению заносов, защите железнодорожных путей от снега и непосредственно очистке путей и стрелочных переводов для обеспечения непрерывности движения поездов и бесперебойной работы станций [1, 2].

В последнее время снежные метели становятся все более сильными, а снегопады все более обильными, что объясняется усилением циклонической деятельности и, в свою очередь, приводит к малоконтролируемой ситуации в населенных пунктах и на транспорте. Гарантией бесперебойной и безопасной работы железнодорожного транспорта и соблюдения срока перевозок является в первую очередь оперативная очистка и уборка путей от снега. Особенно это актуально для Западно-Сибирской железной дороги, которая по степени снегозаносимости относится к 1-й группе, т. е. к территории, на которой в течение зимы наблюдаются снегопады и метели с очень сильной интенсивностью [3].

В подразделениях ОАО «РЖД» зимой возникают проблемы, аналогичные проблемам дорожно-эксплуатационных служб и жилищно-коммунального хозяйства, связанные с быстрой и качественной очисткой дорог от снега, при ограниченных ресурсах и погодных условиях, которые нельзя предугадать. Поэтому как никогда актуальна проблема оптимизации процесса эксплуатации снегоуборочной техники с ис-

пользованием современных технологий. При этом научных исследований, посвященных решению проблем дорожно-эксплуатационных служб и жилищно-коммунального хозяйства, связанных с уборкой снега, в настоящее время осуществлено немало, в то время как подобные исследования применимо к ОАО «РЖД» отсутствуют, что и обусловило выбор темы данного исследования.

Цель исследования – выявление закономерностей рабочих процессов снегоуборочных машин в зависимости от длины убранных путей и объема возможной загрузки, с учетом влияния факторов окружающей среды, позволяющих определить качественные и количественные закономерности протекания рабочего цикла и являющиеся основой для расчета технологических параметров, а также разработка математической модели планирования и контроля процесса уборки снега.

Материалы и методы исследования

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- проанализировать процесс загрузки снегоуборочных машин за один рабочий цикл и выявить существующие принципы его планирования;

- установить закономерность между длиной убираемых путей и загрузкой машины, временем рабочего цикла, а также факторами окружающей среды и производительностью машины;

– подвергнуть анализу структуру затрат на процесс уборки снега и оптимизировать структуру затрат на эксплуатацию снегоуборочной техники посредством автоматизированного мониторинга;

– выявить показатели, влияющие на регламентные промежутки ремонтов.

Объектом исследования является организация и технология снегоборьбы, производственная эксплуатация машин типа СМ в подразделении ОАО «РЖД».

Предметом исследования выступают совокупность методов и средств автоматизированного мониторинга, а также пути повышения эффективного функционирования и совершенствования рабочего процесса снегоуборочной техники.

Для анализа ситуации по уборке снега возьмем парк снегоуборочных машин типа СМ и ПСС. На Западно-Сибирской железной дороге парк данных машин составляет 78 единиц, из них ПСС – 19 и СМ – 59 машин; в ПЧМ Новосибирск – 16 единиц: ПСС – 3, СМ – 13, т. е. структура парка ПЧМ Новосибирск почти идентична структуре парка Западно-Сибирской железной дороги, поэтому результаты исследовательской работы, проведенной на базе ПЧМ Новосибирск, можно экстраполировать на всю Западно-Сибирскую железную дорогу [4].

Результаты исследования

Парк снегоуборочных машин ПЧМ Новосибирск насчитывает всего 33 единицы, из них 50 % приходится на машины типа СМ и ПСС.

На СМ, ПСС приходится 72 % от затрат на все снегоуборочные машины ПЧМ Новосибирск. В структуре 60 % составляют затраты на заработную плату, 25 % на ТО и 15 % на топливо. Особо следует отметить, что техническое обслуживание машин финансируется за счет текущих средств предприятия, в то время как средства на ТР и КР закладываются в бюджет и финансируются из центра. Структуру затрат необходимо оптимизировать.

На снегоуборочных машинах для мониторинга анализа работы используется программное обеспечение АСУ СПС и АС КРСПС [5, 6]. АСУ СПС (автоматизированная система управления процессами эксплуатации и обслуживания специального подвижного состава) является частью комплекса и отвечает за автоматизацию

рабочих процессов на линейных предприятиях при безусловном использовании данных: о персонале; о подвижном составе; о допуске к работе бригад и единиц СПС на основании данных из информационных систем ОАО «РЖД»; о результатах обработки ранее переданной статистической информации. АСУ СПС передает данные в учетные системы ОАО «РЖД» и формирует аналитическую отчетность.

АС КРСПС (автоматизированная система контроля работы специального подвижного состава) предназначена для контроля и регистрации технологических характеристик СПС, имеет возможность передавать информацию в АСУ СПС с использованием системы ГЛОНАСС/GPS и каналов GSM/GPRS.

Программы АСУ СПС и АС КРСПС направлены на решение разных задач. В программе АСУ СПС контроль за работой машины осуществляется через информацию, предоставленную машинистом, в то время как в программе АС КРСПС для контроля и регистрации технологических характеристик СПС используются датчики [7].

Система контроля определяет время и место начала работы машины, продолжительность работы в рабочем режиме, количество выгрузок, температуру окружающего воздуха в момент уборки снега. Погрешность измерений составляет менее 5 %.

Показатели с датчиков выводятся на ЖК-монитор микрокомпьютера в кабине машиниста снегоуборочной машины, на смартфон мастера участка, оператора удаленного доступа и для других работников в виде программного приложения ОАО «РЖД».

Десять машин типа СМ всех модификаций ПЧМ Новосибирск оснащены проверенными датчиками АС КРСПС. Проведем сравнительный анализ двух программных обеспечений и выявим, данные какого программного обеспечения соответствуют реальным, для этого в том числе выполнялось наблюдение – фотография рабочего дня.

На диаграммах (рис. 1) представлены данные по парку Новосибирской механизированной дистанции инфраструктуры, содержащие информацию по каждой машине парка предприятия за 2019, 2020, 2021 гг. Данные позволяют оценить заявленное и реально затраченное на работу время, а также объем убираемого снега.

Мы видим расхождение показателей между программами АСУ СПС и АС КРСПС в 4–6 раз.

На данном графике (рис. 2) можно увидеть слабую зависимость объема убираемого снега, полученного в программе АСУ СПС, от длины убираемых путей и температуры окружающей среды, в отличие от данных, полученных в программе АС КРСПС. По данным программного обеспечения АС КРСПС, пики и впадины показателей температуры окружающей среды, наработки и длины очищенных путей идентичны, в то время как программа АСУ СПС не показывает такой закономерности.

По представленным диаграммам (см. рис. 1) и графику (см. рис. 2) можно сделать следующие выводы: наблюдается несоответствие объемов фактически погруженного снега с регистрируемым в журнале учета работы; объем убираемого снега не зависит от длины убираемых путей, плотности снега, количества осадков.

Анализ фотографии рабочего дня позволил выявить, что рабочий режим машины составляет 33 % от времени ее работы. Если же учитывать время смены машины, составляющее 12 ч, то рабочий режим в ее структуре составляет всего 24 %, а время простоя машины в среднем – 4 ч 12 мин, или 34 %. Таким обра-

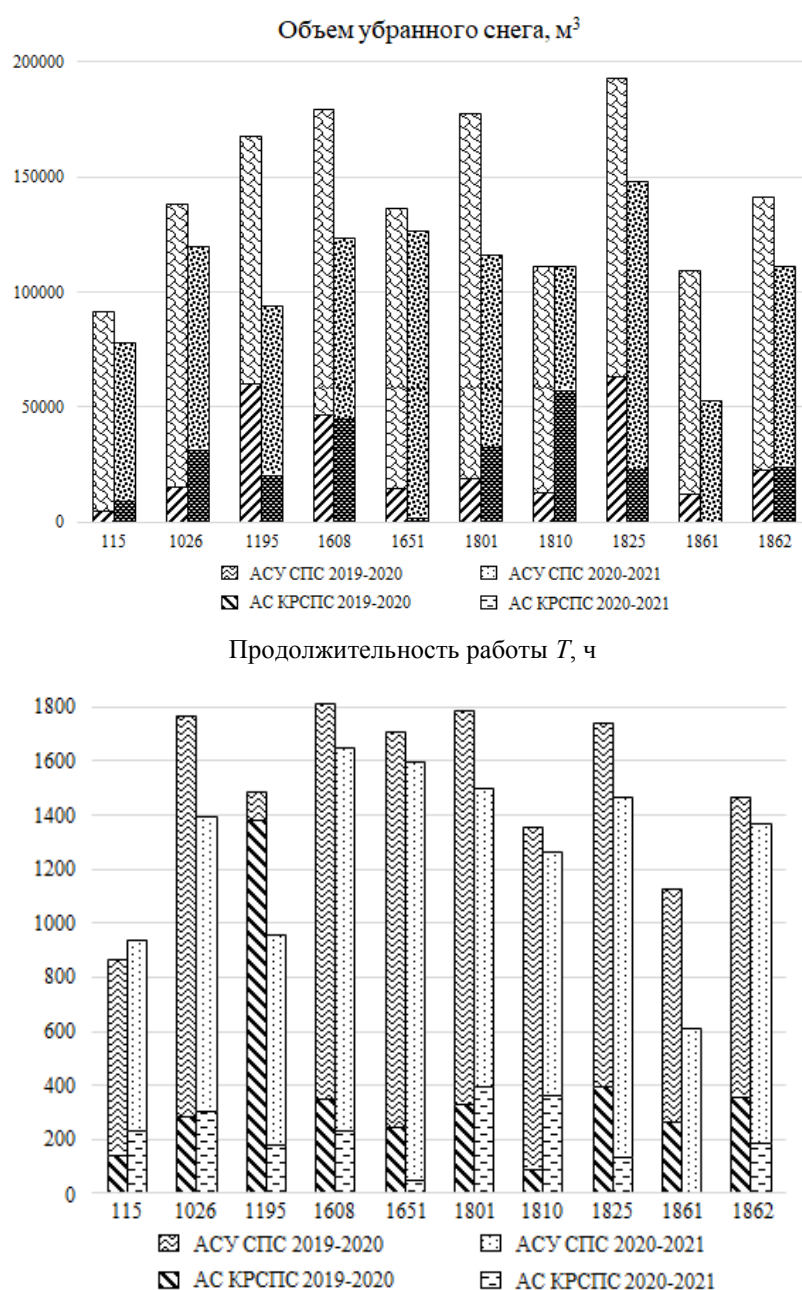


Рис. 1. Сравнительная характеристика показателей по машинам парка, полученных с помощью программного обеспечения АСУ СПС и АС КРСПС

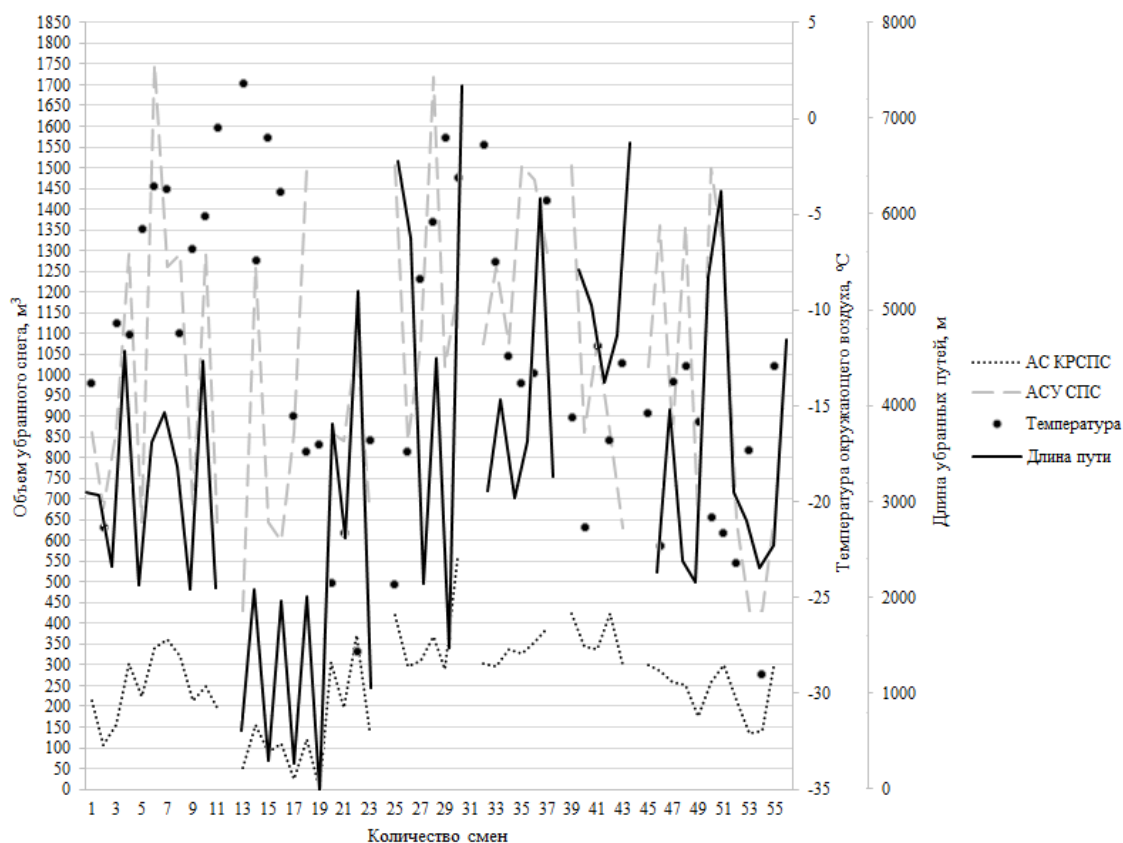


Рис. 2. График сравнения показателей (длины убранных путей, температуры окружающей среды, объема убранного снега), определенных в программах АСУ СПС и АС КРСПС

зом определено, какую часть времени смены реально работают снегоуборочные машины.

В настоящее время планирование работы снегоуборочных машин и проведение ремонтов определяются по объему убранного снега. Мы знаем, что есть теоретическая, техническая и эксплуатационная наполняемость машины (полувагона). У машин типа СМ теоретически возможная наполняемость составляет 340 м³, техническая – 234 м³, а эксплуатационная может колебаться от 30 до 175 м³.

Анализ статистики загрузок машин парка за смену показывает, что 44 % машин отправляются на выгрузку с недогрузом, составляющим 25 %, а 25 % парка работает с перегрузом (рис. 3). Таким образом, одни машины не дорабатывают до планового ТО, а другие – ускоряют отказы рабочих органов.

Мы видим, что объем убранного снега и время работы снегоуборочной машины в рабочем режиме являются изменяющимися величинами, на которые оказывает влияние множество других факторов, поэтому целесообразно не использовать эти данные для сравни-

тельной характеристики и статистического анализа. В качестве сравнительного показателя, на который внешние факторы оказывают не столь существенное влияние, мы предлагаем использовать длину убранных путей. Для подтверждения нашего предположения будем использовать математические инструменты, например, выявим парную корреляционную зависимость между длиной очищаемых путей и объемом убранного снега, длиной очищаемых путей и временем работы [8].

Коэффициент парной корреляции рассчитывается по формуле [9]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где $x_i - \bar{x}$ – отклонение факторного признака от среднего; $y_i - \bar{y}$ – отклонение результативного признака от среднего.

По абсолютной величине коэффициент парной корреляции изменяется в промежутке $0 \leq |r_{xy}| \leq 1$, причем чем значение r_{xy} ближе к единице, тем теснее связь, а чем ближе к нулю, тем слабее.



Рис. 3. Статистика загрузки снегоуборочных машин за цикл работы

После определения коэффициента корреляции перейдем к уравнению парной регрессии, т. е. выявим парную корреляционную зависимость, формула которой в нашем случае представлена уравнением прямой:

$$\hat{y}_x = a - bx, \quad (2)$$

где \hat{y}_x – среднее значение результативного признака при определенном значении факторного признака x ; a – свободный член уравнения регрессии; b – коэффициент регрессии, указывающий, на сколько единиц в среднем изменится результативный признак при изменении факторного признака на одну единицу его измерения.

Член a является коэффициентом, позволяющим дополнить соотношение между средними \bar{x} и \bar{y} . Предположим, что a – это часть очищенного пути, которая не зависит от объема убранного снега, тогда коэффициент регрессии b показывает, что с увеличением объема убранного снега на 1 м³ длина очищаемых путей в среднем возрастает примерно на 8,56 м (за 2019–2020 гг.).

Определим корреляционную связь между длиной очищаемых путей и объемом убранного снега за 2019–2020 и 2020–2021 гг. По уравнениям полученной зависимости (рис. 4) можно сделать вывод о том, что связь оказалась средней, так как входит в промежуток $0,3 < r_{xy} < 0,7$.

Корреляционная связь между длиной очищаемых путей и временем работы (рис. 5) в данном случае входит в промежуток $0,7 < r_{xy} < 1$ и является сильной.

Для оптимизации затрат на эксплуатацию снегоуборочной техники необходимо смоделировать процесс уборки снега. Модель будет включать в себя элементы структуры рабочей смены, производительности машины и погодных условий. Все эти факторные признаки могут в той или иной степени оказывать влияние на длину убираемых путей, как результативный признак; только при одновременном учете всех факторов возможно корректно оценивать эффективность работы снегоуборочной машины через убираемую длину пути.

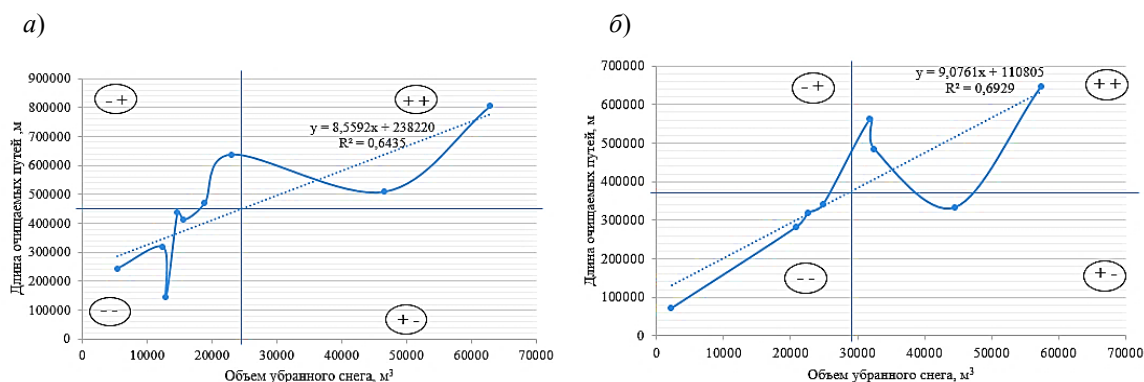


Рис. 4. Корреляционная связь между длиной очищаемых путей и объемом убранного снега: а – 2019–2020 гг.; б – 2020–2021 гг.

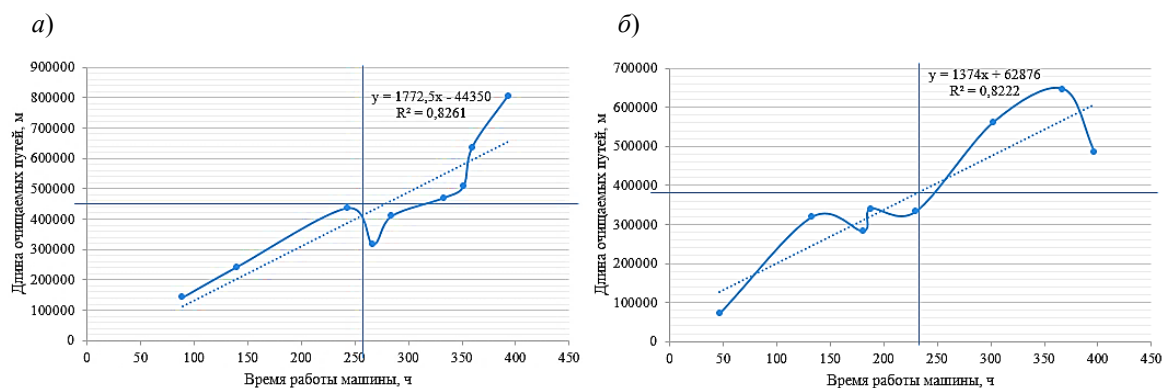


Рис. 5. Корреляционная связь между длиной очищаемых путей и временем работы:
а – 2019–2020 гг.; б – 2020–2021 гг.

Степень влияния каждого из факторных признаков будем устанавливать посредством множественной регрессии. Считается, что на любое явление сильное влияние могут оказать три фактора, но мы включим четыре фактора и выявим степень влияния каждого из них на снегоуборку.

Разработаем математическое обоснование зависимости между длиной убираемых путей y и следующими показателями:

- объемом убранного снега x_1 ;
- временем рабочего цикла x_2 ;
- количеством выпавшего снега x_3 ;
- температурой окружающего воздуха x_4 .

Математическое обоснование зависимости между длиной убираемых путей и другими факторами выявим посредством множественной регрессии.

Общий вид формулы коэффициента частной корреляции k -го порядка и линейного уравнения множественной регрессии представлен ниже [9]:

$$r_{yx_1x_2x_3\dots x_k} = \frac{r_{yx_1x_2x_3\dots x_{k-1}} - r_{yx_kx_2x_3\dots x_{k-1}}r_{x_1x_kx_2x_3\dots x_{k-1}}}{\sqrt{(1-r_{yx_kx_2x_3\dots x_{k-1}}^2)(1-r_{x_1x_kx_2x_3\dots x_{k-1}}^2)}}, \quad (3)$$

$$\hat{y}_{x_1x_2\dots x_k} = a + b_{1,2\dots k}x_1 + b_{2,13\dots k}x_2 + b_{3,124\dots k}x_3 + \dots + b_{k,12\dots k-1}x_k. \quad (4)$$

Найдем линейное уравнение множественной регрессии для наших данных, построив прямоугольную матрицу коэффициентов множественной регрессии (табл. 1).

Коэффициент множественной детерминации составляет $R^2 = 0,939$. Можно сделать вывод о том, что длина убираемых путей на 94 % определяется учтенными переменными.

Для возможности прогнозирования и определения эффективности работы снегоуборочной машины в зависимости от длины убираемых путей необходимо вычислить уравнение множественной регрессии.

Каждый выбранный фактор влияет на длину убираемых путей по-разному (табл. 2). Так, объем убранного снега объясняет 70 % длины убираемых путей, а температура окружающей среды – всего 1 %.

Учет всех четырех показателей позволяет сократить степень погрешности при расчете полученных уравнений до 10 % в сравнении с реальными данными, тогда уравнение множественной регрессии для расчета длины убранных путей за год будет иметь вид

$$Y = 308925,0939 + 9,9404x_1 + 426,5313x_2 - 8644597,8302x_3 + 3911,732x_4, \quad (5)$$

Таблица 1

Матрица коэффициентов множественной регрессии

Признак	y	x_1	x_2	x_3	x_4
Y	1	0,719454	0,875277	–0,015950	0,128004
X_1	0,719454	1	0,611414	0,644725	–0,216120
X_2	0,875277	0,611414	1	–0,039610	0,095443
X_3	–0,015950	0,644725	–0,039610	1	–0,376530
X_4	0,128004	–0,216120	0,095443	–0,376530	1

Таблица 2

Степень влияния каждого фактора на длину убираемых путей

Стандартизированный коэффициент регрессии	Коэффициент раздельной детерминации
$\beta_1 = 0,977$	$d_1 = 0,702$
$\beta_2 = 0,245$	$d_2 = 0,214$
$\beta_3 = -0,603$	$d_3 = 0,011$
$\beta_4 = 0,089$	$d_4 = 0,012$

$$y = 3047,8014 + 11,6252x_1 + 165,4616x_2 - 86198,1298x_3 + 17,0158x_4. \quad (6)$$

Уравнение (5) позволяет определить планируемую длину убираемых путей в перспективе, а в то время как уравнение (6) – за смену, что дает возможность быстро сравнить полученные в результате мониторинга данные с математически обоснованными.

Переход от объема убираемого снега к длине убранных путей позволит эффективнее планировать работу машины на год, так как длина убираемых путей – постоянная величина, потому что приравнивается к полезной длине путей станции. Таким образом, из уравнения (5) можем выразить время рабочего цикла x_2 и определить затраты на проведение ремонтов, необходимое количество топлива, количество задействованных людей, а следовательно, спланировать фонд заработной платы и премиальный фонд.

Уравнение (6) дает возможность определить эффективность работы бригады, а следовательно, учесть это при начислении премии. Согласно п. 7 разд. II [10], условия и показатели премирования распределены по трем уровням. Уровень III учитывает индивидуальные показатели премирования, характеризующие результативность работы конкретного работника или бригады, и оценивает конечные результаты их труда исходя из поставленных задач и их функциональных обязанностей. Если для бригад путевых машин при начислении премий учитывается эффективность их работы, то для бригад, обслуживающих снегоуборочные машины, размер премий не зависит от результатов работы.

В Приложении № 2 к Положению о премировании работников Новосибирской механизированной дистанции инфраструктуры основными результатами производственно-хозяй-

ственной деятельности машинистов, помощников машиниста снегоуборочных машин типа СМ считается: 1) выполнение производственного задания в человеко-часах; 2) отсутствие случаев срывов работы по вине работников бригады; 3) выполнение лимита потребления дизельного топлива в тоннах. В зависимости от категории станции величина премирования составляет по первому и второму показателю от 19 до 29 %, по третьему – 10–14 %.

Выполнение производственного задания в человеко-часах подразумевает, что если бригада получила допуск к работе, то полагается премия; получается, что бригада не заинтересована в повышении эффективности работы машины.

Общая продолжительность работы 10 снегоуборочных машин за 2020–2021 гг. составляет 12 732 ч. Месячная норма часов для работников за декабрь 2020 г. – 183 ч, за январь и февраль 2021 г. – 120 и 151 ч соответственно. Исходя из нормы часов и учитывая, что работники не должны перерабатывать и не дорабатывать до нормы, рассчитаем количество бригад, задействованных в работе машин за 2020–2021 гг.

Получим

$$\frac{12\,732}{(183 + 120 + 151)} = 28 \text{ бригад.}$$

Из 28 бригад 15 являются работниками ст. Инской с III уровнем премии, составляющей 72 %, у оставшихся 13 бригад других станций III уровень премии составляет 48 %.

Управление снегоуборочной машиной осуществляется бригадой в составе одного машиниста 6-го разряда и двух помощников машиниста 5-го разряда.

Если учитывать, что бригады снегоуборочных машин за 2020–2021 гг. не лишались премий, то можно рассчитать затраты предприятия на выплату премий машинистам и помощникам машиниста:

$$(K_{61}Y_{3и} + K_{62}Y_{3д})(C_m + 2C_{п.м})O_T, \quad (7)$$

$$(15 \cdot 0,72 + 13 \cdot 0,48)(131,58 + 120,76 \cdot 2) \times$$

$$\times 12\,732 = 80\,945\,268,77 \text{ р.},$$

где K_{61}, K_{62} – количество бригад по ст. Инская и другим станциям, шт.; $Y_{3и}, Y_{3д}$ – коэффициент III уровня премии по ст. Инская и другим станциям; $C_m, C_{п.м}$ – стоимость часа работы машиниста и помощника машиниста, р.; O_T – общее время работы за период, ч.

По предлагаемой методике премиальный фонд будет рассчитываться следующим образом: за вышеуказанный период по данным программы АС КРСПС в рабочем режиме машины отработали 2 080,7 ч, что соответствует 3 537 544 м. Отсюда следует, что за 1 ч рабочего хода в среднем очищалось 1 700 м.

Проанализировав работу снегоуборочных машин за 2020–2021 гг. (табл. 3), можно сделать вывод, что две машины, приписанные к ст. Инская (семь бригад), и две машины других станций (шесть бригад) не выполняли средний показатель по длине убираемых путей за 1 ч, составляющий 1 700 м. В связи с этим оплата III уровня премиального вознаграждения бригадам, выполнявшим работу на данных машинах, не должна была выплачиваться.

Тогда экономия премиального фонда составит:

$$(7 \cdot 0,72 + 6 \cdot 0,48)(131,58 + 120,76 \cdot 2) \times$$

$$\times 5\,703 = 16\,852\,091,26 \text{ р.}$$

Еще одной статьей сокращения затрат может стать оптимизация расходования топлива. В настоящее время расход топлива привязан к объему убираемого снега, а объем снега – величина непостоянная и передаваемая сменному персоналу со слов машиниста, поэтому и эффективность расхода топлива логично привязать к длине убранных путей. Через длину убранных путей проще рассчитать

удельный расход топлива, так как рабочий режим машины определяется программой, а длина убираемых путей – постоянная величина для данного маршрута.

Возьмем данные по работе двигателя в рабочем и холостом режимах из программы АС КРСПС и сравним с показателями расхода дизельного топлива снегоуборочными машинами за 2020–2021 гг.

За 2020–2021 гг. снегоуборочные машины израсходовали 93 596 т дизельного топлива. При анализе рабочих режимов и норм расхода топлива в единицу времени получено, что расход дизельного топлива по программе АС КРСПС должен был составить 73 194 т. Разница действительных данных с расчетами составила 1,27 раза, что в денежном эквиваленте равно:

$$(93\,596 - 73\,194) \cdot 40,85 = 833\,421,7 \text{ р.}$$

Кроме того, в последнее время на ОАО «РЖД» введены штрафные санкции и за нерасход топлива, поэтому актуальным становится точное планирование потребления топлива.

В настоящее время объем убранного снега является нормативным показателем для межремонтного пробега снегоуборочной машины и составляет для ТР-1 – 300, ТР-2 – 600 и КР-1 – 1 800 тыс. м³ убранного снега.

Ранее было доказано, что объем убираемого снега не является величиной для определения эффективности работы снегоуборочной машины и необходимо производить расчет эффективности по длине убираемых путей, целесообразно также и нормативы на проведение ремонтов привести к длине убираемых путей.

Для определения зависимости длины убираемых путей от объема убранного снега построена корреляционная зависимость, позволяющая определить линейное уравнение парной регрессии (рис. 6). При подстановке регламентных сроков проведения ремонтов

Таблица 3

Анализ работы снегоуборочных машин за 2020–2021 гг.

Станция приписки	Номер	Длина убранных путей, м	Время рабочего режима, ч	Средняя длина очищаемых путей за 1 ч
Инская	СМ № 1608	332 564	230,0	1 445,9
	СМ № 1801	484 018	396,8	1 219,8
	СМ № 1825	318 822	133,2	2 393,6
	ПСС №115	499 286	235,6	2 119,2
Новосибирск-Восточный	СМ № 1651	71 297	46,7	1 526,7
	СМ № 1810	646 593	366,9	1 762,3
	СМ № 1026	562 040	302,8	1 856,1
Болотное	СМ № 1195	282 707	181,0	1 561,9

определены новые сроки в зависимости от длины убираемых путей (табл. 4).

Из табл. 4 следует (если использовать данные об объеме убранного снега, полученные в программе АС КРСПС), что предприятие производило ремонт снегоуборочных машин в 4,7 раза чаще установленных нормативных показателей. Так, ТР-1, проводимый ранее раз в 2,4 г., по реальным данным должен производиться раз в 11,3 г. [11]. Данный промежуток времени является значительным для наработки узлов и агрегатов.

Наработка многих узлов и агрегатов производится по времени работы машины. Определим регламентное время работы снегоуборочной машины до проведения ремонтов, воспользовавшись так же уравнением парной регрессии (табл. 5). Средняя наработка машины в рабочем режиме за год составляет 250 ч.

Проведем анализ наработки основных узлов и агрегатов по существующим нормативам. Для снегоуборочных машин основными рабочими органами являются головной и выбросной транспортеры, а также приводные цепи.

Наработка тяговой цепи головного транспортера по ГОСТ 13568–97 составляет 750 ч. При существующих нормативах предусмотрен только осмотр и измерение геометрии цепи, выполняемые при ТР-2 через 600 тыс. м³ убранного снега. При выявлении несоответствия участки цепи должны быть заменены. В связи с тем что цепи не подвергаются замене и сроки проведения частичной замены значительны, необходимо внести новый, учитывающий рекомендации производителей регламент на проведение замены цепи $Z_{ц}$ в зависимости от времени работы машины в рабочем режиме для исключения частых отказов техники из-за порыва це-

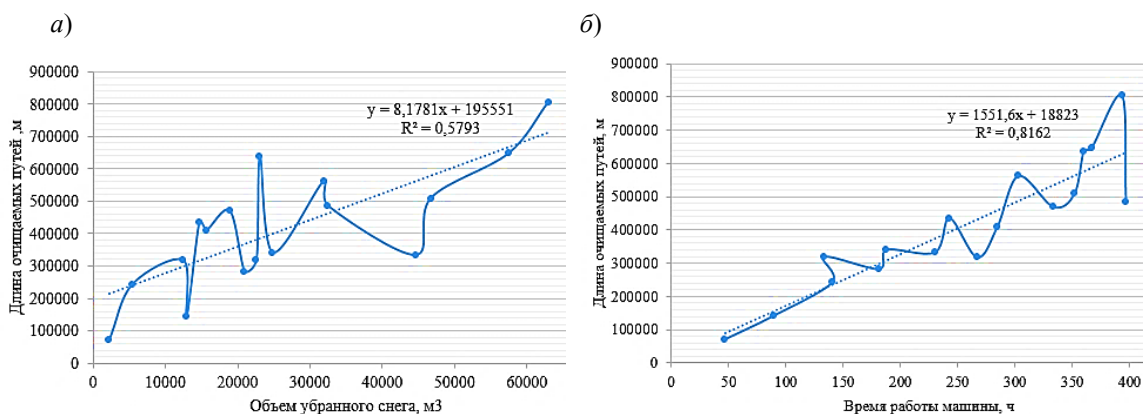


Рис. 6. Корреляционные зависимости длины убираемых путей:
а – от объема убранного снега; б – от времени работы машины

Таблица 4

Нормативные показатели проведения ТР, существующие в настоящее время, в зависимости от длины убираемых путей

Вид ремонта	Объем убранного снега, тыс. м ³	Стоимость ремонтов, тыс. р.	Периодичность проведения по АСУ СПС, лет	Периодичность проведения (реальная) по АС КРСПС, лет	Длина очищаемых путей, м	Периодичность проведения, лет
ТР-1	300	1 615	2,4	11,3	2 648 981	6,4
ТР-2	600	3 116	4,8	22,7	5 102 411	12,4
КР-1	1 800	—	14,3	68,0	14 916 131	36,2

Таблица 5

Нормативные показатели проведения ТР в зависимости от времени работы машины

Вид ремонта	Длина очищаемых путей, м	Периодичность проведения, лет	Время работы машины, ч
ТР-1	2 648 981	6,4	1 612,4
ТР-2	5 102 411	12,4	3 141,4
КР-1	14 916 131	36,2	9 170,9

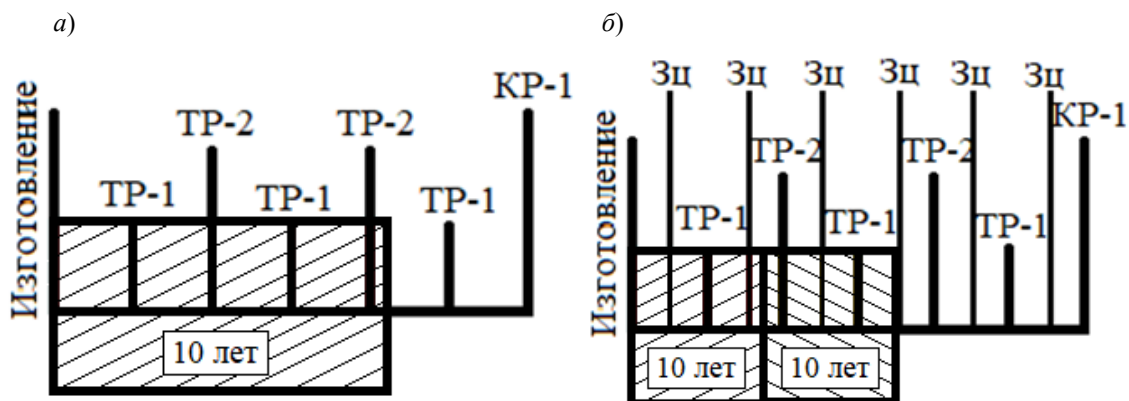


Рис. 7. Система проведения ТО и Р:
а – существующая; б – предлагаемая

пей. С учетом данных, полученных ранее при установлении периодичности замены цепей, согласно ГОСТ 13568–97 (750 ч), замена будет производиться в среднем раз в три года эксплуатации снегоуборочной машины (рис. 7). Поскольку в головном транспортёре используется 36 м цепи ПР-50,8-227, а стоимость одного метра такой цепи 1 573,21 р., стоимость одной цепи составит 56 636 р.

При существующих регламентах на проведение ремонтов предприятие за 10 лет на ремонт одной снегоуборочной машины тратит 9 462 тыс. р. При внедрении предлагаемой системы ремонтов и включении дополнительного регламента на проведение замены цепи за 10 лет предприятие израсходует 4 844,2 тыс. р. на одну снегоуборочную машину. Благодаря сокращению затрат на проведение ремонтов снегоуборочных машин за 10 лет предприятие при эксплуатации одной снегоуборочной машины сможет сократить свои затраты на 4 617,8 тыс. р., или в 1,96 раза.

Выводы

Проведенное исследование имеет следующие научные результаты:

1. Созданы математические модели рабочего процесса снегоуборочной машины, учитывающие данные автоматизированного мониторинга работы машин типа СМ и ПСС, отражающие его основные характеристики, которые позволяют определить степень влияния каждого фактора на эффективность использования машин. Получена сходимость моделей с экспериментом в пределах 10 %.

2. Получены математические зависимости между длиной убираемых путей, объемом убранного снега, временем рабочего цикла, количеством выпавшего снега, температурой окружающей среды, позволившие определить значения параметров, необходимых для обоснования расчетов при планировании процесса уборки снега.

3. Внесены предложения по оптимизации структуры затрат на эксплуатацию снегоуборочной техники посредством мониторинга с помощью созданных математических моделей.

4. На основании математических моделей разработаны методики, которые дают возможность осуществлять планирование и определять эффективность работы машины за год и за смену. Это позволит планировать затраты на процесс уборки снега и по эффективности работы снегоуборочной машины рассчитывать реальный размер премии машинистов и помощников машиниста.

5. Выявлена закономерность между длиной убираемых путей, загрузкой машины и временем рабочего цикла, являющаяся основой методики для расчета технологических параметров, обеспечивающих экономию средств на топливо, заработную плату, а также сокращение количества текущих ремонтов за счет перехода на новый норматив.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке предложения по реформированию системы принятия плановых решений и контроля эффективности работ по снегоуборке посредством автоматизированного мониторинга системой АС КРСЧС.

Практическая значимость исследования состоит в создании математической модели процесса снегоуборки и оценки эффективности эксплуатации снегоуборочных машин типа СМ и ПСС, которая позволит руководителям подразделений принимать обоснованные управленческие решения на этапе планирования или анализа эффективности работы.

На основании выполненных исследований необходимо внести изменения в инструкцию по подготовке к работе в зимний период: необходимое количество снегоуборочной тех-

ники следует определять в зависимости от длины убираемых путей, рассчитанной по полученной математической модели; эффективность работы снегоуборочной техники – в зависимости от длины убранных путей, а не от количества выгрузок.

В Положении о премировании работников Новосибирской механизированной дистанции инфраструктуры в качестве показателя премирования предполагается использовать выполнение производственного задания не в человеко-часах, а в метрах очищенных от снега путей.

Список источников

1. Жвакин В. В. Очистка путей и стрелочные переводы от снега на перегонах и станциях. Тула : Тульское подразделение Московского учебного центра профессиональных квалификаций, 2016. 61 с.
2. Снегоборьба и снегоуборка // Трудовой десант : железнодорожное строительство : [сайт]. URL: <https://www.tdesant.ru/content/snegoborba> (дата обращения: 10.02.2022).
3. Семенов М. А. История организации снегоборьбы на железных дорогах России // Политранспортные системы : материалы XI Международной научно-технической конференции. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2020. С. 457–461.
4. Абрамов А. Д., Семенов М. А. Повышение эффективности работы снегоуборочной машины типа СМ на основе автоматизированного мониторинга // Вестник Сибирского государственного университета. 2021. Вып. № 3 (58). С. 40–49.
5. АСУ СПС. URL: <http://asusps.svrw.oao.rzd/> (дата обращения: 10.02.2022). Режим доступа: для авторизир. пользователей.
6. АС КРСПС : Автоматизированная система контроля работы специального подвижного состава / НИАЦ АО «ВНИИЖТ». URL: <https://sps.gis.ru.net/> (дата обращения: 10.02.2022).
7. Абрамов А. Д., Семенов М. А., Кочетков А. С. Оптимизация работы снегоуборочной техники на основе автоматизированного мониторинга // Путь и путевое хозяйство. 2021. Вып. 4. С. 37–40.
8. Optimization of work performance of snow removal work trains on the basis of linear programming / A. Manakov, A. Abramov, A. Ilinykh, V. Aksenov // MATEC: Web of Conferences. 2018. P. 04001.
9. Статистика / [И. И. Елисеева и др.] ; под ред. проф. И. И. Елисеевой. М. : Проспект, 2003. 448 с.
10. Положение о премировании работников Новосибирской механизированной дистанции инфраструктуры за основные результаты производственно-хозяйственной деятельности : утверждено приказом по Уральской дирекции по эксплуатации путевых машин № УРДПМ-34 от 31.01.2018.
11. Инструкция по подготовке к работе в зимний период и организации снегоборьбы на железных дорогах, в других филиалах и структурных подразделениях ОАО «РЖД», а также его дочерних и зависимых обществах : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2243р от 22.10.2013. М., 2013. 160 с.

References

1. Zhvakin V. V. Clearing tracks and turnouts from snow at hauls and stations. Tula: Tula subsection Moscow textbook center professional qualifications; 2016. 61 p. (In Russ.).
2. Snow fighting and snow removal. *Labor landing: railway construction: [site]*. (In Russ.). URL: <https://www.tdesant.ru/content/snegoborba>.
3. Semenov M. A. The history of the organization of snow fighting on the railways of Russia. *Politransport systems: materials of the XI International scientific and technical conference*. 2020. P. 457–461. (In Russ.).
4. Abramov A. D., Semenov M. A. Improving the efficiency of the snowplow type SM based on automated monitoring. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;58:40–49. (In Russ.).
5. ACS SPS program. (In Russ.). URL: <http://asusps.svrw.oao.rzd/>.
6. AS CRSPS program: Automated system for monitoring the operation of special rolling stock. (In Russ.). URL: <https://sps.gis.ru.net/>.

7. Abramov A. D., Semenov M. A., Kochetkov A. S. Optimization of the work of snow-removing equipment based on automated monitoring. *Way and track management*. 2021;4:37–40. (In Russ.).
8. Manakov A., Abramov A., Ilinykh A., Aksenov V. Optimization of work performance of snow removal work trains on the basis of linear programming. *MATEC: Web of Conferences*. 2018. P. 04001.
9. Eliseeva I. I., Egorova I. I. [et al.]; prof. Eliseeva I. I., ed. Statistics. M.: Prospekt; 2003. 448 p. (In Russ.).
10. Regulations on bonus payments to employees of the Novosibirsk Mechanized Distance Infrastructure for the main results of production and economic activities: approved. by order of the Ural Directorate for the operation of track machines No. URDPM-34 dated January 31, 2018. (In Russ.).
11. Instructions for preparing for work in the winter and organizing snow fighting on railways, in other branches and structural divisions of Russian Railways, as well as its subsidiaries and affiliates: approved. Order of Russian Railways JSC No. 2243r dated October 22, 2013. M.; 2013. 160 p. (In Russ.).

Информация об авторе

М. А. Семенов – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

M. A. Semenov – Post-graduate Student of the Technology of Transport Engineering and Machine Operation Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 18.03.2022; одобрена после рецензирования 06.04.2022; принята к публикации 18.04.2022.

The article was submitted 18.03.2022; approved after reviewing 06.04.2022; accepted for publication 18.04.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 57–66.
The Siberian Transport University Bulletin. 2022. No. 2 (61). P. 57–66.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 625.031
doi 10.52170/1815-9265_2022_61_57

Интенсивность бокового износа рельсов в кривых в зависимости от эксплуатационных условий

Николай Иванович Карпущенко¹, Екатерина Михайловна Река²✉

^{1, 2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ kni@stu.ru

² kosinkova14@gmail.com✉

Аннотация. Целью исследования является определение степени воздействия характеристик рельсовой колеи на рост бокового износа рельсов в кривых среднего и малого радиуса. В статье описана методика эксплуатационных наблюдений за боковым износом рельсов на опытных кривых. Для инструментального исследования нарастания бокового износа и измерения параметров рельсовой колеи в процессе наработки тоннажа на пути 1 участка Издревая – Жеребцово были выбраны две опытные кривые с радиусами 490 и 400 м.

Полученные данные эксплуатационных наблюдений свидетельствуют, что рельсы категории Т1 в наружной нити кривой 1 ($R = 496$ м) уложены в путь с 30.06.2017 и к моменту обследования наработка тоннажа составила 1 546 млн т брутто. Средняя величина износа на 100 м участка круговой кривой достигла $\delta_{1cp} = 10$ мм, а максимальная $\delta_{1max} = 12$ мм. Интенсивность бокового износа составила $\gamma_{1cp} = 0,028$ мм / млн т брутто, $\gamma_{1max} = 0,033$ мм / млн т брутто.

В кривой 2 ($R = 405$ м) рельсы категории Т1 уложены в наружную нить 10.12.2019, к моменту обследования наработка тоннажа составила 145 млн т брутто при средней величине бокового износа $\delta_{2cp} = 14,1$ мм, а максимальной $\delta_{2max} = 21$ мм. Средняя величина интенсивности бокового износа $\gamma_{2cp} = 0,097$ мм / млн т брутто, а максимальная $\gamma_{2max} = 0,145$ мм / млн т брутто. При уменьшении радиуса кривой 2 по сравнению с кривой 1 на 19 % и увеличении непогашенного ускорения на 18 % средняя интенсивность бокового износа рельсов в кривой 2 оказалась в 3,5 раза выше, а максимальная – в 4,5 раза.

В результате анализа полученных данных был сделан вывод о том, что радиус кривой и осевые нагрузки подвижного состава оказывают большое влияние на интенсивность бокового износа рельсов.

Ключевые слова: кривые малого радиуса, боковой износ, параметры рельсовой колеи

Для цитирования: Карпущенко Н. И., Река Е. М. Интенсивность бокового износа рельсов в кривых в зависимости от эксплуатационных условий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 57–66. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_57.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Intensity of rail lateral wear in curves depending on operating conditions

Nikolay I. Karpushchenko¹, Ekaterina M. Reka²✉

^{1, 2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ kni@stu.ru

² kosinkova14@gmail.com✉

Abstract. The purpose of this study is to determine the degree of impact of rail track characteristics on the growth of lateral rail wear in medium- and small-radius curves. The article describes the methodology of in-service observations of rail lateral wear on experimental curves. Two experimental curves with radiuses of 490 m and 400 m were laid to instrumental study of the growth of lateral wear and measuring the parameters of the rail gauge in the process of tonnage running on the I track of Izdrevaya – Zherebtsovo section.

Operational observation data indicate that the rails of category T1 in the outer line of curve 1 ($R = 496$ m) have been laid in the track since 30.06.2017 and by the time of the survey tonnage was 1546 million tons of gross

tonnage. The average value of wear per 100 m section of the circular curve reached $\delta_1 = 10$ mm, and the maximum $\delta_{1\max} = 12$ mm. Intensity of lateral wear was $\gamma_1 = 0.028$ mm/million tons gross, $\gamma_{1\max} = 0.033$ mm/million tons gross.

In the curve 2 ($R = 405$ m), the rails of category T1 were laid in the outer strand on 10.12.2019, by the time of the survey the tonnage was 145 million tons gross, with the average value of lateral wear $\delta_2 = 14.1$ mm, and maximum $\delta_{2\max} = 21$ mm. The average value of lateral wear intensity here was $\gamma_2 = 0.097$ mm/million tons gross, and the maximum $\gamma_{2\max} = 0.145$ mm/million tons gross. With a decrease in the radius a curve 2 in comparison with the curve 1 by 19 % and an increase in unaccelerated acceleration by 18 %, the average intensity of lateral rail wear in curve 2 was 3.5 times higher, and the maximum – 4.5 times higher.

Analysis of the obtained data showed that the determining factor influencing the intensity of rail lateral wear is the radius of the curve and the axle loads of the rolling stock.

Keywords: small radius curves, lateral wear, track gauge parameters

For citation: Karpushchenko N. I., Reka E. M. Intensity of rail lateral wear in curves depending on operating conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):57–66. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_57.

Введение

Одной из важнейших задач, стоящих в настоящее время перед железнодорожным транспортом России, является увеличение объема перевозок, что влечет за собой активное внедрение в эксплуатацию тяжеловесных составов массой до 9 000 т. Уже сейчас широко используются грузовые вагоны с нагрузками 270 кН/ось.

С ростом в конце 1980-х гг. на железных дорогах России интенсивности бокового изнашивания рельсов и колес подвижного состава специалисты приступили к изучению влияния внешних и внутренних факторов на этот процесс. Особенно остро с износом дело обстоит в сложных условиях эксплуатации, а именно на горно-перевальных участках с большим числом кривых малых радиусов, в частности при высокой грузонапряженности, больших осевых нагрузках и значительной доле тяжеловесных поездов [1].

В результате эксплуатационных наблюдений и специальных лабораторных испытаний установлены закономерности влияния на износ рельсов и колес внешних и внутренних факторов. К главным внешним факторам относятся степень проскальзывания гребней колес по боковой грани рельсов при их качении и степень смазанности поверхностей. К внутренним – твердость стали, содержание углерода, микроструктура и содержание серы [2].

После завершения приработки износ рельсов нарастает прямо пропорционально количеству прошедшего по рельсам груза брутто, поэтому интенсивность износа рельсов во времени в первую очередь определяется грузонапряженностью данного участка. Значительное воздействие на износ рельсов оказывают нагрузка на ось подвижного состава, план и

профиль пути. Необходимо отметить значительную неоднородность бокового износа по длине рельсов, уложенных в одной и той же кривой одного радиуса. В статье приведены результаты замеров бокового износа в точках через 5 м на уровне 13 мм от поверхности катания в плети бесстыкового пути.

На профиле сильно изношенного рельса, который показан на рис. 1, видны зоны истирания. Такой профиль характерен для термоупрочненных рельсов, которые имеют повышенную твердость.



Рис. 1. Профиль головки рельса с большим боковым износом

Чрезмерный боковой износ головки рельса относится к дефекту 44.0 [3]. Он возникает у рельсов, лежащих на наружной (упорной) нити кривых радиусом не менее 1 000 м, под воздействием трения скольжения гребней набегающих колес. Набегание колеса на рельсы, которые лежат на наружной нити кривой, происходит в результате перекосного движения тележки при вписывании экипажа при обязательном контакте между гребнем первого по ходу колеса и наружным рельсом. Между гребнями колес и внутренним рельсом всегда остается зазор, величина которого зависит от ширины колеи и расстояния между

гребнями колес колесной пары. Следы касания гребней колес на рельсах, лежащих на внутренних нитях кривых, отсутствуют [4].

Углы набегания тележек вагонов на наружный рельс достигают 1–1,5°. Величина их определяется непогашенным поперечным ускорением, силами трения, возникающими в подпятнике тележки и между поверхностями катания колес и рельсов, а также коничностью колес.

Изменение режима движения поездов, а также состояние подвижного состава и пути значительно влияют на характер их взаимодействия и вызывают неисправности рельсовой колеи в кривых участках, рост износа колесных пар и рельсов. Установлено, что более 80 % повреждений рельсов, вызывающих их отказ, происходят в кривых участках вследствие повышенного воздействия колес подвижного состава [1].

Исследования взаимодействия колес подвижного состава с рельсами показали, что в прямых и кривых радиусом более 1 000 м оно происходит без контактирования и без износа гребней колес и боковых граней рельсов. В кривых радиусом от 1 000 до 650 м интенсивность бокового износа нарастает по мере снижения величины радиуса и более частого контактирования гребней с рельсами. В кривых радиусом менее 650 м вписывание ходовых тележек происходит при постоянном контакте гребней колес с наружными рельсами, интенсивность бокового износа здесь высокая [5]. Протяженность кривых радиусом менее 650 м на ОАО «РЖД» составляет около 17 тыс. км, что составляет 13 % от развернутой длины сети железных дорог.

Ранговый ряд влияния внутренних факторов рельсовых сталеи, в наибольшей степени определяющих их износостойкость, включает: твердость, содержание углерода и серы, микроструктуру. Достаточно хорошие результаты по износостойкости удастся получить при доведении твердости рельсов до значения 380–400 НВ. Проведенные эксперименты показали, что при одинаковой твердости износостойкость сталеи растет с увеличением содержания углерода до 1,05 % [5]. На основании исследований для работы в кривых малых радиусов были разработаны рельсы категории ДТ370ИК, изготовленные из заэвтектоидной стали с повышенным содержанием углерода

(до 0,95 %). Средние значения твердости поверхности катания рельсов ДТ370ИК составляют 400 НВ. В современных рельсовых сталях содержание вредного химического элемента серы снижено до очень малых значений (0,010–0,015 %) [6, 7].

На полигоне Западно-Сибирской дороги с 2014 г. началась укладка рельсов типа Р65 категории ДТ общего назначения производства ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», которые изготавливались по инновационной технологии с термической обработкой методом дифференцированной закалки сжатым воздухом с прокатного нагрева. К 2019 г. было уложено 1 779,7 км пути с такими рельсами (23 % от общей протяженности главных путей). Также в настоящее время на дороге эксплуатируются рельсы типа Р65 категории Т1 – 5 127,7 км, японские ВС250 – 6,9 км, рельсы типа Р75 – 447,4 км.

На примере двух кривых радиусом 390 и 393 м, расположенных на особогрузонапряженном участке со смешанным, преимущественно грузовым движением, в составе которого 60 % вагонов имеют осевые нагрузки 250 кН/ось, сравнили продолжительность срока службы рельсовых плетей разных изготовителей. Наименьшая интенсивность прироста бокового износа (0,051 мм / млн т брутто) зафиксирована у плетей из рельсов японского производства СВ250Я, наибольшая – на рельсах Т1 Новокузнецкого металлургического комбината (0,098 мм / млн т брутто). Рельсы категории ДТ370 ИК по интенсивности нарастания износа (0,073 мм / млн т брутто) не на много, но превосходят рельсы ДТ350 (0,082 мм / млн т брутто) проката 2015 г. К сожалению, этого нельзя сказать о рельсах ДТ350 2016 г. проката, поскольку интенсивность их износа превышает этот показатель для рельсов категории ДТ370 ИК на 20 % и приближается к интенсивности износа рельсов категории Т1 [8, 9].

Материалы и методы исследования

Эксплуатационные наблюдения проводились авторами с целью установления влияния параметров рельсовой колеи на интенсивность бокового износа рельсов в кривых среднего и малого радиусов.

Опытные кривые расположены на участке Инская – Сокур, который соединяет Транссибирскую магистраль с направлением на Кузбасс. Участок высокогрузонапряженный, со

скоростями движения пассажирских поездов 70 км/ч, грузовых – 60 км/ч.

Верхнее строение пути представляет собой бесстыковой путь с рельсами Р65, категории качества Т, железобетонными шпалами с отдельным промежуточным скреплением КБ-65.

Для инструментального исследования нарастания бокового износа и измерения параметров рельсовой колеи в процессе наработки тоннажа на пути 1 перегона Жеребцово – Издревая были заложены две опытные кривые.

Для нанесения меток на шейке рельса применялась стандартная измерительная рулетка 25 м и мел. С целью определения ширины колеи и положения рельсов по уровню использовался путеизмерительный шаблон ЦУП-3. Технические характеристики: диапазон измерения ширины колеи 1 510–1 550 мм, диапазон измерения возвышения одного рельса относительно другого –160/+160 мм, цена деления линейных шкал 1 мм, цена деления шкалы уровня 1 мм, предел допускаемой погрешности измерения размеров ± 1 мм. Для измерения бокового износа рельса использована специальная скоба модели 08601. Технические характеристики: диапазон измерений вертикаль-

ного износа 0–25 мм, диапазон измерений бокового износа 0–25 мм, цена деления шкалы 1 мм, погрешность скобы ± 1 мм.

Опытная кривая 1 расположена на 14-м км участка Инская – Сокур, имеет следующие паспортные данные: радиус $R = 490$ м, возвышение наружного рельса $h = 60$ мм, общая длина кривой $L = 400$ м. Опытная кривая 2 расположена на 15-м км, имеет следующие паспортные данные: радиус $R = 400$ м, возвышение наружного рельса $h = 65$ мм, общая длина кривой $L = 405$ м.

Для наблюдения за износом рельсов в круговых кривых были выбраны 100-метровые отрезки, на которых с шагом 5 м на шейке рельса мелом наносились метки. В этих местах в ходе проведения исследования были сняты следующие показания: ширина колеи, уровень наружного рельса относительно внутреннего и боковой износ. Стрелы изгиба были взяты с диаграммы вагона-путеизмерителя «Декарт» после прохода 14.09.2021.

Результаты исследований

Результаты наблюдений приведены в табл. 1, 2 и на рис. 2, 3.

Таблица 1

Результаты наблюдений за износом рельсов и параметрами рельсовой колеи в кривой 1 (путь 1, 14-й км)

Номер измерения	Координата точки, м	Ширина колеи, мм	Уровень, мм	Боковой износ, мм	Стрела изгиба, мм	Радиус, м	Непогашенное ускорение, м/с ²
1	0	1 534	56	9,0	34,7	490	0,222
2	5	1 533	60	9,0	34,7	490	0,197
3	10	1 538	60	11,0	33,7	504	0,181
4	15	1 536	56	10,0	34,2	497	0,214
5	20	1 536	58	10,5	34,7	490	0,210
6	25	1 535	56	9,0	34,7	490	0,222
7	30	1 537	56	10,0	34,7	490	0,222
8	35	1 535	52	9,0	31,7	536	0,198
9	40	1 538	58	11,0	34,2	497	0,202
10	45	1 535	55	11,0	34,7	490	0,228
11	50	1 539	54	11,0	34,7	490	0,234
12	55	1 536	57	10,0	32,7	520	0,183
13	60	1 535	50	10,0	33,7	504	0,242
14	65	1 538	56	12,0	36,7	463	0,255
15	70	1 536	57	10,0	34,7	490	0,216
16	75	1 535	60	9,0	34,7	490	0,197
17	80	1 533	52	11,0	34,7	490	0,246
18	85	1 536	58	11,0	34,7	490	0,210
19	90	1 537	54	10,0	33,7	504	0,218
20	95	1 536	49	9,0	32,7	520	0,232
21	100	1 539	56	9,0	34,7	490	0,222
Среднее значение		1 536	56	10,0	34,3	496	0,217

**Результаты наблюдений за износом рельсов и параметрами рельсовой колени
в кривой 2 (1-й путь, 15-й км)**

Номер измерения	Координата точки, м	Ширина колеи, мм	Уровень, мм	Боковой износ, мм	Стрела изгиба, мм	Радиус, м	Непогашенное ускорение, м/с ²
1	0	1 538	66	11,0	41,0	415	0,263
2	5	1 537	68	14,0	42,5	400	0,275
3	10	1 540	69	16,0	42,5	400	0,269
4	15	1 538	68	12,0	42,5	400	0,275
5	20	1 540	68	16,0	41,5	410	0,259
6	25	1 538	80	14,0	42,5	400	0,202
7	30	1 538	72	12,0	42,0	405	0,243
8	35	1 539	66	15,0	41,5	410	0,271
9	40	1 538	69	13,0	42,5	400	0,269
10	45	1 539	72	16,0	40,5	420	0,218
11	50	1 538	72	13,0	41,0	415	0,227
12	55	1 539	72	13,0	42,5	400	0,251
13	60	1 540	68	10,0	40,5	420	0,243
14	65	1 536	72	21,0	44,5	382	0,284
15	70	1 536	70	14,0	42,5	400	0,263
16	75	1 539	62	14,0	40,5	420	0,280
17	80	1 536	68	12,0	42,5	400	0,275
18	85	1 537	68	16,0	44,0	386	0,300
19	90	1 536	74	13,0	40,5	420	0,206
20	95	1 540	70	16,0	41,5	410	0,247
21	100	1 538	72	15,0	42,5	400	0,251
Среднее значение		1 538	70	14,1	42,0	405	0,256

Обработка данных, полученных в кривой 1, показала, что среднее значение радиуса на отрезке 100 м оказалось равным $R_{\text{ср}} = 496$ м, возвышения наружного рельса $h_{\text{ср}} = 56$ мм, непогашенного поперечного ускорения при средней скорости движения грузовых поездов 60 км/ч $\alpha_{\text{н}} = 0,217$ м/с². Заметим, что на рассматриваемом отрезке кривой 1 наблюдается значительный разброс данных: по радиусу от $R_{\text{min}} = 463$ м до $R_{\text{max}} = 536$ м, суммарный разброс данных составил 73 м. Значения возвышения наружного рельса находятся в диапазоне от $h_{\text{min}} = 49$ мм до $h_{\text{max}} = 60$ мм, разброс данных составил 11 мм.

Анализ полученных данных в кривой 2 показал, что среднее значение радиуса на отрезке 100 м оказалось равным $R_{\text{ср}} = 405$ м, возвышения наружного рельса $h_{\text{ср}} = 70$ мм, непогашенного поперечного ускорения $\alpha_{\text{н}} = 0,256$ м/с². При этом разброс значений радиуса составил от $R_{\text{min}} = 382$ м до $R_{\text{max}} = 420$ м, т. е. в сумме 38 м. Разброс величин возвышения наружного рельса составил от $h_{\text{min}} = 62$ мм до $h_{\text{max}} = 80$ мм, т. е. на 18 мм.

Из этих данных следует, что состояние кривой 1 в плане хуже по сравнению с кривой 2. Однако разброс величин возвышения наружного рельса у кривой 1 оказался меньше, чем у кривой 2.

Сравнение кривых 1 и 2 (табл. 3) показало, что в кривой 1 радиус на 90 м больше, а возвышение наружного рельса на 14 мм меньше, чем в кривой 2, что обеспечивает величины непогашенных ускорений в кривых $\alpha_{\text{н1}} = 0,217$ м/с² и $\alpha_{\text{н2}} = 0,256$ м/с². При этом нормативное значение непогашенного ускорения для грузовых поездов составляет $\alpha_{\text{н}} = 0,3$ м/с².

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что рельсы категории Т1 в наружной нити кривой 1 ($R = 496$ м) уложены в путь 30.06.2017 и к моменту обследования наработка составила 1 546 млн т брутто. Средняя величина износа на 100 м участка круговой кривой достигла $\delta_{1\text{ср}} = 10$ мм, а максимальная $\delta_{1\text{max}} = 12$ мм. Интенсивность бокового износа составила $\gamma_{1\text{ср}} = 0,028$ мм / млн т брутто, $\gamma_{1\text{max}} = 0,033$ мм / млн т брутто.

В кривой 2 ($R = 405$ м) рельсы категории Т1 уложены в наружную нить 10.12.2019, к началу обследования наработка тоннажа составила 145 млн т брутто при средней величине бокового износа $\delta_{2\text{ср}} = 14,1$ мм, а максимальной $\delta_{2\text{max}} = 21$ мм. Средняя величина интенсивности бокового износа здесь составила $\gamma_{2\text{ср}} = 0,097$ мм / млн т брутто, а максимальная $\gamma_{2\text{max}} = 0,145$ мм / млн т брутто.

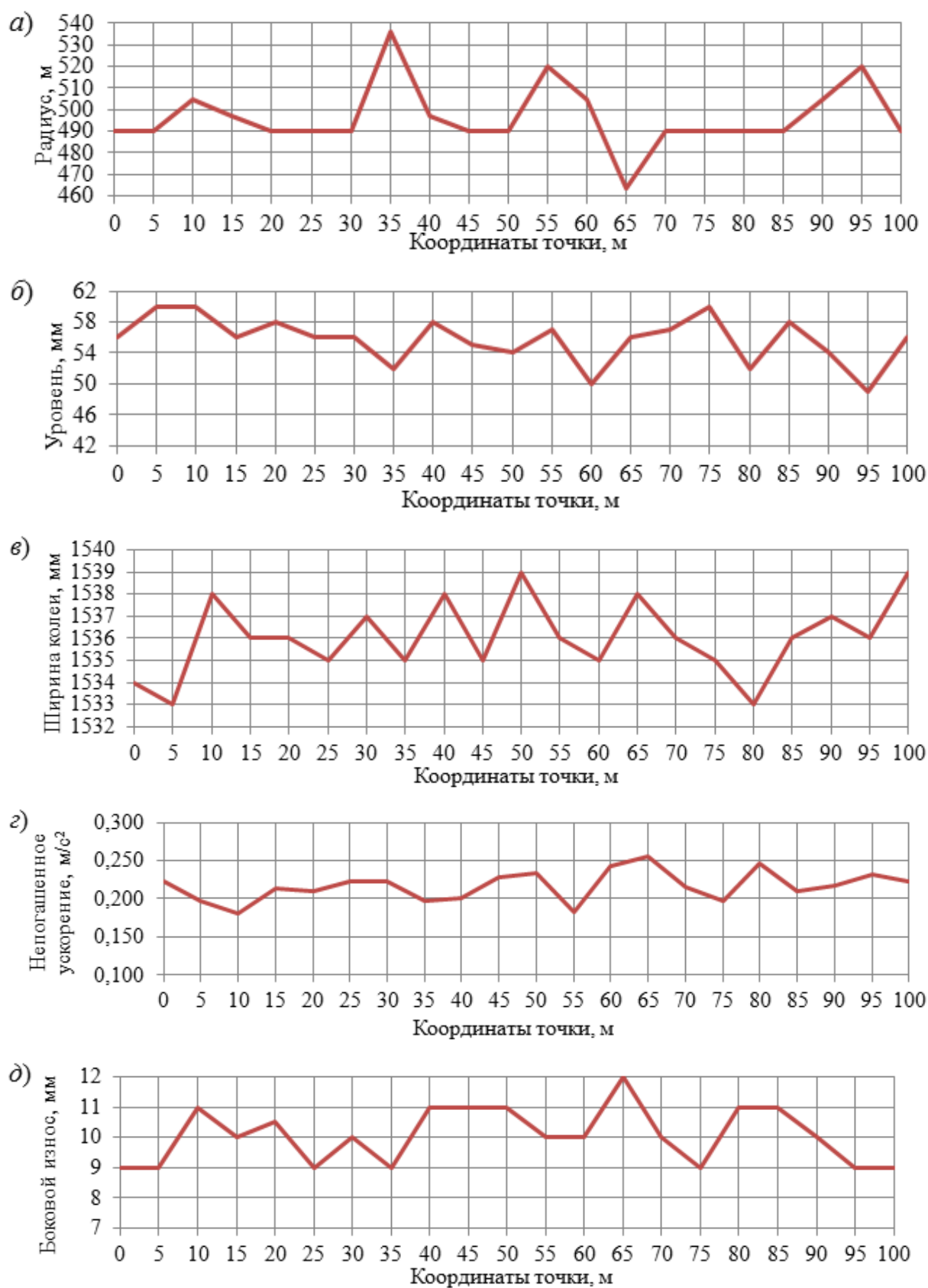


Рис. 2. Взаимосвязь бокового износа рельсов и параметров рельсовой колеи в кривой 1:
а – радиус; б – уровень; в – ширина колеи; г – непогашенное ускорение; д – боковой износ

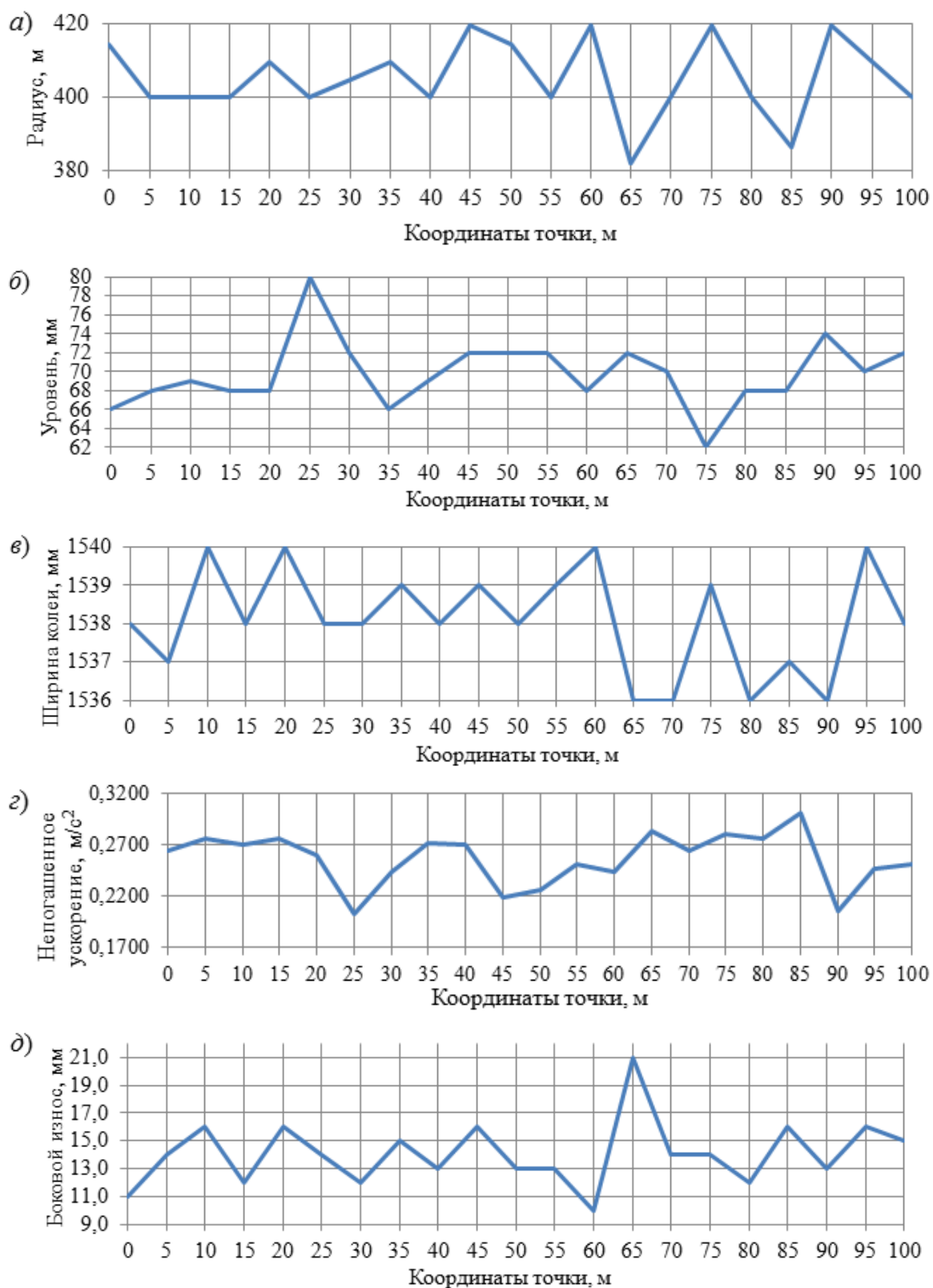


Рис. 3. Взаимосвязь бокового износа рельсов и параметров рельсовой колеи в кривой 2:
 а – радиус; б – уровень; в – ширина колеи; г – непогашенное ускорение; д – боковой износ

Таблица 3

Сравнительные значения параметров, полученных на опытных кривых

Радиус кривой, м		Возвышение наружного рельса, мм		Непогашенное поперечное ускорение, м/с ²		Боковой износ, мм	
R_1	R_2	h_1	h_2	$\alpha_{н1}$	$\alpha_{н2}$	δ_1	δ_2
496_{-33}^{+40}	405_{-23}^{+15}	56_{-7}^{+4}	70_{-8}^{+10}	$0,217_{-0,04}^{+0,04}$	$0,256_{-0,06}^{+0,06}$	10_{-1}^{+2}	$14,1_{-4,1}^{+6,9}$

При уменьшении радиуса кривой 2 по сравнению с кривой 1 на 19 % и увеличении непогашенного ускорения на 18 % средняя интенсивность бокового износа рельсов в кривой 2 оказалась в 3,5 раза выше, а максимальная – в 4,5 раза.

Аппроксимация полученных данных аналитическими зависимостями

Анализ полученных данных измерений бокового износа рельсов в кривых выявил их зависимость от наработанного тоннажа T , радиуса кривых R и осевой нагрузки подвижного состава P .

Полученные сведения по износу рельсов в конкретных условиях эксплуатации позволяют аппроксимировать их зависимостями вида [10]:

$$Y = \alpha + \gamma T \prod K_i, \quad (1)$$

где α , γ – начальное значение и интенсивность износа соответственно; K_i – коэффициенты, учитывающие условия эксплуатации, прежде всего радиус кривой и осевые нагрузки подвижного состава.

Параметру γ (тангенс угла наклона прямой с осью наработки тоннажа T) определяется в стандартных условиях при $K_i = 1$ зависимостью

$$\gamma = \frac{Y_i - \alpha}{T_i}. \quad (2)$$

Влияние радиуса кривых и осевых нагрузок подвижного состава на интенсивность бокового износа рельсов учитывается коэффициентами K_R и K_P .

Для определения данных коэффициентов можно применить степенную зависимость. Исходя из того, что стандартными условиями испытаний элементов верхнего строения пути считаются кривые $R = 400$ м и осевые нагрузки $P = 200$ кН для коэффициентов, учитывающих влияние радиуса кривой R и осевых нагрузок P , приняты выражения:

$$K_R = \left(\frac{400}{R_{cp}} \right)^{\beta}; \quad K_P = \left(\frac{P_{cp}}{200} \right)^{\delta}. \quad (3)$$

В этом случае уравнение (1) будет иметь вид

$$Y = \alpha + \gamma T K_R K_P. \quad (4)$$

По данным исследования износа рельсов на участке с бесстыковым путем, железобетонными шпалами и щебеночным балластом получены приближенные зависимости для прогнозирования величин бокового износа h_b , мм, в функции наработанного тоннажа T , млн т брутто, при учете радиуса кривой R_{cp} и средней осевой нагрузки подвижного состава P_{cp} :

$$h_b = 0,12 T \left(\frac{400}{R_{cp}} \right)^{1,1} \left(\frac{P_{cp}}{200} \right)^{0,45}. \quad (5)$$

Выводы

Анализ полученных данных свидетельствует, что рельсы категории Т1 в наружной нити кривой 1 ($R = 496$ м) уложены в путь 30.06.2017 и к моменту обследования наработка составила 1 546 млн т брутто. Средняя величина износа на 100 м участка круговой кривой достигла $\delta_{1cp} = 10$ мм, а максимальная $\delta_{1max} = 12$ мм. Интенсивность бокового износа составила $\gamma_{1cp} = 0,028$ мм / млн т брутто, $\gamma_{1max} = 0,033$ мм / млн т брутто.

В кривой 2 ($R = 405$ м) рельсы категории Т1 уложены в наружную нить 10.12.2019, к моменту обследования наработка тоннажа составила 145 млн т брутто при средней величине бокового износа $\delta_{2cp} = 14,1$ мм, а максимальной – $\delta_{2max} = 21$ мм. Средняя величина интенсивности бокового износа здесь составила $\gamma_{2cp} = 0,097$ мм / млн т брутто, а максимальная $\gamma_{2max} = 0,145$ мм / млн т брутто.

При уменьшении радиуса кривой 2 по сравнению с кривой 1 на 19 % и увеличении непогашенного ускорения на 18 % средняя интенсивность бокового износа рельсов в кривой 2 оказалась в 3,5 раза выше, а максимальная – в 4,5 раза.

По статистическим данным величин бокового износа получены приближенные зависимости в функции наработанного тоннажа T с учетом радиуса кривой R и средней осевой нагрузки P подвижного состава для конкретного участка пути.

Список источников

1. Шур Е. А. Повреждения рельсов. М. : Интекст, 2012. 192 с.
2. Крысанов Л. Г. Эксплуатация стойкости и надежность рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 5. С. 2–5.
3. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 23 октября 2014 г. № 2499р (в ред. от 10.10.2017). М., 2014. 35 с.
4. Параметры колеи и износ рельсов в кривых / Н. И. Карпущенко, А. П. Козлов, И. А. Котова, Е. С. Антерейкин // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 11. С. 7–9.
5. Карпущенко Н. И. Механико-математическая модель оценки интенсивности бокового износа рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 4. С. 31–37.
6. Абдурашитов А. Ю., Шур Е. А. Совершенствовать систему ведения рельсового хозяйства // Путь и путевое хозяйство. 2005. № 6. С. 2–6.
7. Саловатов Р. О. Эксплуатация рельсов на грузонапряженных и горно-перевальных участках // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 5. С. 24–26.
8. Комаров А. Ю. Среднесибирский ход в условиях развития тяжеловесного движения // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 8. С. 18–20.
9. Малыгин В. А., Шевцова Н. В., Богданов О. К. Опыт эксплуатации рельсов на Слюдянской дистанции пути // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 2. С. 21–24.
10. Карпущенко Н. И., Манakov А. Л., Труханов П. С. Оптимизация параметров жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути в сложных эксплуатационных условиях. Новосибирск : Наука. 2020. 148 с.
11. Исследование бокового износа рельсов в кривых на перевальном участке / Н. И. Карпущенко, Е. С. Антерейкин, Д. Ю. Замелова, П. С. Труханов // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 9. С. 35–40.
12. Взаимодействие колес и рельсов в кривых участках / Н. И. Карпущенко, И. А. Котова, Ю. Н. Ликратов [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 6. С. 2–5.
13. Карпущенко Н. И., Величко Д. В., Антерейкин Е. С. Регрессионный анализ процессов нарастания износа рельсов и вероятность их безотказной работы в кривых участках пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2012. Вып. 28. С. 6–15.

References

1. Shur E. A. Damage to rails. M.: Intekst; 2012. 192 p. (In Russ.).
2. Krysanov L. G. Exploitation of resistance and reliability of rails. *Track and track facilities*. 2008;(5):2–5. (In Russ.).
3. Defects of rails. Classification, catalog and parameters of defective and acutely defective rails: approved by the order of JSC “Russian Railways” from October 23, 2014 no. 2499r (as amended from 10.10.2017). M.; 2014. 35 p. (In Russ.).
4. Karpushchenko N. I., Kozlov A. P., Kotova I. A., Antereikin E. C. Gauge parameters and rail wear in curves. *Track and track facilities*. 2007;(11):7–9. (In Russ.).
5. Karpushchenko N. I. Mechanical and mathematical model for assessing the intensity of lateral rail wear. *Track and track facilities*. 2018;(4):31–37. (In Russ.).
6. Abdurashitov A. Yu., Shur E. A. To improve the system of rail maintenance. *Track and track facilities*. 2005;(6):2–6. (In Russ.).
7. Salovатов R. O. Exploitation of rails on cargo-stressed and mountain-crossing sections. *Way and track facilities*. 2020;(5):24–26. (In Russ.).
8. Komarov A. Y. Sredne-Sibirsky way in conditions of development of heavy-weight traffic. *Way and track facilities*. 2021;(8):18–20. (In Russ.).
9. Malygin V. A., Shevtsova N. V., Bogdanov O. K. Experience in operation of rails at Slyudyanka track distance. *Track and track facilities*. 2021;(2):21–24. (In Russ.).
10. Karpushchenko N. I., Manakov A. L., Trukhanov P. S. Optimization of parameters of the life cycle of the railway track superstructure in complex operating conditions. Novosibirsk: Nauka; 2020. 148 p. (In Russ.).
11. Karpushchenko N. I., Antereikin E. S., Zamelova D. A., Trukhanov P. S. The study of lateral wear of rails in the curves in the overpass section. *Track and track facilities*. 2018;(9):35–40. (In Russ.).
12. Karpushchenko N. I., Kotova I. A., Likratov Y. N., Surovin P. G., Antereikin E. C. Interaction of wheels and rails in the curved sections. *Track and track facilities*. 2008;(6):2–5. (In Russ.).
13. Karpushchenko N. I., Velichko D. V., Antereikin E. S. Regression analysis of rail wear growth processes and probability of their fail-safe operation in curved sections of track. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2012;28:6–15. (In Russ.).

Информация об авторах

Н. И. Карпущенко – профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

Е. М. Река – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

N. I. Karpushchenko – Professor of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

E. M. Reka – Post-graduate Student of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 17.01.2022; одобрена после рецензирования 18.01.2022; принята к публикации 05.04.2022.

The article was submitted 17.01.2022; approved after reviewing 18.01.2022; accepted for publication 05.04.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 625.142.44
doi 10.52170/1815-9265_2022_61_67

Экономичное армирование железобетонной шпалы

**Сергей Алексеевич Косенко¹, Дмитрий Владимирович Величко²,
Светлана Васильевна Богданович³, Серик Сатыбаевич Хасенов⁴,
Иван Константинович Соколовский⁵**

^{1, 2, 3, 5} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

⁴ Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан

¹ kosenko.s.a@mail.ru

² velichko@stu.ru

³ s.v.bogdanovich@mail.ru

⁴ Sake-56@mail.ru

⁵ sokolovskii-i@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена оптимизации арматурного струнопакета железобетонной шпалы. Стандартные шпалы типа Ш1 и ШС с небольшой высотой в среднем сечении характеризуются неравномерным распределением давления подошвы на балласт. Целью исследования являлось совершенствование железобетонных шпал и определение их параметров для обеспечения лучшего распределения напряжений в шпале при ее работе под поездами, в частности увеличение «эффективной» площади подошвы шпалы.

В программных комплексах для расчета методами конечных элементов были смоделированы несколько вариантов железобетонных шпал. Определены расчетные случаи, наиболее неблагоприятные для изгиба шпалы, – опора подошвы шпалы на слабо уплотненный щебеночный балласт и проверка шпалы на трещиностойкость на испытательном заводском стенде.

Анализ результатов расчетов с изменением силы натяжения проволок показал, что трещиностойкость обеспечивается при общем натяжении 38 струн силой от 300 до 310 кН для модифицированной шпалы, армированной 38 струнами диаметром 3 мм. Результаты испытаний железобетонных шпал из опытной партии с высотой струнопакета 90 мм и числом струн, равным 38 шт., показали, что бетон разрушается, а арматура не рвется. Следовательно, данная модификация позволяет более эффективно использовать арматурную проволоку. Кроме того, она обеспечивает лучшее распределение давления шпалы на балласт.

Для производства железобетонных шпал было также предложено увеличить высоту струнопакета до 105 мм с уменьшением числа струн высокопрочной проволоки до 40 шт. Это приведет к снижению максимального давления шпалы на балласт до 8 % и уменьшит темп накопления остаточных деформаций балласта под модифицированной шпалой на 25 % в сравнении с типовой шпалой Ш1 со струнопакетом из 44 струн высотой 75 мм.

Результаты экспериментальной проверки прочности и трещиностойкости железобетонных шпал с 38–40 арматурными струнами на шпалозаводах показали, что при увеличении высоты струнопакета до 90–105 мм требуемая трещиностойкость железобетонных шпал обеспечивается.

Ключевые слова: железнодорожный путь, верхнее строение пути, железобетонная шпала, арматура, струнопакет

Для цитирования: Экономичное армирование железобетонной шпалы / С. А. Косенко, Д. В. Величко, С. В. Богданович, С. С. Хасенов, И. К. Соколовский // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 67–76. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_67.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Reinforced concrete sleepers economical reinforcement

**Sergey A. Kosenko¹, Dmitry V. Velichko², Svetlana V. Bogdanovich³, Serik S. Khasenov⁴,
Ivan K. Sokolovskiy⁵**

^{1, 2, 3, 5} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

⁴ Academy of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan

¹ kosenko.s.a@mail.ru

² velichko@stu.ru

³ s.v.bogdanovich@mail.ru

⁴ Sake-56@mail.ru

⁵ sokolovskii-i@mail.ru✉

Abstract. The article is devoted to the optimization of the reinforcing string package of a reinforced concrete sleeper. Standard sleepers of the Sh1 and ShS types of small height in the middle section are characterized by an uneven distribution of sole pressure on the ballast. The purpose of this study was to improve reinforced concrete sleepers and determine their parameters to ensure better stress distribution in the sleeper during its operation under trains, in particular, to increase the “effective” area of the sleeper foot.

Several variants of reinforced concrete sleepers were modeled in software systems for calculation by finite element methods. The design cases were determined, the most unfavorable for the bending of the sleeper – the support of the sole of the sleeper on the weakly compacted crushed stone ballast and the bending of the sleeper on the test factory stand when checking it for crack resistance.

An analysis of calculation results with a change in the tension force of the wires showed that crack resistance is provided with a total tension of 38 strings with a force of 300 to 310 kN for a modified sleeper reinforced with 38 strings with a diameter of 3 mm. As a result of testing reinforced concrete sleepers from an experimental batch with a string package height of 90 mm and a number of strings equal to 40 pieces, it was shown that the concrete is destroyed, and the reinforcement is not torn. Therefore, this modification allows more efficient use of reinforcing wire. In addition, it provides a better distribution of sleeper pressure on the ballast.

For the production of reinforced concrete sleepers, it was proposed to increase the height of the string package to 105 mm with a decrease in the number of strings of high-strength wire to 40 pcs. This will reduce the maximum pressure of the sleeper on the ballast to 8 % and reduce the rate of accumulation of residual deformations of the ballast under the modified sleeper by 25 % in comparison with a typical sleeper Sh1 with a string package of 44 strings 75 mm high.

The results of an experimental verification of the strength and crack resistance of reinforced concrete sleepers with 38–40 reinforcing strings at the sleeper plant LLP “Magnetik” showed that with an increase in the height of the string package to 90–105 mm, the required crack resistance of reinforced concrete sleepers is provided.

Keywords: railway track, superstructure, concrete sleeper, rebar, string package

For citation: Kosenko S. A., Velichko D. V., Bogdanovich S. V., Khasenov S. S., Sokolovskiy I. K. Reinforced concrete sleepers economical reinforcement. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):67–76. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_67.

Введение

Типовые конструкции железобетонных шпал для различных промежуточных креплений [1–4] не по всем параметрам удовлетворяют путейцев-производственников [5, 6]. Конструктивное совершенствование железобетонных шпал при использовании приближенных методов расчета требует времени на экспериментальные наблюдения и испытания предлагаемых конструкций шпал на опытных участках пути [7, 8]. При этом можно лишь предполагать, как скажется то или иное изменение конструкции (или размещение арматуры по сечению шпалы), технологии изготовления (например, снижение натяжки арматуры) на работу шпалы и ее ресурс.

В связи с этим необходимы расчетные оценки для оптимизации формы шпалы, размещения арматурного струнопакета [9], обеспечения многократной перекладки шпал в главные пути после капитального ремонта пути. Такие расчеты по традиционной методике выполнить невозможно [10, 11]. Поэтому следует применять численные методы [12].

К недостаткам железобетонных шпал некоторые специалисты относят их высокую прочность и большую жесткость основания пути. Однако именно эти качества также могут быть названы в качестве преимуществ. Главное, что на этих шпалах создается более прочное и равноупругое основание и даже на стрелочных переводах различия в жесткости основания меньше на железобетонных брусках, чем на железобетонных шпалах [13, 14]. Правда, неровности на пути [15–17] и отступления от норм содержания на железобетонных шпалах ощущаются сильнее [18]. Следовательно, увеличивается количество отказов пути [19, 20]. Но эти недостатки относятся к культуре содержания пути [21, 22], а не к дефектам железобетонных шпал.

При повышении жесткости пути растут динамические напряжения во всех элементах верхнего строения пути [23, 24]. Снижается общая надежность пути [25]. Приходится проводить дополнительные мероприятия по повышению несущей способности грунтов земляного полотна [26, 27], особенно на участках с тяжеловесным движением поездов [28, 29] и на подхо-

дах к искусственным сооружениям [30, 31]. Повышенные осевые нагрузки на участках тяжеловесного движения поездов приводят к ускоренному износу рельсов и колес подвижного состава [32, 33]. Это, в свою очередь, приводит к дополнительным сложностям в логистике перевозок грузов [34–37] и эффективности их доставки потребителям [38, 39].

Стандартные шпалы типа ШП1 и ШС характеризуются неравномерным распределением давления подошвы на балласт, что создает концентрации напряжений, приводящие к более интенсивному накоплению остаточных деформаций балластного слоя.

Стремление к экономии бетона привело проектировщиков к уменьшению высоты шпалы в ее середине [40]. В свою очередь уменьшение высоты шпалы в среднем сечении ухудшило опору шпалы на балласт, увеличило отрясение концов шпал и обусловило рост объема работ по выправке пути.

Поэтому оптимизация параметров железобетонной шпалы является актуальной задачей.

Совершенствование железобетонных шпал и определение их оптимальных параметров должны производиться с целью обеспечения лучшего распределения напряжений в шпале при ее работе под поездами и увеличения «эффективной» площади подошвы шпалы, передающей основное давление на балласт.

Материалы и методы исследования

В модели железобетонной шпалы элементы арматуры моделируются конечными элементами типа BEAM 3D, сопряженными с объемными элементами типа SOLID, моделирующими бетон (рис. 1).

Конечно-элементная модель предварительно напряженной арматуры в железобетонной шпале предполагает совместную работу арматурной проволоки и бетона.

Расчетная конечно-элементная модель рельсошпальной решетки в рассматриваемых диапазонах нагрузок с погрешностью в 1–3 % является линейно упруго-деформируемой.

Работа предварительно напряженной арматуры рассматривается в упругой стадии. Предел упругости высокопрочной арматурной проволоки диаметром 3 мм (не ниже класса прочности B1200) обычно близок к значению 15 000–17 000 кг/см² (1 500–1 700 МПа). Допустимый предел натяжения одной проволоки (80 % от предела упругости) близок к 1 050 кгс (10,3 кН).

Имитация предварительного натяжения арматуры приложением к торцам шпалы пар постоянных встречных сил по методике фирмы Techno Rail для моделирования сжатия бетона некорректна, так как при этом неправильно моделируется область заанкеривания арматуры.

В отличие от зарубежной, в предложенной методике натяжение арматуры в конечно-эле-

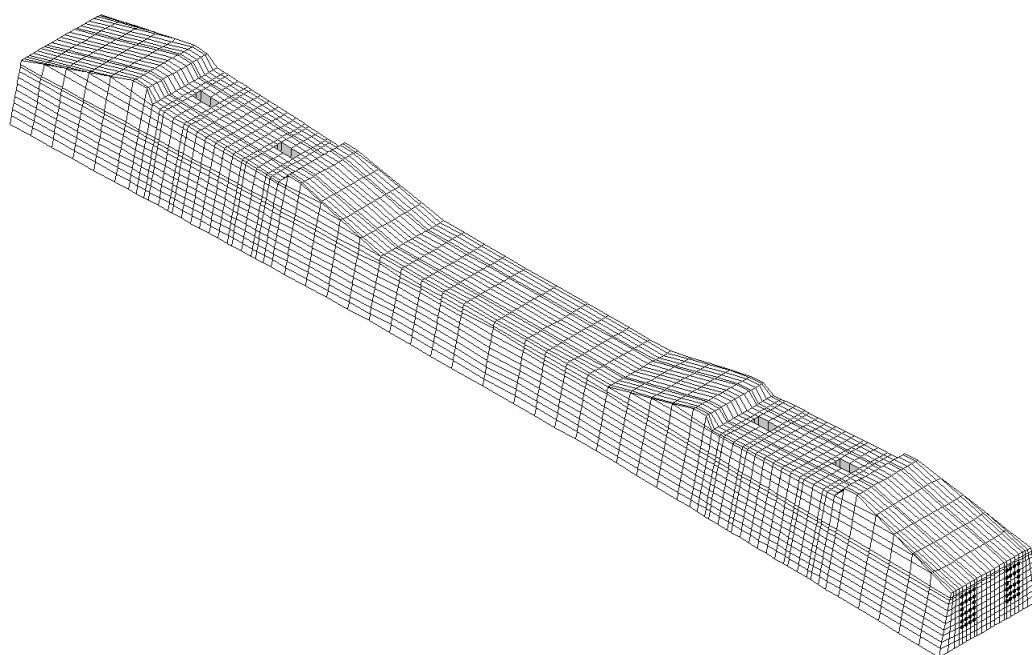


Рис. 1. Конечно-элементная модель шпалы ШП1 с отверстиями под закладные болты

ментной модели шпалы моделируется ее охлаждением. Происходящее при этом укорочение проволоки вызывает напряжения сжатия бетона шпалы.

Расчетные нагрузки для железобетонных шпал регламентированы [40]. Фактические вертикальные нагрузки на подрельсовую площадку железобетонной шпалы от грузового подвижного состава (обычно не более 80 кН) ниже нагрузок, установленных для заводских испытаний (130 кН) на трещиностойкость.

В отличие от традиционной методики расчета железобетонных шпал использование численных методов позволяет, в частности, определить:

1) распределение внутренних напряжений в бетоне шпалы и в арматуре в зависимости от размеров шпалы и внешних нагрузок;

2) деформированный вид шпалы под нагрузкой.

В конечно-элементной модели железнодорожный путь представлен рельсами, подрельсовыми прокладками, железобетонными шпалами, щебеночным балластом, песчаной подушкой, рабочей зоной земляного полотна насыпи из прочных супесчаных грунтов на прочном основании.

Определяющими расчетными случаями избраны наиболее неблагоприятные для изгиба шпалы – опора подошвы шпалы на слабо уплотненный щебеночный балласт и изгиб шпалы на испытательном заводском стенде при ее проверке на трещиностойкость.

Предварительно натянутый усилием 360 кН арматурный струнопакет после набора передаточной прочности бетоном шпалы разрезается в местах установки диафрагм. Сжимаясь после разрезки, он передает напряжение сжатия на бетон. В зависимости от величины момента инерции струнопакета обеспечиваются разное сопротивление изгибу железобетонной шпалы под поездной нагрузкой и разная эффективная площадь передачи поездного давления на нижележащий щебень.

Результаты исследования

Для применяемых на шпалозаводах форм для шпал Ш1 предлагается увеличение высоты струнопакета с 75 до 105 мм (на 30 мм). При сохранении форм под шпалы и толщины защитного слоя по подошве шпалы в 30 мм необходимо увеличить высоту шпалы на 10 мм (почти в пределах допуска +8 мм) и разместить ее арматуру в соответствии с рис. 2. Необходимый для формирования шпал бетон при этом размещается в корыте шпалы.

Для формирования шпал с увеличенной высотой струнопакета целесообразно использовать утолщенный средний клин и удлинить прорези в диафрагме. Распределение продольных напряжений по подошве модифицированной шпалы, армированной 38 струнами диаметром 3 мм, при тех же внешних нагрузках приведено на рис. 3.

Как следует из анализа данных рис. 3, растягивающие напряжения в бетоне нижних волокон шпалы не превышают 86 кПа, что зна-

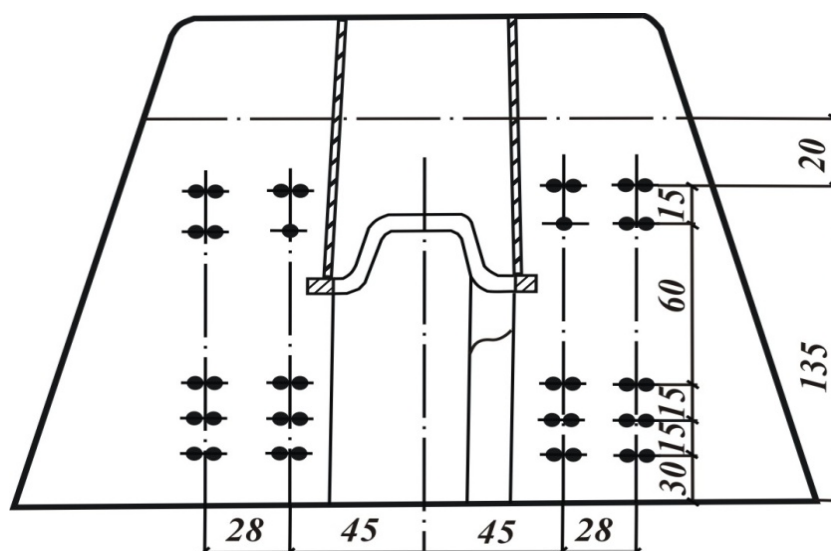


Рис. 2. Струнопакет высотой 105 мм из 38 струн арматурной проволоки диаметром 3 мм

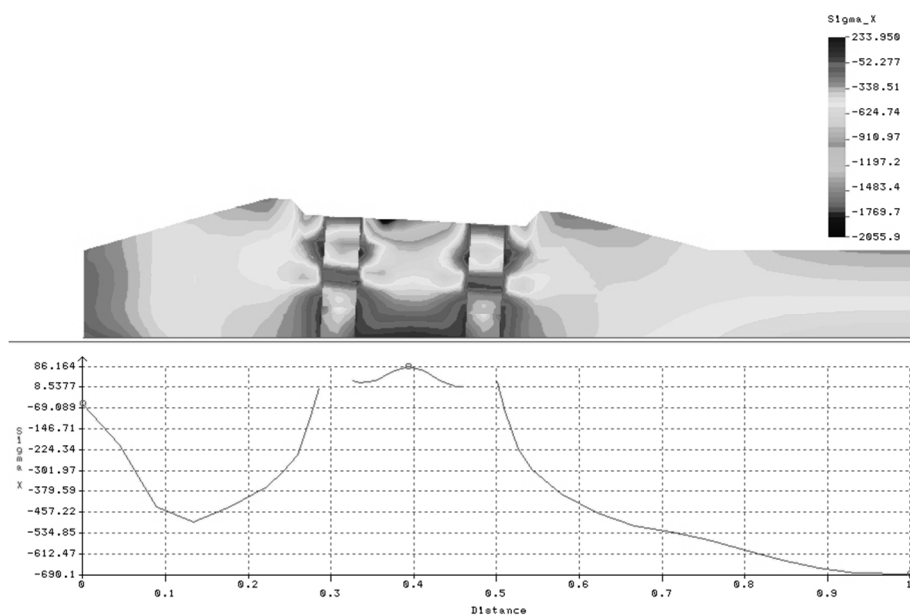


Рис. 3. Распределение продольных напряжений по оси подошвы шпалы со струнопакетом высотой 105 мм

чительно ниже допускаемых напряжений. Обеспечивается высокая трещиностойкость модифицированной шпалы.

Анализ результатов расчетов с изменением силы натяжения проволок показал, что трещиностойкость обеспечивается при общем натяжении 38 струн силой 300–310 кН (8,1 кН на одну струну). Для лучшего использования возможностей арматуры предлагается увеличить натяжение арматурных проволок с 825 кгс (8,1 кН) до 900–950 кгс (8,84–9,32 кН), что меньше допускаемых сил натяжений [40].

Модифицированные шпалы с увеличенной высотой струнопакета, армированные 38 струнами вместо 44, были изготовлены и испытаны на шпалозаводе «Каликино» Горьковской железной дороги по рекомендации профессора Э. П. Исаенко.

Значительное уменьшение количества струн было сделано для проверки правильности методики расчета. Изготовленные с уменьшенным количеством струн шпалы успешно прошли заводские испытания на трещиностойкость. Затем они также успешно прошли циклические испытания во ВНИИЖТ.

На шпалозаводе ТОО «Магнетик» в Алматы по рекомендации профессора С. А. Косенко изготовлены и проведены испытания железобетонных шпал (до полного их разрушения) опытной партии из 20 шт. с высотой струнопакета

105 мм и числом струн, равным 40 (рис. 4). Натяжение струн выполнено со средним усилием 8,34 кН на струну (850 кг на струну). Отличительной особенностью разрушения модернизированной шпалы стало одновременное разрушение бетона и разрыв арматуры. При испытаниях обычной шпалы Ш1 всегда разрушается бетон, а арматура не рвется. Следовательно, предлагаемая модификация размеров струнопакета позволяет эффективнее использовать арматурную проволоку. При этом обеспечивается лучшее распределение давления шпалы на балласт (увеличивается площадь передачи эффективного давления и за счет этого примерно на 7 % снижается величина максимального давления).

Модернизированная шпала характеризуется меньшим (на 10–15 %) удельным давлением на балласт по подошве шпалы и меньшим (примерно на 30 %) темпом накопления осадок пути в процессе эксплуатации.

Для производства железобетонных шпал предлагается увеличение высоты струнопакета до 105 мм с уменьшением числа струн высокопрочной проволоки диаметром 3 мм до 40 шт. Это приведет к снижению максимального давления шпалы на балласт до 8 % и снизит темп накопления остаточных деформаций балласта под модифицированной шпалой на 25 % в сравнении с типовой шпалой Ш1 со струнопакетом из 44 струн высотой 75 мм.

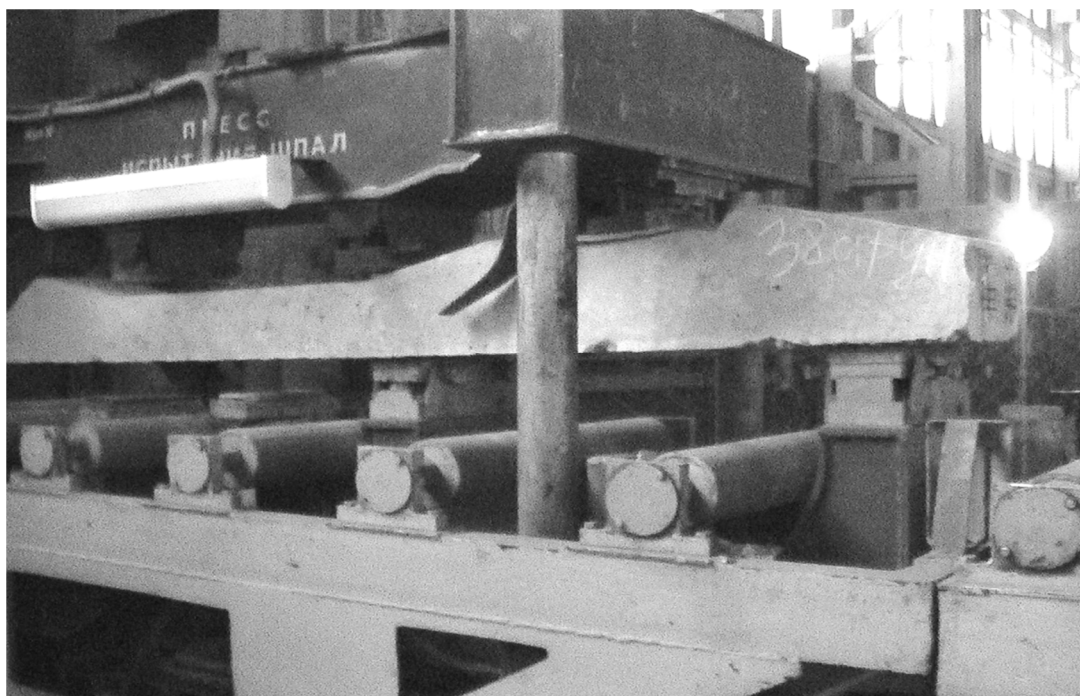


Рис. 4. Заводские испытания шпалы с увеличенной высотой струнопакета на трещиностойкость

Экспериментальная проверка прочности и трещиностойкости железобетонных шпал с 40 арматурными струнами на шпалозаводе ТОО «Магнетик» показала, что при увеличении высоты струнопакета до 90–105 мм требуемая трещиностойкость железобетонных шпал обеспечивается. Эти результаты подтверждаются данными ВНИИЖТ по циклическим испытаниям шпал с увеличенной высотой струнопакета.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований трещиностойкости железобетонных шпал выявлено соответствие с данными ВНИИЖТ, а также с другими исследованиями.

Выводы

Анализ результатов приведенных выше расчетов разных вариантов железобетонных шпал, изготавливаемых по принятой в России

технологии, убедительно свидетельствует, что для снижения темпов накопления осадок балласта и снижения трудоемкости текущего содержания пути целесообразно увеличение высоты арматурного струнопакета до 90–105 мм и сокращение количества арматурных струн до 38–40 шт.

Для существенного снижения затрат на капитальные ремонты пути рекомендуется в железобетонных шпалах вокруг дюбеля выполнять дополнительное армирование, которое позволит заменить поврежденные дюбели и вновь использовать железобетонные шпалы в главных путях магистральных железных дорог.

Применение шпал с увеличенной высотой струнопакета экономически эффективно из-за продления срока службы самих шпал и снижения потребности в периодических ремонтах и выправке пути.

Список источников

1. Косенко С. А., Юдин О. Г. Промежуточные рельсовые скрепления с регулировкой шаблона и уровня // Политранспортные системы : материалы X Международной научно-технической конференции (Новосибирск, 15–16 ноября 2018 г.). Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2019. С. 100–104.
2. Севостьянов А. А., Величко Д. В., Рошка В. В. Оценка эксплуатационных показателей работы железнодорожного пути в зависимости от конструкции промежуточных рельсовых скреплений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 3 (50). С. 23–30.
3. Анализ перспективных промежуточных рельсовых скреплений : отчет по НИР / С. А. Косенко [и др.]. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2020. 71 с.

4. Скрепления КН-65 и ГС-65 / Н. И. Карпущенко, И. Я. Пименов, В. А. Отмахов [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2003. № 9. С. 30–33.
5. Блажко, Л. С., Васильев С. Г., Романов А. В. Оценка риска в системе технического регулирования инфраструктуры // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 1 (80). С. 4–7.
6. Колос А. Ф., Козлов И. С. Современные конструкции верхнего строения пути для строительства скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий // Бюллетень результатов научных исследований. 2013. № 3 (28). С. 176–181.
7. Kosenko S., Akimov S., Surovin P. Technology of rail replacement at end stresses // MATEC : Web of Conferences. 2018. № 216. P. 1–8.
8. Карпущенко Н. И. Надежность связей рельсов с основанием. М. : Транспорт, 1986. 150 с.
9. Косенко С. А., Золотухин В. И. Совершенствование конструкции железобетонной шпалы // Вестник Инженерной академии Республики Казахстан. 2007. № 1 (30). С. 76–78.
10. Железнодорожный путь. Расчеты и проектирование : учебно-методическое пособие : учебное электронное издание / С. А. Косенко, И. А. Котова, И. В. Никитин, И. К. Соколовский. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2021. 115 с. <http://doi.org/10.12731/ofernio.2021.24935.2>.
11. Косенко С. А., Акимов С. С. Устройство и ремонт железнодорожного пути : учебно-методическое пособие : учебное электронное издание. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2021. 128 с. <http://doi.org/10.12731/ofernio.2021.24882.2>
12. Косенко С. А., Исаенко Э. П. Моделирование и расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций железнодорожного пути методом конечных элементов : монография. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2017. 144 с.
13. Разбивка соединений и пересечений железнодорожных путей : учебное пособие / В. Б. Захаров, В. И. Полетаев, А. В. Романов, Е. В. Черняев. СПб. : Издательство Петербургского государственного университета путей сообщения, 2013. 46 с.
14. Блажко Л. С., Дмоховский М. Э., Захаров В. Б. Способ продления срока службы стрелочных переводов // Вестник Института проблем естественных монополий. Техника железных дорог. 2017. № 2 (38). С. 54–58.
15. Исследование напряженного состояния в контакте «колесо-рельс» при наличии выщербины / И. В. Федоров, А. А. Воробьев, И. К. Самаркина [и др.] // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2019. № 4. С. 78–86.
16. Определение параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации полувагона / А. М. Орлова, А. А. Воробьев, А. В. Саидова, Д. Е. Керенцев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2015. № 2. С. 74–84.
17. Воробьев А. А. Математическое моделирование параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации вагонов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2016. № 1 (33). С. 34–41.
18. Причины нарушения плавности хода поездов / А. В. Романов, А. Ф. Колос, А. А. Киселев, С. В. Романов // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 7. С. 29–31.
19. Воробьев В. С., Брызгалова Р. М., Репина И. Б. Человеческий фактор в системе отказов технических средств железнодорожного транспорта // Наука и транспорт. 2012. № 3. С. 42–46.
20. Севостьянов А. А., Величко Д. В. Основные причины отказов рельсов в процессе эксплуатации // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 51–54.
21. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2888 р от 17.12.2021. М. : ОАО «РЖД», 2021. 273 с.
22. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Министерства транспорта РФ от 21.12.2010 (в ред. приказа Министерства транспорта РФ № 54 от 25.12.2018). М., 2018. 475 с.
23. Виноградов В. В., Никонов А. М., Яковлева Т. Г. Расчеты и проектирование железнодорожного пути : учебное пособие. М. : Маршрут, 2003. 485 с. ISBN 5-89035-112-5.
24. Железнодорожный путь : учебник / Е. С. Ашпиз, А. И. Гасанов, Б. Э. Глюзберг и [др.] ; под ред. Е. С. Ашпица. М. : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. 544 с. ISBN 978-5-89035-689-5.
25. Лысюк В. С., Каменский В. Б., Башкатова Л. В. Надежность железнодорожного пути. М. : Транспорт, 2001. 286 с.
26. Анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна / Л. С. Блажко, С. Н. Чуян, В. Б. Захаров, Е. В. Черняев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2016. Т. 13, № 3 (48). С. 328–336.
27. Ланис А. Л., Овчинников С. А. Усиление грунтов земляного полотна армирующими конструкциями // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : труды IX Международной конференции. М. : Издательство Московского государственного университета путей сообщения, 2014. С. 153–156.

28. Акимов С. С., Косенко С. А. Ресайклинг как альтернативный способ повышения прочности подбалластного основания железнодорожного пути // Наука, образование, кадры : материалы национальной конференции в рамках IX Международного Сибирского транспортного форума (Новосибирск, 22–25 мая 2019 г.). Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2019. С. 204–212.
29. Косенко С. А., Котова И. А., Акимов С. С. Техничко-экономическое обоснование устройства защитных подбалластных слоев из грунтобетона при тяжеловесном движении поездов // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23, № 1. С. 161–174.
30. Квашнин М. Я., Косенко С. А., Бондарь И. С. Вибродиагностика подходной насыпи железнодорожного моста // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 2 (41). С. 34–39.
31. Ланис А. Л., Разуваев Д. А. Усиление грунтов земляного полотна на подходах к мостам и путепроводам // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2016. № 3 (63). С. 97–104.
32. Уразбеков А. К., Косенко С. А. Техническая диагностика и неразрушающий контроль железнодорожных рельсов : учебное пособие. Алматы : Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Т. Тынышпаева, 2008. 193 с. ISBN 9965-421-85-4.
33. Оценка стоимости жизненного цикла верхнего строения пути при продлении межремонтного периода / С. А. Косенко, С. С. Акимов, С. В. Богданович, И. К. Соколовский // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1 (56). С. 71–78.
34. Покровская О. Д. Коровяковский Е. К. Терминалистика – организация и управление в транспортных узлах // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. Т. 13, № 4 (49). С. 509–520.
35. Покровская, О. Д. Определение параметров терминальной сети региона (на примере Кемеровской области) // Транспорт Урала. 2012. № 1 (32). С. 93–97.
36. Покровская О. Д., Самуйлов В. М. Международная логистика Транссибирской магистрали : использование транзитного потенциала России // Инновационный транспорт. 2016. № 3 (21). С. 3–7.
37. Титова Т. С., Покровская О. Д. Междисциплинарное положение теории терминалистики // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2018. Т. 15, № 2. С. 248–260.
38. Псеровская Е. Д., Ким А. С., Кузьмина О. А. Повышение эффективности услуги по ускоренной доставке грузов в направлении Дальнего Востока // Транспорт Урала. 2019. № 2 (61). С. 32–37.
39. Туранов Х. Т., Псеровская Е. Д. Расчет продольного сдвига груза цилиндрической формы и усилия в элементах крепления при вариации количества крепежных элементов // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 16–23.
40. ГОСТ 33330–2015. Шпалы железобетонные для железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. М. : Стандартинформ, 2016. 31 с.

References

1. Kosenko S. A., Yudin O. G. Intermediate rail fasteners with template and level adjustment. *Polytransport systems: materials of the X Intern. sci.-tech. conf. (Novosibirsk, November 15–16, 2018)*. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University; 2019. P. 100–104. (In Russ.).
2. Sevostyanov A. A., Velichko D. V., Roshka V. V. Evaluation of the operational performance of the railway track depending on the design of intermediate rail fastenings *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(50):23–30. (In Russ.).
3. Kosenko S. A. [et al.]. Analysis of promising intermediate rail fastenings: research report. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University; 2020. 71 p. (In Russ.).
4. Karpuschenko N. I., Pimenov I. Ya., Otmakhov V. A. [et al.]. Fastenings KN-65 and GS-65. *Way and track facilities*. 2003;(9):30–33. (In Russ.).
5. Blazhko L. S., Vasiliev S. G., Romanov A. V. Risk assessment in the system of technical infrastructure resolution. *Transport of the Russian Federation*. 2019;(80):4–7. (In Russ.).
6. Kolos A. F., Kozlov I. S. Modern track structures for the construction of high-speed and high-speed railway lines. *Bulletin of scientific research results*. 2013;(28):176–181. (In Russ.).
7. Kosenko S., Akimov S., Surovin P. Technology of rail replacement at end stresses. *MATEC: Web of Conferences*. 2018;216:1–8.
8. Karpuschenko N. I. Reliability of connections of rails with the base. M.: Transport; 1986. 150 p. (In Russ.).
9. Kosenko S. A., Zolotukhin V. I. Improvement of the design of reinforced concrete sleepers. *Bulletin of the Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan*. 2007;(30):76–78. (In Russ.).
10. Kosenko S. A., Kotova I. A., Nikitin I. V., Sokolovsky I. K. Railway track. Calculations and design : textbook-method. allowance: educational electronic edition. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University; 2021. 115 p. <http://doi.org/10.12731/ofernio.2021.24935.2>. (In Russ.).
11. Kosenko S. A., Akimov S. S. Device and repair of the railway track: textbook.-method. allowance: textbook. electron. edition. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University, 2021. 128 p. <http://doi.org/10.12731/ofernio.2021.24882.2>. (In Russ.).

12. Kosenko S. A., Isaenko E. P. Modeling and calculations of the stress-strain state of railway track structures by the finite element method: monograph. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University; 2017. 144 p. (In Russ.).
13. Zakharov V. B., Poletaev V. I., Romanov A. V., Chernyaev E. V. Breakdown of connections and intersections of railway tracks: textbook. allowance. St. Petersburg: Publishing House of Petersburg State Transport University; 2013. 46 p. (In Russ.).
14. Blazhko L. S., Dmukhovskiy M. E., Zakharov V. B. Method for extending the service life of railroad switches. *Bulletin of the Institute of Problems of Natural Monopolies. Railway technology*. 2017;(38):54–58. (In Russ.).
15. Fedorov I. V., Vorobyov A. A., Samarkina I. K., Konogray O. A., Bunkova T. G. Study of the stress state in the contact “wheel-rail” in the presence of a chip. *Proceedings of Petersburg State Transport University*. 2019;(4):78–86. (In Russ.).
16. Orlova A. M., Vorobyov A. A., Saidova A. V., Kerentsev D. E. Determination of the parameters of wheel-rail contact for various operating conditions of a gondola car. *Proceedings of Petersburg State Transport University*. 2015;(2):74–84. (In Russ.).
17. Vorobyov A. A. Mathematical modeling of wheel-rail contact parameters for different operating conditions of railcars. *Bulletin of the Institute for Problems of Natural Monopolies: Railway Engineering*. 2016;(33):34–41. (In Russ.).
18. Romanov A. V., Kolos A. F., Kiselev A. A., Romanov S. V. Causes of violation of the smooth running of trains. *Way and track facilities*. 2020;(7):29–31. (In Russ.).
19. Vorobyov V. S., Bryzgalova R. M., Repina I. B. Human factor in the system of failures of technical means of railway transport. *Science and Transport*. 2012;(3):42–46. (In Russ.).
20. Sevostyanov A. A., Velichko D. V. The main causes of rail failures during operation. *Transport of the Urals*. 2017;(53):51–54. (In Russ.).
21. Rules for the appointment of railway track repairs: approved. Decree of Russian Railways No. 2888 r dated December 17, 2021. M.: Russian Railways JSC; 2021. 273 p. (In Russ.).
22. Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation: approved. by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of December 21, 2010: as amended. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 54 dated December 25, 2018. M.; 2018. 475 p. (In Russ.).
23. Vinogradov V. V., Nikonov A. M., Yakovleva T. G. Calculations and design of the railway track: textbook allowance. M.: Route; 2003. 485 p. ISBN 5-89035-112-5. (In Russ.).
24. Ashpiz E. S., Gasanov A. I., Gluzberg B. E. [et. al.]; Ashpiz E. S., ed. Railway track: textbook. M.: Educational methodical education center on the railway transp.; 2013. 544 p. ISBN 978-5-89035-689-5. (In Russ.).
25. Lysyuk V. S., Kamensky V. B., Bashkatova L. V. Railway track reliability. M.: Transport; 2001. 286 p. (In Russ.).
26. Blazhko L. S., Chuyan S. N., Zakharov V. B., Chernyaev E. V. Analysis of ways to increase the bearing capacity of soils of the main subgrade area. *Proceedings of Petersburg State Transport University*. 2016;13(48):328–336. (In Russ.).
27. Lanis A. L., Ovchinnikov S. A. Strengthening subgrade soils with reinforcing structures. *Modern problems of design, construction and operation of the railway track: Proceedings of the IX International Conference*. M.: Publishing House of the Moscow State Transport University; 2014. P. 153–156. (In Russ.).
28. Akimov S. S., Kosenko S. A. Recycling as an alternative way to increase the strength of the sub-ballast base of a railway track. *Science, education, personnel: materials of the nat. conf. within the framework of the IX Intern. Sib. transp. Forum (Novosibirsk, May 22–25, 2019)*. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University; 2019. P. 204–212. (In Russ.).
29. Kosenko S. A., Kosenko I. A., Akimov S. S. A feasibility study for the installation of protective sub-ballast layers of soil concrete during heavy train traffic. *Bulletin of the Tomsk University of Architecture and Civil Engineering*. 2021;23(1):161–174. (In Russ.).
30. Kvashnin M. Ya., Kosenko S. A., Bondar I. S. Vibrodiagnostics of the railway bridge approach embankment. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2017;(41):34–39. (In Russ.).
31. Lanis A. L., Razuvaev D. A. Strengthening subgrade soils on approaches to bridges and overpasses. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2016;(63):97–104. (In Russ.).
32. Urazbekov A. K., Kosenko S. A. Technical diagnostics and non-destructive testing of railway rails: textbook. allowance. Almaty: Kazakh Academy of Transport and Communications. M. T. Tynyshpaeva; 2008. 193 p. ISBN 9965-421-85-4. (In Russ.).
33. Kosenko S. A., Akimov S. S., Bogdanovich S. V., Sokolovsky I. K. Estimation of the cost of the life cycle of the upper structure of the track when extending the overhaul period. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(56):71–78. (In Russ.).
34. Pokrovskaya O. D., Korovyakovskiy E. K. Terminalistics – organization and management in transport hubs. *Proceedings of the Petersburg State Transport University*. 2016;13(49):509–520. (In Russ.).
35. Pokrovskaya O. D. Determination of the parameters of the terminal network of the region (on the example of the Kemerovo region). *Transport of the Urals*. 2012;(32):93–97. (In Russ.).

36. Pokrovskaya O. D., Samuilov V. M. International logistics of the Trans-Siberian Railway: using the transit potential of Russia. *Innovative transport*. 2016;(21):3–7. (In Russ.).
37. Titova T. S., Pokrovskaya O. D. Interdisciplinary position of the theory of terminalistics. *Proceedings of the Petersburg State Transport University*. 2018;15(2):248–260. (In Russ.).
38. Pserovskaya E. D., Kim A. S., Kuzmina O. A. Improving the efficiency of services for accelerated delivery of goods in the direction of the Far East. *Transport of the Urals*. 2019;(61):32–37. (In Russ.).
39. Turanov Kh. T., Pserovskaya E. D. Calculation of the longitudinal shift of a cylindrical load and effort in the fastening elements with a variation in the number of fasteners. *Transport of the Urals*. 2013;(38):16–23. (In Russ.).
40. GOST 33330–2015. Reinforced concrete sleepers for 1520 mm gauge railways. General technical conditions. M.: Standartinform; 2016. 31 p. (In Russ.).

Информация об авторах

С. А. Косенко – профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

Д. В. Величко – доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

С. В. Богданович – доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

С. С. Хасенов – профессор кафедры «Магистральная инженерия» Академии логистики и транспорта, доктор технических наук.

И. К. Соколовский – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

S. A. Kosenko – Professor of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

D. V. Velichko – Associate Professor of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

S. V. Bogdanovich – Associate Professor of the Operational Operations Management Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

S. S. Khasenov – Professor of the Magistral Engineering Department, Academy of Logistics and Transport, Doctor of Engineering.

I. K. Sokolovskiy – Post-graduate Student of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 20.02.2022; одобрена после рецензирования 24.03.2022; принята к публикации 05.04.2022.

The article was submitted 20.02.2022; approved after reviewing 24.03.2022; accepted for publication 05.04.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 691.4+666.7
doi 10.52170/1815-9265_2022_61_77

Экологическая оценка утилизации осадка бытовых сточных вод в виде золы при производстве строительной керамики

Сергей Александрович Шахов

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, sashakhov@mail.ru

Аннотация. По результатам анализа вещественного состава золы, полученной при сжигании осадка бытовых сточных вод (ОБСВ), установлено, что такой осадок относится к группе легкоплавкого алюмосиликатного сырья и может быть использован в качестве компонента шихты при получении строительной керамики. Сопоставительный анализ характеристик золы ОБСВ с характеристиками золы ТЭС и суглинка показал, что по коэффициенту фильности и истинной плотности зола ОБСВ существенно отличается от золы ТЭС. При этом по оксидному составу и температуре начала плавления зола ОБСВ гораздо ближе к суглинку, чем к золе ТЭС, что указывает на ее большее химическое сродство с глинистым сырьем, основанное на их коллоидно-химическом происхождении. Посредством эколого-гигиенической оценки определен показатель степени опасности золы ОБСВ ($K = 62,47$), соответствующий IV классу опасности ($10 < K < 10^2$), что позволяет использовать ее в качестве сырья в производстве строительных керамических материалов при наличии паспорта отходов. При этом результаты сравнительной оценки показывают, что технология производства кирпича с использованием золы от сжигания ОБСВ не приводит к ухудшению экологической ситуации по сравнению с существующей технологией производства керамики с использованием золы ТЭС.

Ключевые слова: осадок, зола, состав, керамика, экология

Для цитирования: Шахов С. А. Экологическая оценка утилизации осадка бытовых сточных вод в виде золы при производстве строительной керамики // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 77–85. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_77.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Environmental assessment of the domestic sewage sludge disposal in the form of ash when producing building ceramics

Sergey A. Shakhov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, sashakhov@mail.ru

Abstract. Based on the analysis results of the ash material composition obtained from the combustion of domestic sewage sludge, it was found that such sludge belongs to the group of fusible alumina silicate raw materials and can be used as a charge component in the production of building ceramics. A comparative analysis of the characteristics of the ash of the ash of the ash of the thermal power plant and loam showed that, in terms of the coefficient of philosity and the true density, the ash of the ash of the ash of the thermal power plant differs significantly from the ashes of the thermal power plant. At the same time, in terms of oxide composition and melting point, the ash of SBSW is much closer to loam than to ash from thermal power plants, which indicates its greater chemical affinity with clay raw materials, based on their colloidal chemical origin. By means of an environmental and hygienic assessment, the indicator of the degree of danger of ash BSV ($K = 62.47$) corresponding to the IV hazard class ($10 < K < 10^2$) was determined, which allows it to be used as a raw material in the production of building ceramic materials in the presence of a waste certificate. At the same time, the results of a comparative assessment show that the technology for the production of bricks using ash from the combustion of WWTP does not lead to deterioration in the environmental situation compared to the existing technology for the production of ceramics using ashes from a thermal power plant.

Keywords: sediment, ash, composition, ceramics, ecology

For citation: Shakhov S. A. Environmental assessment of the domestic sewage sludge disposal in the form of ash when producing building ceramics. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):77–85. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_77.

Введение

На очистных сооружениях в крупных городах Западно-Сибирского региона ежегодно образуется более 2 млн м³ трудно поддающихся обезвоживанию осадков, которые представляют собой смесь бытовых и промышленных стоков, содержащих находящиеся в различном дисперсном состоянии загрязнения органического и неорганического характера, в том числе и токсичные вещества (тяжелые металлы и патогенные виды микрофлоры). В настоящее время повсеместно используемым в России способом утилизации таких осадков является захоронение на специальных участках (картах депонирования), которые занимают большие площади земли. При этом постоянно растущие объемы накапливаемых осадков требуют ежегодного выделения новых площадей под складирование, что приводит к неэффективному использованию городской земли. Кроме того, выделение биогаза и загрязнение подземных вод в процессе депонирования осадка – проблемы, не имеющие простого решения. Поэтому утилизация депонированного осадка является серьезной экологической проблемой [1–5].

Одним из возможных вариантов утилизации осадков бытовых сточных вод (ОБСВ) является их использование в качестве компонента шихты при получении строительных материалов [6–9]. Этот способ утилизации, предусматривающий переработку путем сжигания ОБСВ в золу, позволяет использовать технологический потенциал осадков и одновременно максимально снизить возможное отрицательное воздействие на окружающую среду. В то же время введение в состав шихты золы, полученной при сжигании ОБСВ, снижает усадку при сушке изделий, способствует интенсивному формированию кристаллической структуры керамики, а также приводит в процессе обжига к интенсивному образованию расплава, связывающего оксиды магния и кальция в алюмосиликаты [10–12]. Расплавы, равномерно распределяясь на границах зерен, растворяет кремнезем и препятствует процессу кристобалитизации последнего, что обуславливает образование плотной структуры черепка и, как следствие, повышенную прочность и морозостойкость изделий. Микроэлементы,

представленные в золе ОБСВ, выступают в качестве гетерогенных кристаллизаторов расплава [13]. Отмечается комплексное улучшение свойств строительных керамических материалов: повышение пластичности шихт, рост прочности, морозостойкости, а также снижение водопоглощения черепка [14].

Интенсивное спекание золы ОБСВ, сопровождающееся повышением плотности черепка, происходит в интервале температур 1 050–1 100 °С. После обжига образцы золы ОБСВ в среднем достигали максимальной плотности 2,25 кг/м³. Расхождение в достигаемых максимальных плотностях довольно низкое (от 2,09 до 2,36 кг/м³, коэффициент вариации 4,7 %), хотя, предположительно, для температур начала уплотнения характерна гораздо более высокая вариабельность. Рост плотности, по-видимому, начинается при $t = 900 \dots 1\,150$ °С, а оптимальные условия, т. е. точка пиковой плотности, варьируются от 1 050 до 1 200 °С [15].

Водопоглощение образцов с содержанием золы ОБСВ, равным 50 %, которые получены в процессе обжига при $t = 1\,000$ °С, составляло порядка 20 %, но снижалось (до 12–15 %) при увеличении температуры обжига до 1 100 °С. В образцах с содержанием золы ОБСВ, равным 50 %, которые модифицированы добавкой нанокремнезема, наблюдалось снижение водопоглощения на 1 % при $t = 1\,000$ °С и на 2–2,5 % при $t = 1\,100$ °С. При увеличении процентного содержания золы ОБСВ с 20 до 50 % предел прочности на изгиб образцов, обожженных при $t = 1\,100$ °С, снизился с 22 до 18 МПа (при $t = 1\,000$ °С предел прочности на изгиб находился в интервале 10–15 МПа) [16].

Осадки сточных вод и золы после их сжигания обогащены микроэлементами и тяжелыми металлами, которые могут негативно влиять на человека и среду его обитания [17]. В этой связи при использовании золы ОБСВ в составе шихты важнейшим вопросом является обеспечение соответствия готовых изделий заданным токсикологическим показателям, а также минимизация негативного влияния данных отходов на окружающую среду. Однако в настоящее время недостаточно исследований, результаты которых свидетельствуют об от-

сутствии экологических ограничений на применение осадков сточных вод в производстве керамического кирпича.

Цель работы: экологическая оценка возможности использования золы от сжигания осадка бытовых сточных вод в качестве сырья при производстве зологлиняной строительной керамики.

Материалы и методы исследования

Осадок бытовых сточных вод был отобран в МУП «Горводоканал» г. Новосибирска с карты депонирования № 8.

Золу получали путем сжигания осадка в камерной печи при $t = 800$ °С. Керамические образцы из зологлиняной шихты (50 % зола ОБСВ, 50 % суглинок Каменского месторождения) изготавливались методом пластического формования с последующей сушкой и обжигом на воздухе при $t = 950 \dots 1100$ °С.

Химический состав золы проводили по стандартным методикам, рекомендованным ГОСТ 2642.3–2014, ГОСТ 2642.4–2016, ГОСТ 2642.5–2016, ГОСТ 2642.7–2017, ГОСТ 2642.8–2017, ГОСТ 19609.5–89.

Для определения химического состава органической части осадков бытовых сточных вод использовали стандартные методики по ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98.

Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре Bruker D8 Advance с использованием Cu-K_α излучения. Для идентификации полученных дифрактограмм использовалась база данных PDF2 с оболочкой Search-Match.

Расчет класса опасности проводился с использованием методики и алгоритма, изложенных в [18], и был выполнен на основании результатов химического анализа водных вытяжек золы на содержание водорастворимых соединений металлов в соответствии с ПНД Ф 14.1:2.4.167–2000, ПНД Ф 14.1:2.4.183–02, М 01-41–2006 (изд. 2011 г.), ПНД Ф 14.1:2.4.188–02 (изд. 2011 г.), ПНД Ф 14.1:2.4.257–10, ПНД Ф 14.1:2.253–09 (изд. 2013 г.), ПНД Ф 14.1:2.4.167–2000.

Результаты и их обсуждение

Анализ вещественного состава показал, что в осадках доминирует оксид кремния, сравнительно много оксидов алюминия, железа, магния и кальция (табл. 1). В минеральной части осадков обнаружено также наличие других элементов (более 20). Органическая часть в осадке представлена белками, углеводами и жирами и составляет до 45 % массы (табл. 2).

Зола от сжигания осадка сточных вод характеризуется большой удельной поверхностью, равной $14\,173 \text{ см}^2/\text{г}$, и насыпной плотностью золы, равной $0,64 \text{ г}/\text{см}^3$ (рис. 1).

Таблица 1

Химический состав золы ОБСВ, мас. %

MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	Cu	Zn	O
1,9	10,6	53,9	6,1	3,1	6,2	6,3	0,2	7,5	0,12	0,3	47,0

Таблица 2

Элементный состав органической части осадка бытовых сточных вод
(в пересчете на сухое вещество), мас. %

C	H	N	S	P	O
35,0–40,0	4,6–4,9	1,5–2,1	0,6	0,6	16,0

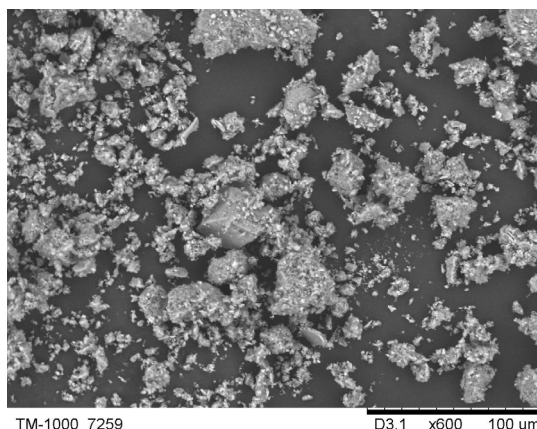


Рис. 1. Микрофотография частиц осадка водоочистки

Минеральный состав золы ОБСВ зависит от температуры ее обжига. Результаты рентгенофазового анализа золы (рис. 2), прошедшей термическую обработку при разных температурах, показывают, что в ее составе преобладает кварц и кальцит.

Анализ содержания водорастворимых солей в золе после сжигания ОБСВ, выполненный методом капиллярного электрофореза,

свидетельствует, что в водных вытяжках преобладают катионы Ca^{2+} и Na^{+} (табл. 3).

Сопоставительный анализ характеристик золы ОБСВ с характеристиками золы ТЭС и суглинка Каменского месторождения (Новосибирская область) показал, что коэффициенту фильности и истинной плотности (табл. 4), содержанию тяжелых металлов (табл. 5) и ключевых оксидов (табл. 6), температуре плавления и

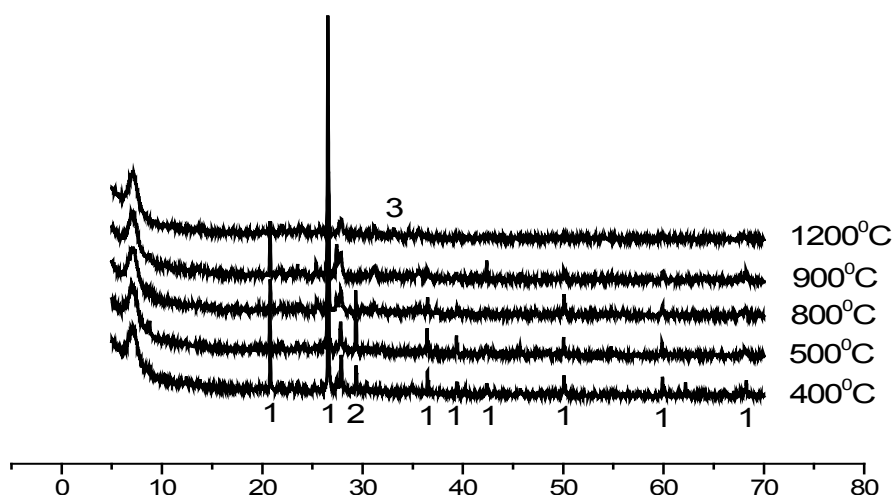


Рис. 2. Рентгенограммы золы ОБСВ:
1 – кварц; 2 – кальцит; 3 – гематит

Таблица 3

Содержание водорастворимых солей в золе, мг/кг

Ионы	Концентрация	
	без УЗ-обработки	после 10 мин УЗ-обработки
NH_4^+	–	0,260
K^+	6,442	9,579
Na^+	14,540	1,071
Mg^{2+}	–	2,639
Ca^{2+}	100,900	157,800

Таблица 4

Физические свойства частиц зол ОБСВ, ТЭС и суглинка

Свойство	Зола ТЭС	Зола ОБСВ	Суглинок
Истинная плотность частиц, г/см ³	1,99–2,12	1,89	2,800
Удельная поверхность, см ² /г	3 200–5 100	7 180	3 073
Коэффициент фильности частиц	1,69	2,91	1,76

Таблица 5

Содержание тяжелых металлов в золах ОБСВ, ТЭС и суглинке, мг/кг

Зола/суглинок	Cd	Cr	Co	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Зола ОБСВ	11,60	55,70	21,00	259,00	0,01	2 140,00	21,90	69,90	644,00
Зола ТЭС [19]	0,20	9,30	12,79	18,50	0,04	411,80	37,50	22,40	63,00
Суглинок	1,13	20,50	–	17,50	–	83,00	26,90	15,20	32,60

Таблица 6

Содержание оксидов в золах ОБСВ, ТЭС и суглинке, мас. %

Зола/суглинок	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
Зола ТЭС [20]	24,20–27,00	6,70–7,50	13,80–20,70	38,00–44,10	4,10–5,50
Зола ОБСВ	53,90	10,60	7,50	6,20	1,90
Суглинок	61,00	12,54	4,03	5,67	1,89

Таблица 7

Температуры плавления и интервалы размягчения зол ОБСВ, ТЭС и суглинок

Показатель	Золы ТЭС [21]	Зола ОБСВ	Суглинок
Температура начала плавления, °С	1 100–1430	970	940
Интервал размягчения, °С	90–175	180	160

интервалу размягчения (табл. 7), гранулометрическому составу (рис. 3) зола ОБСВ существенно отличается от золы ТЭС. При этом по оксидному составу и температуре начала плавления зола ОБСВ гораздо ближе к суглинку, чем к золе ТЭС, что указывает на ее большее химическое сродство с глинистым сырьем, основанное на их коллоидно-химическом происхождении.

В целом, анализ полученных данных позволяет отнести золу ОБСВ к группе легкоплавкого алюмосиликатного сырья, что свидетельствует о возможности использования такой золы в качестве сырья при производстве зологлиняной строительной керамики. Однако критически важным моментом для применения осадка в многотоннажном произ-

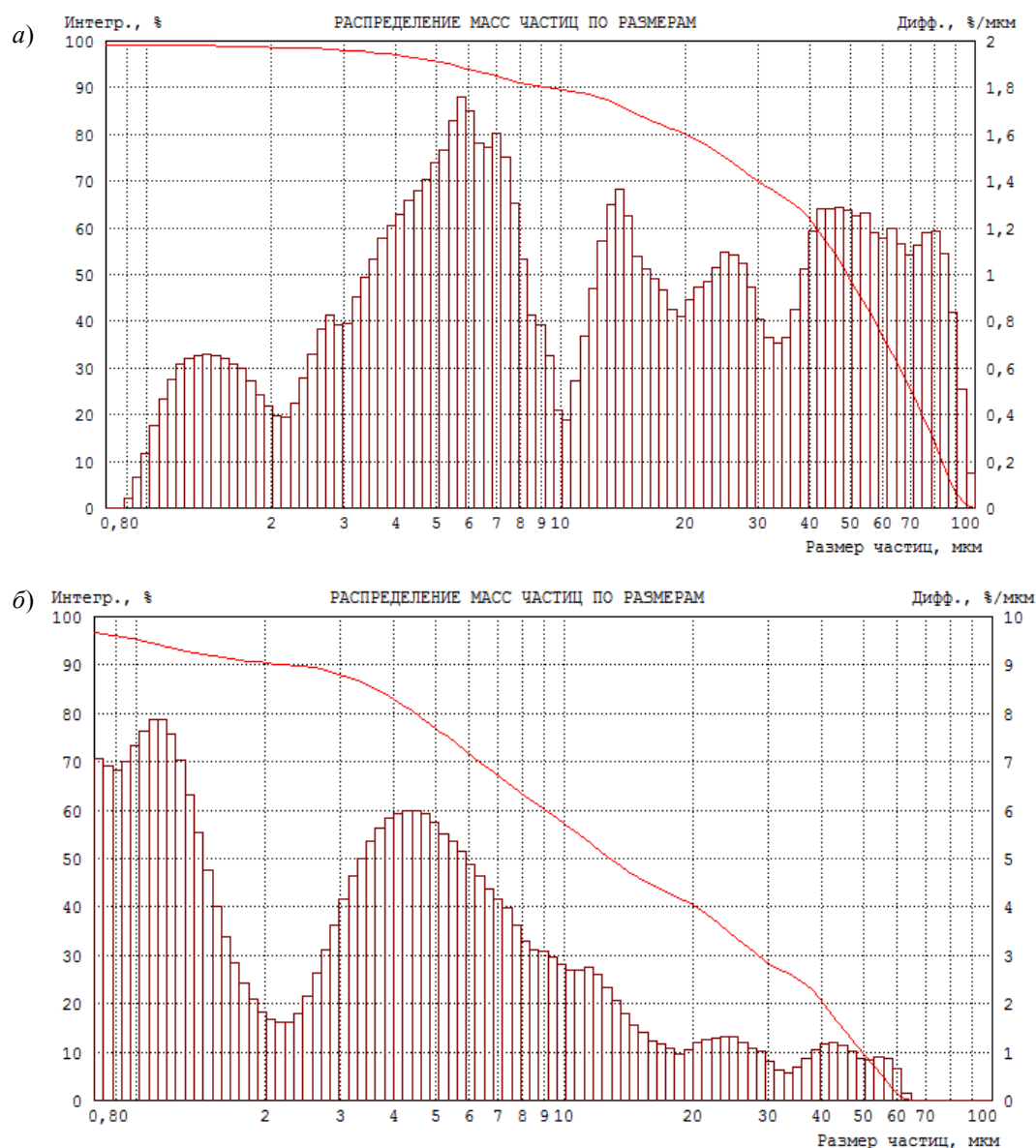


Рис. 3. Распределение частиц по размерам (начало):
а – зола ТЭС-3; б – зола ОБСВ

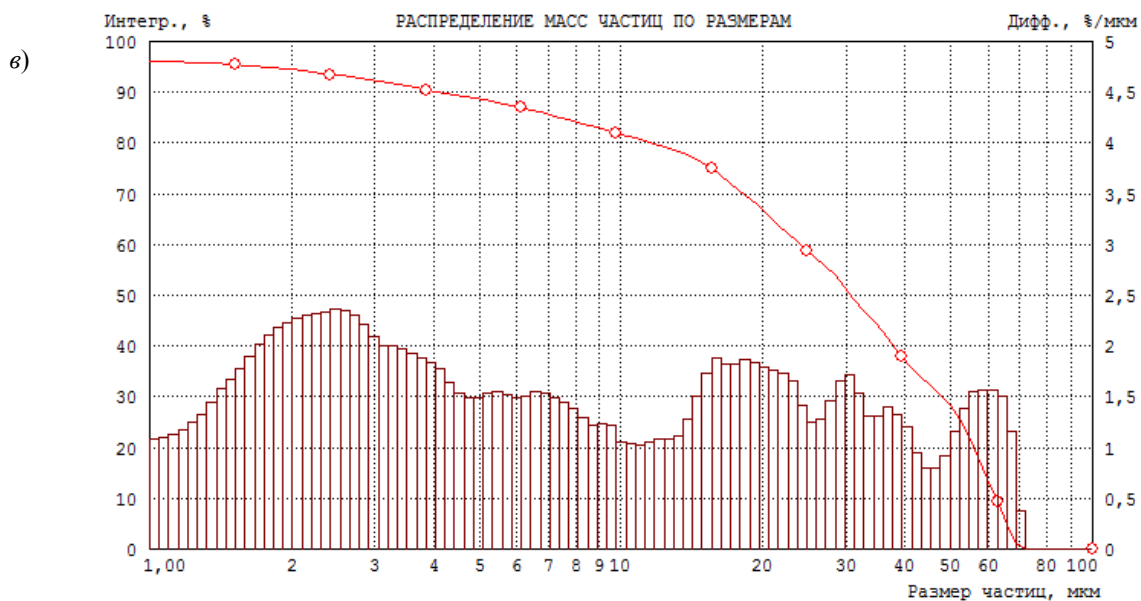


Рис. 3. Распределение частиц по размерам (окончание):
в – суглинок

водстве строительной керамики является обеспечение экологической безопасности готовой продукции. Расчет класса опасности золы производился для основных компонентов (K_1) и водорастворимых соединений тяжелых металлов (K_2). Органические компоненты в составе золы ОБСВ практически отсутствуют и в расчете не учитывались. В расчете в качестве основных компонентов золы были использованы данные из табл. 6, поскольку относительный параметр опасности компонента (X_i) для отдельных оксидов выше, чем

для минеральных фаз. Для расчета класса опасности золы ОБСВ были использованы данные, представленные в табл. 5. Результаты представлены в табл. 8 и 9.

Показатель степени опасности золы ОБСВ ($K = 62,47$), рассчитанный как сумма коэффициентов степени опасности по основным компонентам ($K_1 = 61,66$) и по водорастворимым соединениям металлов ($K_2 = 0,8056$), соответствует IV классу опасности ($10 < K < 10^2$). Сырье с таким показателем может применяться для производства строительных керамических ма-

Таблица 8

Результаты оценки класса опасности золы ОБСВ по основным компонентам

Показатель опасности	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO
Концентрация компонента в отходе C_{i_2} , %	10,6	7,5	53,9	6,2	1,9
Концентрация компонента в отходе C_{i_2} , мг/кг	106 000	75 000	539 000	62 000	19 000
Относительный параметр опасности компонента X_i	3,27	3,33	3,50	3,70	3,25
Коэффициент степени опасности компонента K_i	26,73	12,13	17,91	0,89	4,00
Суммарный показатель K_1	61,66				

Таблица 9

Результаты оценки класса опасности ОБСВ по водорастворимым соединениям металлов

Показатель опасности	Cd	Cr	Co	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Концентрация компонента в отходе C_{i_2} , %	0,001160	0,005570	0,002100	0,025900	0,000001	0,214000	0,002190	0,006990	0,064400
Концентрация компонента в отходе C_{i_2} , мг/кг	11,60	55,70	21,00	259,00	0,01	2 140,00	21,90	69,90	644,00
Относительный параметр опасности компонента X_i	2,083	2,857	2,500	2,786	1,333	3,154	2,714	2,615	2,786
Коэффициент степени опасности компонента K_i	0,04200	0,01900	0,02100	0,10800	0,00059	0,28700	0,011300	0,04900	0,26800
Суммарный показатель K_2	0,8056								

**Геоэкологическая оценка технологии производства кирпича на основе суглинки
в композиции с золой**

Негативный эффект	Технология с использованием золы ТЭС	Технология с использованием золы ОБСВ
Нарушение ландшафта при добыче глин и складировании золы	2	1
Нарушение почвы	1	1
Площади карьеров и карт депонирования	2	2
Вредные выбросы (в том числе парниковый эффект)	4	3
Расход энергии	3	4
Пыление	2	3
Отходы в виде брака	1	1
Выбросы в атмосферу	2	2
Шум	2	2
Отходы при транспортировке и использовании	2	2
<i>Итого</i>	21	21

Примечание. Шкала экспертной оценки: 1 – незначительное влияние; 2 – среднее; 3 – высокое; 4 – очень высокое.

териалов при наличии паспорта отходов [18]. Значения удельной активности естественных радионуклидов (221–237 БК/кг) в керамических образцах не превышают допустимых для I класса. Таким образом, результаты эколого-гигиенической оценки позволяют заключить, что керамические изделия, полученные с использованием золы от сжигания ОБСВ, могут быть использованы для строительства жилых и общественных зданий без ограничения.

В табл. 10 приведены результаты экспертной геоэкологической оценки технологии производства кирпича из суглинки в композиции с золой в сравнении с традиционной технологией строительной керамики с использованием золы ТЭС. Оценка была выполнена с учетом анализа жизненного цикла и негативных воздействий всей совокупности факторов на окружающую среду.

Результаты сравнительной оценки показывают, что технология производства кирпича с использованием золы от сжигания ОБСВ не приводит к ухудшению экологической ситуа-

ции по сравнению с существующей технологией производства керамики с использованием золы ТЭС. Поэтому использование золы от сжигания ОБСВ в качестве сырья возможно на заводах по производству керамического кирпича.

Выводы

1. В Западной Сибири, наряду с применяемым для получения строительной керамики глинистым сырьем, имеются практически не используемые в настоящее время техногенные отходы, в частности осадки бытовых сточных вод. Последние относятся к группе легкоплавкого алюмосиликатного сырья, что позволяет использовать золу от сжигания ОБСВ в качестве компонента шихты при получении строительной керамики.

2. Зола от сжигания осадка бытовых сточных вод соответствует IV классу опасности и при наличии паспорта отходов может быть использована в производстве строительной керамики для сооружения жилых и общественных зданий без ограничения.

Список источников

1. Евилевич А. З., Евилевич М. А. Утилизация осадков сточных вод. Л.: Стройиздат, 1988. 248 с.
2. Swierczek L., Cieslik B. M., Konieczka P. The potential of raw sewage sludge in construction industry: A review // Journal of Cleaner Production. 2018. No. 200. P. 342–356.
3. Вайсфельд Б. А., Кремер А. И. О направлениях обработки и утилизации отходов, образующихся на городских очистных сооружениях // ВэйстТэк – 2005: 4-й Международный конгресс по управлению отходами: сборник докладов (Москва, 31 мая – 3 июня 2005 г.). М., 2005. С. 347–348.
4. Водоотведение и очистка сточных вод / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, Ю. М. Ласков, В. И. Калицун. М.: Стройиздат, 1996. 591 с.
5. Храменков С. В., Борткевич С. В. Гидротехнические сооружения депонирования осадков // Водоснабжение и санитарная техника. 2002. № 12. С. 34–37.

6. Sludge hydrolysis boosts throughput in sewage treatment plant // *Chem. Eng. (USA)*. 1998. Vol. 105, no. 10. P. 19.
7. Бернадинер М. Н., Жижин В. В., Иванов В. В. Термическое обезвреживание промышленных органических отходов // *Экология и промышленность России*. 2000. № 4. С. 17–21.
8. Low-cost power from sewage sludge formulation // *Zement-Kalk-Gips int.* 1999. Vol. 52, no. 11. P. A10.
9. Morier F. Bauchot. Avert le Grand, l'osmose inverse met en synergil le traitement des lixiviats et l'usine d'incineration // *Eau, ind., nuisances*. 1998. No. 217. P. 41–43.
10. Wirling J., Lang H.-J. Abgasreinigung bei der Klärschlamm-Mitverbrennung in einen Industriekraftwerk // *Korrespond. Abwasser*. 1999. Vol. 46, no. 1. S. 77–82.
11. Дуденкова Г. Я., Левит И. М. Особенности производства керамического кирпича с добавкой золы от сжигания осадков сточных вод // *Строительные материалы*. 2003. № 2. С. 20–21.
12. Шахов С. А., Ключникова Н. С., Кожемяченко А. С. Состав и технологические свойства осадков водоотведения и зол, образующихся при их сжигании // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2014. № 11 (671). С. 103–113.
13. Коренькова Е. А., Чумаченко Н. Г., Безгина Л. П. Осадки бытовых сточных вод в производстве обжиговых материалов // *Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика : материалы 61-й региональной научно-технической конференции. Часть 1 / Самарская государственная архитектурно-строительная академия. Самара, 2004. С. 189–190.*
14. Kopp M., Kahlke J., Schulte W. Mitverbrennung von Klärschlämmen in Kohleferenerungsanlagen // *Allg. Pap. – Rdsch*. 1995. Vol. 119, no. 14. S. 297–299.
15. Lin K. L. Mineralogy and microstructures of sintered sewage sludge ash as lightweight aggregates // *J. Ind. Eng. Chem.* 2006. No. 12 (3). P. 425–429.
16. Chena L., Lin D. F. Applications of sewage sludge ash and nano-SiO₂ to manufacture tile as construction material *Construction and Building Materials*. 2009. No. 23. P. 3312–3320.
17. Cusidó Joan A., Cremades Lázaro V. Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: Leachability and toxicity studies // *Waste Management*. 2012. No. 32. P. 1202–1208.
18. Методическое пособие по применению «Критериев отнесения опасных отходов к классам опасности для окружающей природной среды» / ФГУ «ЦЭКА». М., 2003. 38 с.
19. Лошкарева А. В., Губонина З. И. Экологические проблемы при хранении золоотходов от сжигания твердого топлива на тепловых электростанциях // *Науковедение : интернет-журнал*. 2014. № 6. С. 1–16.
20. Путилин Е. И., Цветков В. С. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог: Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. М. : СоюзДорНИИ, 2003. 58 с.
21. Сайбулатов С. Ж. Ресурсосберегающая технология керамического кирпича на основе зол ТЭС. М. : Стройиздат, 1990. 248 с.

References

1. Evilevich A. Z., Evilevich M. A. Utilization of sewage sludge. L.: Stroyizdat; 1988. 248 p. (In Russ.).
2. Swierczek, L., Cieslik B. M., Konieczka P. The potential of raw sewage sludge in construction industry: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2018;(200):342–356.
3. Weisfeld B. A., Kremer A. I. On the directions of processing and disposal of waste generated at urban wastewater treatment plants. *WasteTech – 2005: 4th International Waste Management Congress. Collection of reports (Moscow, May 31 – June 3, 2005)*. М., 2005. P. 347–348. (In Russ.).
4. Yakovlev S. V., Karelin Ya. A., Laskov Yu. M., Kalitsun V. I. Water disposal and wastewater treatment. М.: Stroyizdat; 1996. 591 p.
5. Khramenkov S. V., Bortkevich S. V. Hydrotechnical structures for sediment deposition. *Water supply and sanitary equipment*. 2002;(12):34–37. (In Russ.).
6. Sludge hydrolysis boosts throughput in sewage treatment plant. *Chem. Eng. (USA)*. 1998;105(10):19.
7. Bernadiner M. N., Zhizhin V. V., Ivanov V. V. Thermal neutralization of industrial organic waste. *Ecology and industry of Russia*. 2000;(4):17–21. (In Russ.).
8. Low-cost power from sewage sludge formulation. *Zement-Kalk-Gips int.* 1999;52(11):A10.
9. Morier F. Bauchot. Avert le Grand, l'osmose inverse met en synergil le traitement des lixiviats et l'usine d'incineration. *Eau, ind., nuisances*. 1998;(217):41–43.
10. Wirling J., Lang H.-J. Abgasreinigung bei der Klärschlamm-Mitverbrennung in einen Industriekraftwerk. *Korrespond. Abwasser*. 1999;46(1):77–82.

11. Dudenkova G. Ya., Levit I. M. Features of the production of ceramic bricks with the addition of ash from the combustion of sewage sludge. *Construction materials*. 2003;2:20–21. (In Russ.).
12. Shakhov S. A., Klyuchnikova N. S., Kozhemyachenko A. S. Composition and technological properties of sewage sludge and ashes formed during their combustion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Construction*. 2014;671:103–113. (In Russ.).
13. Korenkova E. A., Chumachenko N. G., Bezgina L. P. Domestic wastewater sludge in the production of roasting materials. *Actual problems in construction and architecture. Education. Spider. Practice: Proceedings of the 61st region. scientific and technical conf. Part 1*. Samara State Academy of Architecture, Building and Civil Engineering. Samara; 2004. P. 189–190. (In Russ.).
14. Kopp M., Kahlke J., Schulte W. Mitverbrennung von Klarschlamm in Kohlefeuerungsanlagen. *Allg. Pap. Rdsch.* 1995;119(14):297–299.
15. Lin K. L. Mineralogy and microstructures of sintered sewage sludge ash as lightweight aggregates. *J. Ind. Eng. Chem.* 2006;12(3):425–9.
16. Chena L., Lin D. F. Applications of sewage sludge ash and nano-SiO₂ to manufacture tile as construction material. *Construction and Building Materials*. 2009;(23):3312–3320.
17. Cusidó Joan A., Cremades Lázaro V. Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: Leachability and toxicity studies. *Waste Management*. 2012;(32):1202–1208.
18. Guidelines for the application of the “Criteria for classifying hazardous wastes as hazard classes for the environment”. FGU “CEKA”, M.; 2003. 38 p. (In Russ.).
19. Loshkareva A. V., Gubonina Z. I. Environmental problems in the storage of ash waste from the combustion of solid fuels at thermal power plants. *Naukovedenie: Internet journal*. 2014;(6):1–16. (In Russ.).
20. Putilin E. I., Tsvetkov V. S. The use of fly ash and ash and slag mixtures in the construction of roads: a review. inform. fatherly and abroad. experience in the use of waste from the combustion of solid fuels at thermal power plants. M.: SoyuzDorNII; 2003. 58 p. (In Russ.).
21. Saibulatov S. Zh. Resource-saving technology of ceramic bricks based on the ashes of thermal power plants. M.: Stroyizdat; 1990. 248 p. (In Russ.).

Информация об авторе

С. А. Шахов – профессор кафедры «Гидравлика, водоснабжение, химия» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, доцент.

Information about the author

S. A. Shakhov – Professor of the Hydraulics, Water Supply, Chemistry Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

Статья поступила в редакцию 07.03.2022; одобрена после рецензирования 22.03.2022; принята к публикации 05.04.2022.

The article was submitted 07.03.2022; approved after reviewing 22.03.2022; accepted for publication 05.04.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 625.7:004.9
doi 10.52170/1815-9265_2022_61_86

Структурно-модульная параметризация дорожно-строительного потока в системе информационного моделирования

Татьяна Викторовна Боброва

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия, bobrova.tv@gmail.com

Аннотация. Анализ реализации сложных строительных проектов в России и за рубежом с использованием BIM-технологий выявил важность оптимизации проектных решений на стадии календарного планирования. Неадекватное отражение в процессе моделирования реальных условий линейного дорожного строительства приводит к нарушению сроков ввода объектов в эксплуатацию, снижению эффективности организационно-технологических решений. Цель данного исследования: обеспечить адекватность модели и оптимизацию сроков строительства автомобильных дорог непосредственно в процессе информационного моделирования комплексного потока. Для решения проблемы использована теория структурно-параметрического синтеза потоковых систем. Комплексный дорожно-строительный поток рассмотрен на двух уровнях: микроуровень – параметры отдельных звеньев специализированных потоков; макроуровень – параметры взаимодействия специализированных потоков в качестве самостоятельных объектов моделирования между собой. Структурная декомпозиция объекта представлена в виде графа с вертикальным разделением на третьем уровне на относительно однородные участки с выделением двух видов модулей – линейных и сосредоточенных проектно-технологических модулей (ЛПТМ и СПТМ). Реализована концепция, основанная на конвергенции ранее созданных имитационных моделей оптимизации комплексного дорожно-строительного потока и информационного моделирования, с переходом модельного времени с постоянным шагом Δt к модельно-событийному. Представлена математическая постановка задачи, определены ограничения и целевая функция. В качестве демонстрационного примера представлен расчет оптимального календарного графика строительства дороги при заданных ресурсах в программе MS Project. Инструментарий программы позволил учесть изменение режима работы предприятия в течение года, особенности перехода к зимним технологиям. График Ганта, рассчитанный с использованием данного метода, трансформирован в линейный график в осях «продолжительность – протяженность».

Ключевые слова: дорожное строительство, информационное моделирование, структурная декомпозиция объекта, параметрический синтез, потоковая система, MS Project

Для цитирования: Боброва Т. В. Структурно-модульная параметризация дорожно-строительного потока в системе информационного моделирования // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 86–95. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_86.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Structural modular parameterization of the road construction flow in the information modeling system

Tatyana V. Bobrova

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia, bobrova.tv@gmail.com

Abstract. The analysis of the implementation of complex construction projects in Russia and abroad using BIM technologies revealed the importance of optimizing design solutions at the scheduling stage. Inadequate reflection in the process of modeling the real conditions of linear road construction leads to a violation of the terms of facilities' commissioning and reduces in the efficiency of organizational and technological solutions. The purpose of this research is to provide the adequacy of the model and optimization of the highway construction timing, directly in the process of information modeling of a complex flow. To solve the problem, the theory of structural-parametric synthesis of flow systems has been used. The complex road construction flow is considered on two levels: micro level for parameters of separate links of specialized flows; macro level for parameters of interaction of specialized flows as independent objects of modeling between them. The structural decomposition of the object is presented in the form of a graph with vertical division at the 3rd level into relatively homogeneous areas with the allocation of

two types of modules: linear design and technological modules (LDTM); concentrated design and technological modules (CDTM). The concept is implemented based on the convergence of previously created simulation models for the optimization of complex road construction flow and information modeling, with the transition of model time from " Δt " to model-event. The mathematical statement of the problem is presented, the constraints and the objective function are determined. As a demonstration example, the calculation of the optimal calendar schedule for the construction of a road for given resources in the MS Project program is presented. The toolkit of the program made it possible to take into account the change in the operating mode of the enterprise during the year, the peculiarities of the transition to winter technologies. The Gantt chart, calculated using this method, has been transformed into a linear graph in the axis "duration – length".

Keywords: road construction, information modelling, structural decomposition of the object, parametric synthesis, flow system, MS Project

For citation: Bobrova T. V. Structural modular parameterization of the road construction flow in the information modeling system. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):86–95. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_86.

Введение

С появлением информационных технологий в строительной индустрии (BIM-технологий) проектирование поточных форм организации строительного производства как составной части жизненного цикла капитального сооружения претерпело существенные изменения. Многие исследователи, анализируя опыт использования цифровых технологий в нашей стране и за рубежом, отмечают влияние этих технологий на повышение устойчивости строительной отрасли, снижение затрат на все виды ресурсов, сокращение сроков строительства и потерь от ошибок [1–3].

Как отмечает ряд авторов [4–6], залогом успешной реализации сложных строительных проектов с использованием BIM-технологий является оптимизация проектных решений на стадии разработки календарного плана строительства. Его основная часть в большинстве компьютерных программ (Microsoft Project, Oracle Primavera, Project Spider и др.) оформляется первоначально в виде календарного графика Ганта при заданной декомпозиции задач проекта, их длительности и установленных ресурсных и фронтальных связей, затем автоматически пересчитывается в сетевой график.

Объекты линейной транспортной инфраструктуры имеют существенные особенности проектирования поточного строительства. Эта специфика отражена в научной и нормативной литературе [7–10] и связана с рядом факторов:

- подвижностью строительной площадки и производственных баз;
- неравномерным распределением объемов работ по длине сооружения;
- определяющим влиянием природных факторов на конструктивные и организационно-технологические решения;
- высокой материалоемкостью.

Сложность совместного учета множества факторов при разработке моделей линейных графиков часто приводит к их упрощению и неадекватному отражению реальных условий строительного производства. Следствием недостатков планирования является существенное превышение плановых сроков строительства, снижение эффективности организационно-технологических решений (ОТР). Построение календарных графиков с использованием цифровых технологий позволяет моделировать варианты ОТР, но не улучшает ситуацию с оптимизацией графиков из-за отсутствия четко сформулированного порядка действий и параметров информационного моделирования. Выполнение ряда итераций на интуитивном уровне для улучшения графика не дает гарантии получения оптимального решения.

Вопросы постановки задач и оптимизации параметров моделей линейно-протяженных объектов рассматривались в работах [11, 12]. Параллельно с оптимизацией структуры потоков значительная часть работ связана с оптимизацией ресурсного обеспечения линейного строительства [13–15]. В большинстве ранее предложенных методов оптимизация пространственно-временных параметров дорожного потока осуществляется на основе имитационного моделирования при изменении модельного времени с постоянным шагом Δt . Данный способ моделирования позволяет получить достаточно достоверные результаты, но требует значительных затрат времени на подготовку информации и ее интерпретацию для задач разного уровня: специализированный поток – комплексный поток – дорожная программа. Эти методы не обеспечивают наглядность процесса моделирования и тре-

буют нового осмысления и адаптации к современным технологиям.

Цель данного исследования: повысить уровень адекватности модели, обеспечить оптимизацию сроков строительства линейных сооружений, в частности автомобильных дорог, непосредственно в процессе автоматического информационного моделирования комплексного потока, определив в качестве исходных данных для моделирования технически обоснованные структуры и параметры проекта.

Материалы и методы исследования

Для достижения данной цели рассмотрена концепция, основанная на конвергенции ранее созданных имитационных моделей оптимизации комплексного дорожно-строительного потока и теории структурно-параметрического синтеза потоковых систем. Авторами работ [16–18] предложен универсальный подход к моделированию потоков, не зависящий от их предметной принадлежности. Структурно-параметрический синтез реализован для компьютерного моделирования транспортных и информационных потоков, логистики. В качестве особенности таких потоковых моделей автор [18] рассматривает проявление дуализма при функционировании систем. Это свойство проявляется в дискретности внутренних элементов потоковых структур (микроуровень) и непрерывности потока как объекта во внешней среде (макроуровень). Например, при компьютерном моделировании транспортных потоков на микроуровне оценивают параметры отдельных автомобилей в потоке, а для определения пропускной способности дорог транспортный поток представляется на макроуровне как целостный объект [19]. Применительно к строительному производству этот метод не рассматривался.

С позиций теории структурно-параметрического синтеза комплексный дорожно-строительный поток можно представить как систему на двух уровнях:

- микроуровень – параметры отдельных звеньев специализированных потоков (состав отрядов, количество машин, интенсивность выдачи законченной продукции по отдельным слоям);
- макроуровень – параметры взаимодействия потоков в качестве самостоятельных объектов моделирования между собой.

Структурно-параметрический синтез связан с подбором составов отрядов (внутренней структурой), параметрический – с характеристиками связей между потоками (внешняя структура).

Различие информационного и имитационного моделирования проявляется в подходе к отображению модельного времени. Чаще всего в компьютерных системах такого рода, в отличие от имитации по Δt , время интерпретируется как модельно-событийное или непрерывно-дискретное. Текущий момент модельного времени фиксируется от момента наступления первого события в календаре до момента завершения текущей работы.

Определим показатели, которые необходимо учесть в модели календарного планирования дорожно-строительного потока, чтобы обеспечить основные требования моделирования – оптимизацию модели и ее адекватность реальным условиям дорожного строительства.

Анализ особенностей дорожного строительства в разных регионах, особенно северных [8, 12, 15], позволяет сформулировать эти требования следующим образом:

- 1) при декомпозиции линейно-протяженного объекта необходимо предусмотреть формирование относительно однородных участков по видам и объемам работ [7, 8];
- 2) учесть изменения интенсивности специализированных отрядов и бригад, связанные с неравномерностью распределения объемов и способов работ по длине сооружения;
- 3) обеспечить условия сопряжения смежных специализированных потоков в комплексном потоке по фронту работ.

В качестве атрибутивной характеристики работ в моделях календарного планирования в строительстве принята их продолжительность при выполнении отдельных элементов сооружения. При этом предусматривается деление объекта на составляющие элементы с разным уровнем детализации (LOD). При строительстве автомобильных дорог основой структурной декомпозиции являются конструктивные элементы (земляное полотно, слои дорожной одежды, искусственные сооружения, обустройство дороги). Однако при календарном планировании существенную роль играет также вертикальное разделение дороги на

участки с относительно однородными объемами и видами работ (линейные проектно-технологические модули – ЛПТМ). Разделение на ЛПТМ рассматривается для каждого конструктивного элемента отдельно. Определенный тип ЛПТМ может повторяться по длине дороги в виде участков различной протяженности. Для земляного полотна такое деление характерно в силу геологических и топографических условий местности, особенно в сложных природных условиях.

Методы геоинформатики и таксономического анализа, предложенные в работах [7, 8], позволяют решать эти проблемы, разделяя проектируемое земляное полотно на характерные участки с параметрами, соответствующими определенным типам ЛПТМ. Для других элементов (слои основания, покрытия и т. д.) разделение на ЛПТМ может быть связано с изменением конструктивных или технологических решений по длине дороги, а также с различными условиями функционирования специализированных отрядов (например, связанными с транспортировкой материалов). При отсутствии существенных изменений характеристик конструктивных элементов или условий работ по длине дороги вертикальное деление можно не производить. Декомпозиция автомобильной дороги в общем случае отображается в виде графа (рис. 1). Кроме участков ЛПТМ на протяжении автомобильной дороги выделяют короткие участки для сосредоточенного выполнения работ (СПТМ). Эти участки с существенным изменением технологии и объемов работ не включаются в линейную модель. Однако при расчете линейной модели определяются сроки, ранее которых до подхода специализированных линейных

отрядов все работы на СПТМ должны быть завершены.

Длина общего фронта работ на каждом конструктивном элементе дороги L_j в общем случае совпадает с длиной объекта L_D и определяется соотношением

$$L_j = \sum_{p=1}^P l_{jp} + \sum_{r=1}^R l_{jr}, \quad (1)$$

где l_{jp} – протяженность p -го ЛПТМ на j -м конструктивном элементе при $p = 1, 2, \dots, P$, км; l_{jr} – протяженность сосредоточенных участков r -го типа на j -м конструктивном слое при $r = 1, 2, \dots, R$, км.

Наиболее распространенным вариантом имитации строительных процессов (микро-уровень) принято моделирование при назначенных исполнителях, т. е. определены составы линейных отрядов и их производительности. Как отмечено выше, работы на ЛПТМ могут существенно отличаться по технологическим операциям и темпам работ.

Длительность работы i -го отряда на p -м модуле j -го конструктивного слоя в единицах измерения, установленных в компьютерной программе для проекта, определяется по формуле

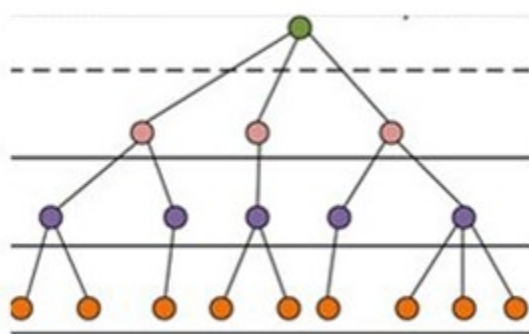
$$t_{ijp} = Q_{ijp} / M_{ijp}, \quad (2)$$

где Q_{ijp} – объем готовой продукции i -го отряда на p -м модуле j -го конструктивного слоя, нормативные ед. измерения вида работ; M_{ijp} – производительность i -го отряда на p -м модуле j -го конструктивного слоя, нормативные ед. изм. продукции / ед. изм. проектного времени.

Непрерывность работы i -го линейного отряда на группе ЛПТМ p -го типа на j -м конструктивном элементе определяется условием

$$t_{ijp}^{end} + \tau_{ijp,(p+1)}^{red} = t_{ij(p+1)}^{st}, \quad (3)$$

где t_{ijp}^{end} – время окончания работы i -го отряда на p -м модуле j -го конструктивного элемента,



1 уровень – объект в целом

2 уровень – конструктивные элементы

3 уровень – типы проектно-технологических модулей (ЛПТМ и СПТМ)

4 уровень – рассредоточенные участки с однотипными модульными характеристиками

Рис. 1. Представление декомпозиции автомобильной дороги в виде графа

ед. изм. проектного времени; $\tau_{ijp,(p+1)}^{red}$ – время передислокации i -го отряда с p -го на $(p+1)$ -й модуль j -го конструктивного элемента, ед. изм. проектного времени (в частных случаях время передислокации можно не учитывать); $t_{ij(p+1)}^{st}$ – время начала работы i -го отряда на $(p+1)$ -м модуле данного типа j -го конструктивного элемента, ед. проектного времени.

Длительность строительства j -го слоя определяется выражением

$$T_j = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P t_{ijp} + \sum_{p=1}^{P-1} \tau_{ijp,(p+1)}^{red}. \quad (4)$$

Средний темп выдачи продукции в виде законченного j -го конструктивного слоя рассчитывается по формуле

$$V_j^{aver} = L_j / T_j. \quad (5)$$

В календарных моделях информационного моделирования основными атрибутивными характеристиками приняты время и временные связи.

На макроуровне для конструктивных слоев введем новое обозначение. Множество элементов J (микроуровень) тождественно множеству N (макроуровень), т. е. $J \equiv N$ при $n = 1, 2, \dots, N$. Точка отсчета на макроуровне определяет начало строительства объекта D_c^{st} и совпадает с датой начала работы первого специализированного отряда на первом модуле (ЛПТМ) первого конструктивного слоя. Количество специализированных потоков в комплексном потоке соответствует количеству слоев дорожной конструкции N . Взаимодействие специализированных потоков на смежных слоях дорожной конструкции n и $(n+1)$ определяется организационными и технологическими факторами.

Организационные параметры формируются на микроуровне и зависят от состава специализированного отряда. К таким параметрам относятся:

t_n^{dep} – время развертывания специализированного потока на первом ЛПТМ ($p = 1$) n -го конструктивного элемента, дни;

t_n^{clot} – время свертывания специализированного потока на последнем ЛПТМ ($p = P$) n -го конструктивного элемента, дни;

$t_{n,(n+1)}^{tech}$ – нормативное время технологического перерыва между готовностью n -го конструктивного элемента к перекрытию $(n+1)$ -м элементом (слоем дорожной конструкции), дни;

t_{insur} – резерв времени на случай непредвиденных задержек в работе предшествующих потоков, 1–2 дня.

Тип временной связи между смежными потоками устанавливают исходя из среднего темпа (скорости) потоков на n -м и $(n+1)$ -м конструктивных элементах, определенного в системе «микроуровень» (формула (5)).

При соотношении скоростей $V_{n+1}^{aver} < V_n^{aver}$ (потоки расходящиеся) устанавливают связь между потоками «начало – начало» с положительным растяжением по времени:

$$D_{n+1}^{st} = D_n^{st} + (t_n^{dep} + t_{n,(n+1)}^{tech} + t_{insur}), \quad (6)$$

где D_n^{st} и D_{n+1}^{st} – сроки начала работ на n -м и $(n+1)$ -м слоях конструкции соответственно, ед. изм. проектного времени.

При соотношении скоростей $V_{n+1}^{aver} > V_n^{aver}$ (потоки сходящиеся) устанавливается связь между потоками «окончание – окончание» с положительным растяжением по времени:

$$D_{n+1}^{end} = D_n^{end} + \{t_n^{clot} + t_{n,(n+1)}^{tech} + t_{insur}\}, \quad (7)$$

где D_n^{end} и D_{n+1}^{end} – сроки окончания работ на n -м и $(n+1)$ -м слоях конструкции соответственно, ед. изм. проектного времени.

Начало работы специализированного отряда на $(n+1)$ -м слое D_{n+1}^{st} в этом случае определится по формуле

$$D_{n+1}^{st} = D_{n+1}^{end} - T_{n+1}. \quad (8)$$

Длительность работы потоков на каждом конструктивном слое T_n определена на макроуровне по формуле (4).

Завершение работы на последнем P -м модуле N -го слоя конструкции соответствует сроку завершения строительства объекта D_c^{end} , ед. изм. проектного времени.

Целевая функция модели F (продолжительность строительства) с учетом заданных ограничений имеет вид

$$F = D_c^{end} - D_c^{st} \rightarrow \min. \quad (9)$$

Продолжительность строительства дороги при заданных темпах работ и условиях будет оптимальной. При построении графика дорожно-строительного производства в виде линейной диаграммы Ганта в программах типа MS Project необходимо следующее:

1. Рассмотреть проектирование организации строительства дороги как комплекс взаимосвязанных подсистем: основного производства, подсобных и обслуживающих производств.

Сформировать обеспечивающие подсистемы: транспортировку, выпуск полуфабрикатов. Параметры работы этих подразделений должны быть увязаны с датами начала и окончания работ основного производства на ЛПТМ и обеспечивать в полной мере заданные темпы работ.

2. Учесть вероятность изменения режима работы строительных подразделений в течение года (с продленной летней сменой, переходом на пятидневную или шестидневную рабочую неделю, вахтовый метод и т. д.). Такой подход реализуется в моделях календарного планирования заданием специального календаря с ограничениями в определенные периоды каждого года. Для стыковки выполнения работ в комплексном дорожном потоке по периодам рекомендуется ввод длительности всех работ (задач) в часах. Программы календарного планирования осуществляют автоматический переход на другой режим работы по заданным срокам и выдают календарные дни выполнения работ по графику, учитывая длительность сменного рабочего времени в часах.

3. Предусмотреть изменение интенсивности и технологии строительства в зимний строительный сезон, вплоть до прекращения отдельных работ в неблагоприятные периоды. Для остановки работы потоков в зимнее время в программах предусмотрено задание организационных временных разрывов в работе потоков.

4. Автоматизировать построение линейного графика в осях «время – километры» на основе расчетной диаграммы Ганта. Для этого достаточно построить матрицу со сроками начала и окончания работы линейных потоков на ЛПТМ в соответствии с графиком Ганта. Данная матрица легко трансформируется в линейную модель в осях «протяженность дороги – сроки производства работ» в программе MS Excel.

Результаты исследования

В качестве демонстрационного примера в статье представлены результаты информационного моделирования календарного плана строительства автомобильной дороги протяженностью 10 км с использованием программы

MS Project Professional. Рассмотрен упрощенный вариант для того, чтобы отразить только принципиальные положения метода в рамках данной статьи. Автомобильная дорога III технической категории, располагающаяся в 5-й климатической зоне. Дата начала проекта – 13 января текущего года. Определены границы зимнего строительного сезона, распутиц. В зимний период действует стандартный календарь – 8-часовая смена с пятидневной рабочей неделей. В летний сезон – вахтовый метод с 12-часовой сменой и одним выходным днем в неделю. Деление дороги на ЛПТМ выполнено только для земляного полотна. Участок 5–7 км строится в зимнее время с готовностью для перекрытия следующим слоем, т. е. не требует достройки. На рис. 2 приведена технологическая карта этого процесса по технологии ГеоФРАМ*, рассчитанная в программе MS Project.

На рис. 3 представлен календарный план комплексного дорожного потока, оптимизированный по сроку строительства дороги при заданных исполнителях.

В составе проекта принята нормализованная технология на основе ГЭСН-2020**. На микроуровне определены объемы и длительности по видам работ, составы специализированных отрядов [формулы (1)–(5)].

В летний период (после распутицы) линейные земляные работы ведет один отряд № 2 на ЛПТМ-2 (0–5 км) и ЛПТМ-3 (8–10 км) с перемещением через участок ЛПТМ-1, где работы были закончены в зимнее время. На строительстве подстилающего слоя и щебеночного основания работают отдельные специализированные отряды (№ 3 и № 4). Строительство двухслойного покрытия ведет один отряд (№ 5), который переходит на верхний слой после завершения нижнего слоя покрытия (связь «окончание – начало»). При строительстве регламентированы минимальные разрывы между потоками. Обеспечен ввод дороги в плановом году до наступления зимнего периода. Диаграмма Ганта преобразована в линейный график в осях «время, ч – протяженность дороги, км». Эта ин-

* Грунтовый модуль «Геооболочка-ГеоФРАМ». URL: <https://sw-servis.ru/produkcija/geoobolochka-geofram/> (дата обращения: 20.10.2021).

** Государственные элементные сметные нормы ГЭСН : утв. приказами Минстроя России № 871/пр,

№ 876/пр от 26.12.2019. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/view.gesn-2020.php> (дата обращения: 10.03.2021).

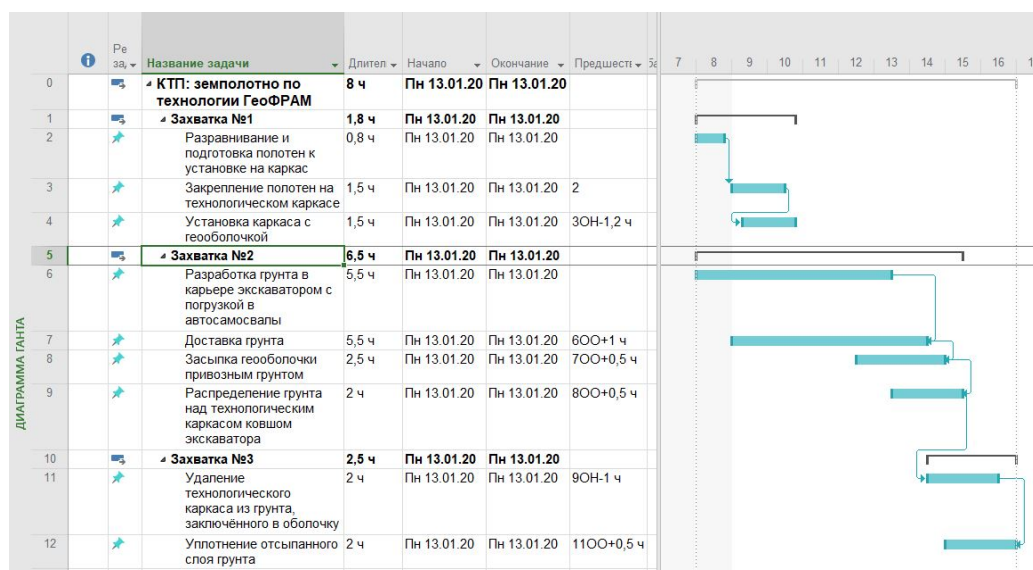


Рис. 2. Фрагмент сменного графика строительства земляного полотна по технологии ГеоФРАМ

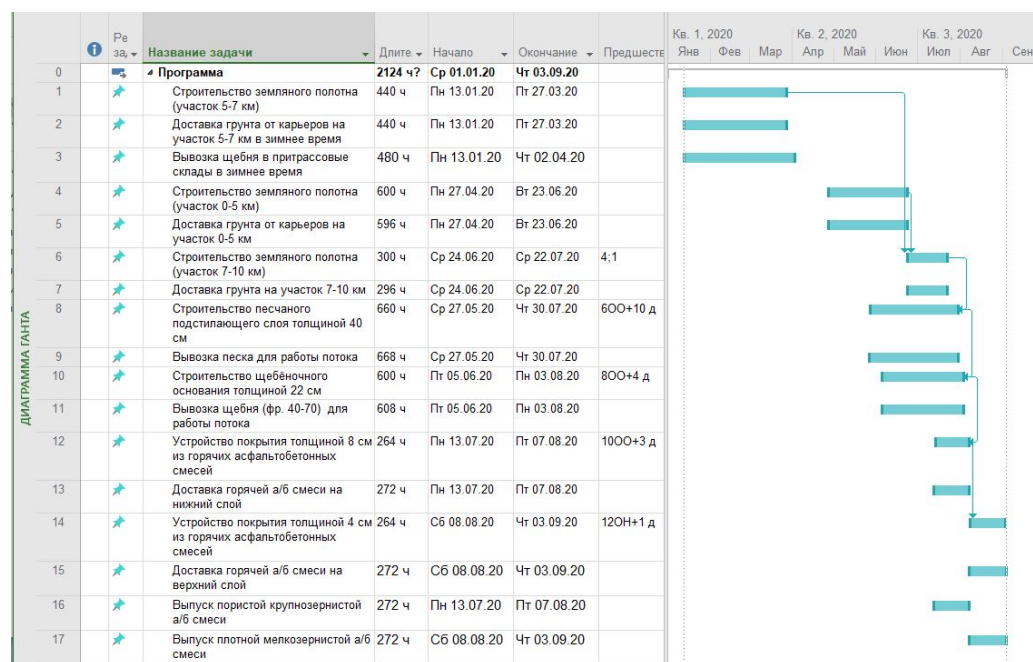


Рис. 3. Фрагмент графика Ганта строительства автомобильной дороги в MS Project

формация представлена сначала в виде матрицы с разбивкой по километрам в программе Excel, а затем преобразована в линейный график (рис. 4).

Выпуск асфальтобетонных смесей, транспортировка грунта и строительных материалов запланированы в увязке с выполнением соответствующих работ основного производства (связь «начало – начало») при совпадающей длительности работ.

Несмотря на ряд перспективных научных разработок, связанных с моделированием различных схем поточной организации линей-

ного строительства [6, 8, 9, 10, 12], вопросы комплексного проектирования взаимоувязанных технологических и организационных решений требуют совершенствования и дальнейшего развития. Опираясь на исследования последних лет, связанные с имитационным моделированием линейно-протяженных объектов, можно отметить актуальность разработок по оценке надежности и устойчивости проектных решений [9, 20], обеспечению безопасности рабочих процессов [21], линейному районированию, информационной поддержке

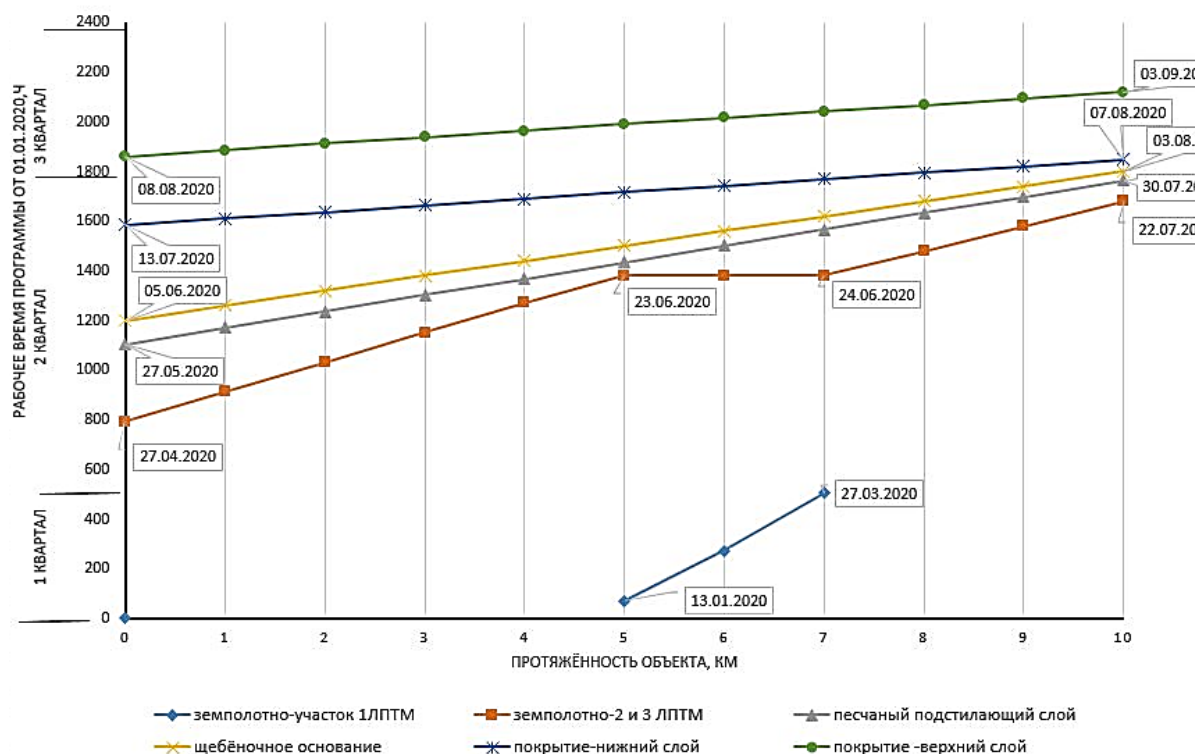


Рис. 4. Линейный график строительства дороги

проектов на протяжении жизненного цикла [4, 9, 13, 14]. Многие из этих подходов нашли отражение в предлагаемой модели. Так, оценить вероятность выполнения работ в сроки, установленные проектом, можно с использованием аналитических методов (PERT), статистического моделирования полученного графика в программе MS Project, а также в аналогичных отечественных программах календарного планирования Model Studio CS, nanoCAD, Spider и др. Важными преимуществами информационного моделирования являются:

- наглядность получения результата при изменении параметров модели;
- возможность анализа и корректировки структурных схем комплексного потока в процессе визуализации.

В программе автоматически выстраивается сетевой график на основе диаграммы Ганта, полученной в результате расчета с использованием предлагаемого метода.

Выводы

1. Научная новизна обусловлена созданием потоковой системы, объединяющей технологические решения (микроуровень) и ор-

ганизационные решения (макроуровень). Реализована концепция, основанная на конвергенции ранее созданных имитационных моделей оптимизации комплексного дорожно-строительного потока и информационного моделирования на принципах теории структурно-параметрического синтеза потоковых систем.

2. Реализовано календарное планирование строительства автомобильной дороги с оптимальным сроком при заданных исполнителях на основе инструментария MS Project или других аналогичных программ.

3. Учет в модели дополнительных организационно-технологических параметров специализированных потоков, а также структуризация линейного объекта на характерные модули повысили соответствие модели реальному объекту, т. е. ее адекватность.

4. Преимуществом данного метода является возможность учесть разные режимы работы предприятия в течение года, особенности производства работ в зимний строительный сезон, предусмотреть увязку в единый комплексный процесс основного производства и обеспечивающих подсистем.

Список источников

1. Khodabandelu A., Park J. W. Agent-based modeling and simulation in construction // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 131. P. 103882. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103882.
2. Doukari O., Greenwood D. Automatic generation of building information models from digitized plans // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 113. P. 103129. DOI 10.1016/j.autcon.2020.103129.
3. Возгомент Н. В. Современные вызовы и перспективы развития BIM-моделирования в России в эпоху цифровизации // *E-Management*. 2020. Т. 3, № 3. С. 20–27. DOI 10.26425/2658-3445-2020-3-3-20-27.
4. Kabanov V. N. Organizational and technological reliability of the construction process // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 1 (77). P. 59–67. DOI 10.18720/MCE.77.6.
5. Kalugin Yu. B., Romanov R. S. Scheduling workflows for scattered objects // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 8 (84). P. 29–40. DOI 10.18720/MCE.84.3.
6. Earned Schedule min-max: Two new EVM metrics for monitoring and controlling projects / P. Ballesteros-Pérez, E. Sanz-Ablanedo, D. Mora-Melià [et al.] // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 103. P. 279–290. DOI 10.1016/j.autcon.2019.03.016.
7. Боброва Т. В., Дубенков А. А., Титарь И. В. Совершенствование организационно-технологического проектирования линейных транспортных объектов на основе моделирования их пространственной декомпозиции // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 4 (32). С. 169–175. DOI 10.18324/2077-5415-2016-4-169-175.
8. Bobrova T., Vorobyev V. Linear structure taxonomy with the account of environmental polystructures impact // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 216. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601003>
9. Абдуллаев Г. И., Величкин В. З., Солдатенко Т. Н. Повышение организационно-технологической надежности строительства линейно-протяженных сооружений методом прогнозирования отказов // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 3 (38). С. 43–50. DOI 10.5862/MCE.38.6.
10. Максимычев О. И., Бойков В. Н. Поддержка жизненного цикла проектов дорожно-строительных работ в парадигме цифровой экономики // *САПР и ГИС автомобильных дорог*. 2019. № 1 (12). С. 10–15. DOI 10.17273/CADGIS.2019.1.2.
11. Боброва Т. В. Проектно-ориентированное управление производством работ на региональной сети автомобильных дорог : монография. Омск : Изд-во Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, 2006. 334 с.
12. Строительство путей сообщения на Севере : научно-практическое издание / С. Я. Луцкий, Т. В. Шепитько, П. М. Токарев [и др.]. М. : ЛАТМЭС, 2009. 286 с.
13. Брызгалова Р. М., Воробьев В. С., Катыльмова К. В. Имитационная модель управления стоимостью железнодорожного строительства // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. 2008. № 2. С. 51–57.
14. Имитационное моделирование в структуре создания BIM-технологий строительных проектов / В. С. Воробьев, А. С. Сеницына, К. В. Катыльмова, Н. П. Запашикова // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2018. № 5 (713). С. 105–115.
15. Воробьев В. С., Мананов А. Л. Концепция имитационного моделирования организации производства инфраструктурного комплекса железных дорог // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. 2013. № 1. С. 81–85.
16. Волков В. А., Чудинов С. М. Системный анализ для структурно-параметрического синтеза // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия «Экономика. Информатика»*. 2012. № 19 (138). Вып. 24/1. С. 153–157.
17. Акимов С. В. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2011. № 2 (24), часть 2. С. 204–211.
18. Аристов А. О. Теория квазиклеточных сетей : научная монография. М. : Изд-во Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», 2014. 188 с. URL: https://vk.com/wall1563794_1577 (дата обращения: 15.01.2022).
19. Аристов А. О. Модели организации движения транспортных потоков на основе дискретных структур // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011. Т. 6. № 12. С. 662–675.
20. Informetric analysis and review of literature on the role of BIM in sustainable construction / R. Santos, A. A. Costa, J. D. Silvestre, L. Pyl // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 103. P. 221–234. DOI 10.1016/j.autcon.2019.02.022.
21. BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects / Y. Lu, P. Gong, Y. Tang [et al.] // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 124. P. 103553. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103553.

References

1. Khodabandelu A., Park J. W. Agent-based modeling and simulation in construction. *Automation in Construction*. 2021;131:103882. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103882.
2. Doukari O., Greenwood D. Automatic generation of building information models from digitized plans. *Automation in Construction*. 2020;113:103129. DOI 10.1016/j.autcon.2020.103129.
3. Vozgoment N. V. Modern challenges and prospects for the development of BIM modeling in Russia in the epoch of digitalization. *E-Management*. 2020;3(3):20–27. DOI 10.26425/2658-3445-2020-3-3-20-27. (In Russ.).
4. Kabanov V. N. Organizational and technological reliability of the construction process. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;(77):59–67. DOI 10.18720/MCE.77.6.
5. Kalugin Yu. B., Romanov R. S. Scheduling workflows for scattered objects. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;(84):29–40. DOI 10.18720/MCE.84.3.
6. Ballesteros-Pérez P., Sanz-Ablanedo E., Mora-Melià D. [et al.]. Earned Schedule min-max: Two new EVM metrics for monitoring and controlling projects. *Automation in Construction*. 2019;103:279–290. DOI 10.1016/j.autcon.2019.03.016.
7. Bobrova T. V., Dubenkov A. A., Tytar I. V. Improving the organizational and technological design of linear transport facilities based on modeling their spatial decomposition. *Systems. Methods. Technology*. 2016;(32):169–175. DOI 10.18324/2077-5415-2016-4-169-175. (In Russ.).
8. Bobrova T., Vorobyev V. Linear structure taxonomy with the account of environmental poly-structures impact. *MATEC Web of Conferences*. 2018;216. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601003>.
9. Abdullaev G. I., Velichkin V. Z., Soldatenko T. N. Improving the organizational and technological reliability of the construction of linear-length structures by the method of failure prediction. *Magazine of Civil Engineering*. 2013(38):43–50. DOI 10.5862/MCE.38.6. (In Russ.).
10. Maksimych O. I., Boikov V. N. Support for the life cycle of road construction projects in the digital economy paradigm. *CAD and GIS of automobile roads*. 2019;(12):10–15. DOI 10.17273/CADGIS.2019.1.2. (In Russ.).
11. Bobrova T. V. Project-oriented management of the production of works on the regional network of highways: monograph. Omsk: Publishing House of the Siberian State Automobile and Highway University; 2006. 334 p. (In Russ.).
12. Lutsky S. Ya., Shepitko T. V., Tokarev P. M. [et al.]. Construction of communication lines in the North: scientific and practical publication. M.: LATMES; 2009. 286 p. (In Russ.).
13. Bryzgalova R. M., Vorobyov V. S., Katalymova K. V. Simulation model of railway construction cost control. *Scientific problems of transport of Siberia and the Far East*. 2008;(2):51–57. (In Russ.).
14. Vorobyev V. S., Sinitsyna A. S., Katalymova K. V., Zapashchikova N. P. Simulation modeling in the structure of creating BIM technologies for construction projects. *University Proceedings. Construction*. 2018;(713):105–115. (In Russ.).
15. Vorobyev V. S., Manakov A. L. The concept of simulation modeling of the infrastructure railway complex production organization. *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2013;(1):81–85. (In Russ.).
16. Volkov V. A., Chudinov S. M. System analysis for structural-parametric synthesis. *Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Series "Economics. Informatics"*. 2012;138(24/1):153–157. (In Russ.).
17. Akimov S. V. Analysis of the problem of automation of structural-parametric synthesis. *Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics*. 2011;24(2):204–211. (In Russ.).
18. Aristov A. O. Theory of quasicellular networks: scientific monograph. M.: Publishing House of the National Research Technological University MISIS; 2014. 188 p. URL: https://vk.com/wall1563794_1577. (In Russ.).
19. Aristov A. O. Traffic flow organization models based on discrete structures. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2011;6(12):662–675. (In Russ.).
20. Santos R., Costa A. A., Silvestre J. D. and Pyl L. Informetric analysis and re-view of literature on the role of BIM in sustainable construction. *Automation in Construction*. 2019;103:221–234. DOI 10.1016/j.autcon.2019.02.022.
21. Lu Y., Gong P., Tang Y. [et al.]. BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects. *Automation in Construction*. 2021;124:103553. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103553.

Информация об авторе

Т. В. Боброва – профессор кафедры «Экономика и проектное управление в транспортном строительстве» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, доктор технических наук, профессор.

Information about the author

T. V. Bobrova – Professor of the Economics and Project Management in Transport Construction Department, Siberian State Automobile and Highway University, Doctor of Engineering.

Статья поступила в редакцию 18.03.2022; одобрена после рецензирования 21.03.2022; принята к публикации 05.04.2022.

The article was submitted 18.03.2022; approved after reviewing 21.03.2022; accepted for publication 05.04.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 628.316
doi 10.52170/1815-9265_2022_61_96

Опыт очистки нефтесодержащих сточных вод предприятий железнодорожного транспорта компактной передвижной установкой

Дмитрий Владимирович Глазков

Сибирский государственный университет путей сообщений, Новосибирск, Россия, gdv@myttk.ru

Аннотация. В статье представлены экспериментальные результаты предварительной очистки нефтесодержащих жидких отходов, образующихся на предприятиях при техническом обслуживании резервуаров для хранения горюче-смазочных материалов, проведении ремонтных и сервисных работ, мойке изделий, использованных при работе с различными смазывающими материалами, непосредственно на месте их образования с помощью компактной передвижной установки, включающей фильтр с загрузкой из сорбционного материала, камеру с размещенным в ней реактором-отстойником и нутч-фильтр для отделения и обезвоживания осадка. Взвешенные вещества, неэмульгированные жиры, масла и эмульгированные нефтепродукты из водной фазы удаляются фильтрованием через сорбционный материал на основе полипропилена, а эмульгированные и растворенные нефтепродукты осаждаются в реакторе-отстойнике на поверхности коагулянтов – гидроксидов железа или магния. Эффективность предварительной очистки от механических примесей и неэмульгированных нефтепродуктов была близка к 100 %, эмульгированных и растворенных нефтепродуктов составила более 98,7 %.

Ключевые слова: подтоварные воды, щелочные моющие растворы, удаление масел и нефтепродуктов

Для цитирования: Глазков Д. В. Опыт очистки нефтесодержащих сточных вод предприятий железнодорожного транспорта компактной передвижной установкой // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 96–102. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_96.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Experience in the treatment of oily wastewater from railway transport enterprises with a compact mobile unit

Dmitry V. Glazkov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, gdv@myttk.ru

Abstract. Experimental results of preliminary treatment of oily liquid wastes generated at enterprises during maintenance of storage tanks for combustible and lubricating materials, repair and maintenance works, washing products that have worked with different lubricants directly at the place of their formation by means of a compact mobile unit including a filter with a sorption material loading, a chamber with a settling tank placed in it, and a nutsch filter for separation and dehydration are presented. Suspended substances, non-emulsified fats, oils and emulsified petroleum products from the aqueous phase are removed by filtering through sorption material based on polypropylene and emulsified and dissolved petroleum products are settled in the reactor-settling tank on the surface of coagulants – iron or magnesium hydroxides. The efficiency of pretreatment from mechanical impurities and non-emulsified petroleum products was close to 100 %, emulsified and dissolved petroleum products > 98,7 %.

Keywords: bottom waters, alkaline washing solutions, removal of oils and petroleum products

For citation: Glazkov D. V. Experience in the treatment of oily wastewater from railway transport enterprises with a compact mobile unit. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):96–102. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_96.

Введение

Хранение, транспортировка и использование в технологических процессах горюче-смазочных материалов, техническое обслужива-

ние резервуаров для хранения горюче-смазочных материалов, проведение ремонтных и сервисных работ, к числу которых относят мойку изделий, использованных при работе с различ-

ными смазывающими материалами, зачистку и промывку емкостей, а также экипировка локомотивов сопровождаются образованием отходов 1-го класса опасности. Эти отходы состоят из высоковязких осадков (нефтешламов), содержащих в своем составе обводненные нефтепродукты, ржавчину и другие механические примеси, а также из подтоварных вод и ливневых стоков, сильно загрязненных эмульгированными и растворенными нефтепродуктами.

Вязкие нефтешламы утилизируют путем переработки на специализированных предприятиях, используя методы пиролиза, механического разделения фаз центрифугированием или флотацией, экстракции нефтепродуктов и сырой нефти органическими растворителями и др. [1–3].

Отработанные моющие растворы периодически сбрасывают на заводские очистные сооружения; подтоварные воды, проливы, ливневые стоки накапливают в заглубленных резервуарах и затем направляют на переработку и обезвреживание. Высокая концентрация нефтепродуктов (более 1 000 мг/л) не позволяет сбрасывать эти воды в системы коммунального водоотведения, а в большинстве случаев и на заводские сооружения очистки сточных вод без предварительной обработки. Выбор технологии предварительной обработки зависит от физических и химических свойств этих отходов, а также наличия соответствующего оборудования для их переработки.

Традиционные методы очистки нефтесодержащих сточных вод включают в себя усреднение состава стоков, отстаивание для осаждения крупных механических примесей и удаления всплывающих масел, жиров и реагентную флотацию [4, 5]. Чаще всего для этого применяют аппараты напорной флотации [6, 7]. Во флотаторе часть сточной воды насыщается воздухом под избыточным давлением, с последующим снижением давления до атмосферного. При этом происходит интенсивное выделение большого количества мельчайших пузырьков газа, поднимающих из объема жидкости на поверхность мелкодисперсные частицы, представляющие собой хлопья коагулянта с захваченными загрязнениями. В качестве коагулянтов чаще всего используют соли железа и алюминия [8]. Предварительная обработка нефтесодержащих

сточных вод в сочетании с отстаиванием, обработкой коагулянтами и флотацией позволяет снизить концентрацию нефтепродуктов более чем на 90 %. После механической очистки вода поступает на доочистку с использованием методов сепарации примесей на мембранах, обработку ультразвуком, адсорбцию на активированных углях или синтетических сорбентах, АОР-процессы (Advanced oxidation processes) и др. [4]. Для извлечения нефти и нефтепродуктов из сточных вод как на стадии предварительной очистки, так и на стадии доочистки используют огромное количество различных природных и синтетических материалов, обладающих сорбционной емкостью от десятков до нескольких тысяч мг/г [8]. Применение синтетических материалов в качестве сорбентов имеет одно важное преимущество – возможность регенерации. Регенерацию сорбентов осуществляют физическими (сжатие, центрифугирование и др.) или химическими методами (элюирование подходящим растворителем). Используя многоступенчатые процессы и комбинируя методы очистки, можно снизить содержание нефтепродуктов в очищенной воде до концентрации менее 1 мг/л и достичь национальных стандартов по содержанию вредных примесей в промышленных сточных водах.

Традиционная схема и технологии очистки сточных вод от нефтепродуктов, описанные выше, имеют ряд существенных недостатков:

1. Периодические (залповые) сбросы даже небольших объемов подтоварных вод, проливов, ливневых стоков или отработанных моющих растворов, в которых концентрация нефтепродуктов, СПАВ и твердых примесей может достигать нескольких десятков тысяч г/м³, в приемные резервуары заводских очистных сооружений приводят к загрязнению канализационных сетей, которые потом являются постоянным источником поступления нефтепродуктов в сточные воды.

2. При сбросе отработанных моющих растворов образуются устойчивые нефтяные эмульсии, оборудование и устройства для очистки сточных вод на стадии доочистки не справляются с возросшей нагрузкой и быстро выходят из строя, или требуется частая замена дорогостоящих комплекующих, материалов и адсорбентов. Для решения возникающих проблем на стадии флота-

ционной очистки периодически требуется повышать расход реагентов, подключать дополнительные флотаторы и устройства для обезвоживания флотошлама.

Целью данной работы является экспериментальная оценка эффективности предварительной очистки производственных сточных вод, загрязненных нефтепродуктами, непосредственно на месте их образования с помощью передвижной установки.

Материалы, объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись:

– подтоварные воды одной из баз топлива Западно-Сибирской железной дороги, содержащие в своем составе механические примеси, растворенные, эмульгированные и неэмульгированные нефтепродукты;

– отработанный щелочной моющий раствор после мойки изделий, использованных при работе с подшипниками, заправленными смазкой ЛЗ-ЦНИИ (У), которая имеет следующий состав: масло касторовое – 0,2 г/г; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 0,005 г/г; NaOH – 0,005 г/г; дифениламин $\text{C}_{12}\text{H}_{11}\text{N}$ – 0,007 г/г; присадка ДФ-11 – 0,05 г/г; масло веретенное АУ – 0,733 г/г;

– отработанный щелочной моющий раствор после мойки изделий, использованных при работе с подшипниками, заправленными смазкой БУКСОЛ, имеющей следующий состав: 12-оксистеарат лития $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}(\text{OH})(\text{CH}_2)_{11}\text{COOLi}]$ – 0,12 г/г; олеат лития $[\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOLi}]$ – 0,03 г/г; диалкилдитиофосфат цинка $[\text{CH}_3\text{NHCH}_2\text{C}_6\text{H}_5\text{OHR S-Zn-S}]$ – 0,08 г/г; нитрованное масло (присадка) – 0,015 г/г; нефтяное масло – 0,755 г/г.

В качестве сорбента для нефтепродуктов и фильтрующей загрузки для удаления загрязненных нефтепродуктами механических примесей на стадии предварительной очистки в данной работе использовали материал из полипропиленового волокна. Сорбционная емкость волокна по нефтепродуктам составила 10 г/г.

Реагенты:

– деэмульгатор ТНД: неионогенный СПАВ, продукт полимеризации окисей пропилена и этилена с глицерином [9];

– железо (III) хлорид 6-водный (ГОСТ 4147–74), 10 %-й раствор;

– магний сернокислый 7-водный (ГОСТ 4523–77), 10 %-й раствор;

– натрия гидроокись (ГОСТ 4328–77), 10 %-й раствор.

Методы анализа:

– массовую концентрацию неэмульгированных жидких нефтепродуктов, механических примесей и осадков определяли путем отделения фильтрованием с помощью бумажного фильтра;

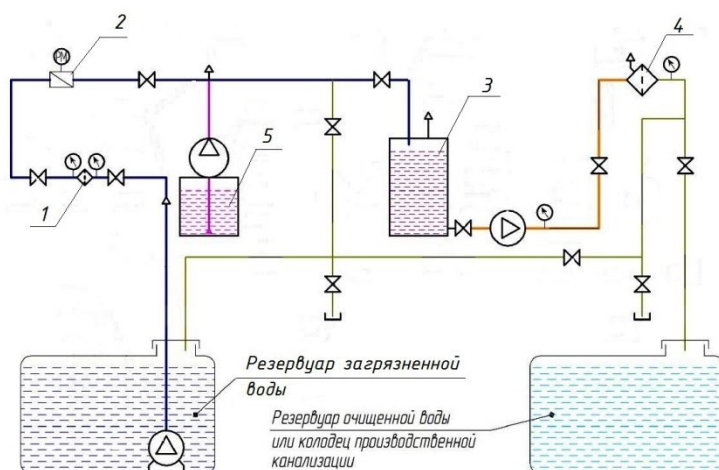
– массовую концентрацию эмульгированных и растворенных нефтепродуктов определяли флуориметрическим методом, основанном на экстракции нефтепродуктов из пробы воды гексаном и измерении интенсивности флуоресценции экстракта на анализаторе жидкости «Флюорат 02» [10];

– остаточное содержание растворенных мыл определяли по количеству связанной щелочности, измеряемой по объему соляной кислоты, затраченной на титрование раствора в присутствии метилоранжа после определения свободной щелочности, измеряемой по объему кислоты, затраченной на титрование раствора в присутствии фенолфталеина.

На рисунке представлена принципиальная схема установки для очистки сточных вод, подтоварных вод, проливов, ливневых стоков, отработанных моющих растворов.

Установка содержит насосы; фильтр с загрузкой из сорбционного материала на основе полипропилена; реактор-отстойник, выполненный в виде емкости; дозировочный насос для подачи реагента через смеситель; нутч-фильтр, работающий под вакуумом или избыточным давлением, оснащенный фильтрующей перегородкой, изготовленной из ткани. Перед началом работы устройство перемещают к источнику образования или накопления сточных вод. Из накопительной емкости объемом 20 м³ с глубины 0,5 м сточные воды, содержащие различные загрязнения, нагнетаются насосом в сорбционный фильтр, в котором происходит очистка от взвешенных веществ, всплывших неэмульгированных жиров, масел, нефтепродуктов и эмульгированных нефтепродуктов. Далее вода поступает в реактор-отстойник, куда одновременно по трубопроводу дозировочным насосом через смеситель вводят раствор реагента, в качестве которого используют сульфат магния или хлорное железо, образующие в результате

а)



б)



Передвижная установка для очистки сточных вод:

а – принципиальная схема; б – 3D-модель;

1 – адсорбционный фильтр; 2 – расходомер; 3 – реактор-отстойник; 4 – нутч-фильтр;

5 – емкость с реагентом

гидролиза нерастворимые гидроксиды, на поверхности частиц которых адсорбируются эмульгированные и растворимые нефтепродукты. Затем образовавшуюся суспензию насосом подают в нутч-фильтр, где осуществляется ее фильтрация под давлением сжатого воздуха или под вакуумом. Фильтрат сбрасывают в канализацию или в емкость для транспортировки на ближайшие очистные сооружения. Обезвоженный осадок вместе с фильтровальной тканью и отработанный картридж сорбционного фильтра отправляют на утилизацию. Производительность установки 50 л/ч, продолжительность пребывания воды в реакторе-отстойнике 0,5 ч.

Результаты исследования и их анализ

Очистка подтоварных вод

В табл. 1 представлены результаты очистки подтоварной воды, содержащей механические примеси, растворенные, эмульгированные и неэмульгированные нефтепродукты.

Температура воды составляла 14 °С, pH = 6,3. При использовании сульфата магния в качестве реагента для более полного осаждения эмульгированных и растворенных нефтепродуктов воду необходимо подщелачивать до значений pH = 9–10. Регулировали pH путем подачи раствора NaOH в реактор-отстойник одновременно с раствором $MgSO_4$.

Результаты показывают, что более 90 % примесей задерживаются на сорбционном

фильтре. Применение хлорного железа в качестве коагулянта более предпочтительно, поскольку $FeCl_3$ подвергается полному гидролизу в широком диапазоне значений pH (более 3,4), следовательно, не требуется корректировка pH сточной жидкости. Увеличение суммарной начальной концентрации механических примесей, свободных и эмульгированных нефтепродуктов с 270 мг/л до 1 250 мг/л заметно влияет на эффективность их удаления путем пропуска через сорбционный фильтр, что приводит к уменьшению ресурса работы сорбционного фильтра и повышенному расходу реагентов на стадии доочистки. При постоянной работе с сильнозагрязненными сточными водами с концентрацией примесей более 1 000 мг/л перед сорбционным фильтром можно установить совмещенный с гидроциклоном фильтр с инертной зернистой загрузкой, что позволит существенно снизить затраты на дорогостоящие реагенты [11].

Очистка отработанных моющих растворов

В процессе мойки изделий, работавших с подшипниками, заправленными смазкой ЛЗ-ЦНИИ (У), при температуре моющего раствора 90 °С происходит снижение вязкости смазки и переход части веретенного масла в раствор в виде неэмульгированной примеси. При этом касторовое масло подвергается щелочному гидролизу с образованием натриевых солей рицинолевой, линолевой и олеиновой кислот, являющихся ПАВ, в присутствии ко-

торых частички веретенного масла образуют устойчивую водную эмульсию [12]. В процессе мойки изделий, использованных при работе с подшипниками, заправленными смазкой БУКСОЛ, которая по сути является суспензией твердых литиевых мыл в нефтяном масле, при температуре моющего раствора 90 °С происходит снижение вязкости смазки и переход частиц суспензии в щелочной водный раствор [12]. При взаимодействии со щелочью литиевая соль олеиновой кислоты переходит в раствор, образуя ПАВ, который стабилизирует суспензию. Свободных (неэмульгированных) нефтепродуктов в процессе мойки изделий, заправленных смазкой БУКСОЛ, практически не образуется. Таким образом, отработанные моющие растворы представляют собой жидкость, состоящую из смеси механических примесей, растворенных и неэмульгированных нефтепродуктов и эмульсии первого рода («масло в воде»). При этом растворимость нефтепродуктов в воде относительно невелика и составляет 10–50 мг/л. Очевидно, что прежде, чем сбросить такие растворы на локальные очистные сооружения, необходимо разрушить эмульсию, отде-

лить неэмульгированные нефтепродукты и взвешенные примеси от жидкой фазы.

Отработанную жидкость из моечной машины (3–5 м³) подают в емкость, в которой она отстаивается и охлаждается до температуры 60–70 °С. После чего в нее при интенсивном перемешивании с помощью мешалки кавитационного типа подается деэмульгатор в количестве 30–40 г/м³ [13]. Затем с помощью переносного нефтеотделителя (скиммер) удаляют всплывшие неэмульгированные жиры, масла и нефтепродукты. Далее насосом жидкость направляют через сорбционный фильтр в реактор-отстойник (см. рисунок), одновременно дозируя реагент, в качестве которого был использован сульфат магния в количестве 50–250 мг/л в пересчете на Mg^{2+} . В результате реагентной обработки образуется суспензия, состоящая из смеси нерастворимых магниевых солей жирных кислот, твердых литиевых мыл и гидроксида магния. После фильтрования суспензии в нутч-фильтре была определена степень очистки отработанных щелочных моющих растворов. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 1

Технические характеристики и показатели качества исходной и очищенной воды

Объект исследования	Нефтепродукты (НП) в исходной воде, мг/л		Реагент, доза реагента в пересчете на катион, мг/л	НП в воде после сорбционного фильтра, мг/л	НП в воде после нутч-фильтра, мг/л	Степень очистки воды от НП, %
	Неэмульгированные НП и механические примеси	Эмульгированные и растворенные НП				
База топлива № 1	180	434	$MgSO_4$, 200 Mg^{2+}	23,00	1,5	99,6
	180	434	$FeCl_3$, 80 Fe^{3+}	23,00	1,3	99,7
База топлива № 2	250	1 000	$MgSO_4$, 200 Mg^{2+}	116,00	13,4	98,7
	250	1 000	$FeCl_3$, 110 Fe^{3+}	116,00	9,0	99,1
	120	151	$FeCl_3$, 80 Fe^{3+}	0,62	0,5	99,7

Таблица 2

Технические характеристики и показатели качества очистки щелочных моющих растворов

Раствор	Доза $MgSO_4$ в пересчете на Mg^{2+} , мг/л	Связанная щелочность, моль/л	Степень очистки, %
№ 1 (NaOH – 40 г/л; смазка ЛЗ-ЦНИИ – 8 г/л)	50	0,0018540	64
	150	0,0006695	87
	240	0,0000515	99
№ 2 (NaOH – 40 г/л; смазка БУКСОЛ – 8 г/л)	30	0,0002656	68
	50	0,0000330	96
	100	0,0000830	99

Очищенный раствор не сбрасывается в заводскую канализацию, а после корректировки состава направляется на повторное использование.

Анализ последних исследований и разработок в области технологий обезвреживания сильнозагрязненных нефтесодержащих сточных вод показывает, что стадию предварительной очистки этих отходов можно осуществлять непосредственно на месте их образования с помощью компактных передвижных установок, включающих фильтр с загрузкой из сорбционного материала, камеру с размещенным в ней реактором-отстойником и нутч-фильтр для отделения и обезвоживания осадка.

Взвешенные вещества, неэмульгированные жиры, масла и эмульгированные нефтепродукты из водной фазы удаляются фильтрованием через сорбционный материал на основе полипропилена, а эмульгированные и растворенные нефтепродукты осаждаются в реакторе-отстойнике на поверхности коагу-

лянтов – гидроксидов железа или магния. Фильтрат сбрасывают в канализацию или в емкость для транспортировки на ближайшие очистные сооружения. Обезвоженный осадок вместе с фильтровальной тканью и отработанный картридж сорбционного фильтра отправляют на утилизацию. Устройство прошло испытания в производственных условиях по очистке загрязненной подтоварной воды одной из баз топлива Западно-Сибирской железной дороги, которые показали высокую степень очистки воды от механических примесей и неэмульгированных нефтепродуктов (100 %), эмульгированных и растворенных нефтепродуктов (более 98,7 %).

Применение предлагаемого способа для регенерации отработанных моющих и обезжиривающих растворов приводит к повышению эффективности и стабильности очистки сточных вод на заводских очистных сооружениях и позволяет вернуть очищенные моющие растворы на повторное использование.

Список источников

1. A critical review on energy recovery and non-hazardous disposal of oily sludge from petroleum industry by pyrolysis / Jiantao Li, Fawei Lin, Kai Li [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 406. P. 124706.
2. Status and prospect of oil recovery from oily sludge: A review / K. Hui, J. Tang, H. Lu [et al.] // *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 13, iss. 8. P. 6523–6543.
3. Johnson O. A., Affam A. C. Petroleum sludge treatment and disposal: A review // *Environmental Engineering Research*. 2019. № 24 (2). P. 191–201.
4. Li Yu, Mei Han, Fang He. A review of treating oily wastewater // *Arabian Journal of Chemistry*. 2017. Vol. 10. P. S1913–S1922.
5. A review of oilfield wastewater treatment using membrane filtration over conventional technology / Syarifah Nazirah Wan Ikhsan, Norhaniza Yusof, Farhana Aziz, Nurasyikin Misdan // *Malaysian Journal of Analytical Sciences*. 2017. Vol. 21, № 3. P. 643–658.
6. Edzwald James and Haarhoff Johannes. Dissolved Air Flotation For Water Clarification. US : McGraw-Hill Professional, 2011. 352 p.
7. Jayaprakash Saththasivam, Kavithaa Loganathan, Sarper Sarp. An overview of oil-water separation using gas flotation systems // *Chemosphere*. 2016. Vol. 144. P. 671–680.
8. Oil and grease removal from wastewaters: Sorption treatment as an alternative to state-of-the-art technologies. A critical review / Ariana M. A. Pintor, Vítor J. P. Vilar, Cidália M. S. Botelho, Rui A. R. Boaventura // *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 297. P. 229–255.
9. Деэмульгаторы нового поколения на основе жидкокристаллической нанотехнологии / ГК «ТЭК». 2017. URL: <https://s.siteapi.org/bd6f411869160c7/docs/32d6695fde2daabfbdc9f720f81c629e5b0306d9.pdf> (дата обращения: 10.03.2022).
10. ПНД Ф 14.1:2:4.128-98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» // *Техэксперт* : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200079424> (дата обращения: 10.03.2022).
11. Physical pretreatment of petroleum refinery wastewater instead of chemicals addition for collaborative removal of oil and suspended solids / Yuxiao Sun, Yi Liu, Jianqi Chen [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 278. P. 123821.
12. Рязанцев А. А., Глазков Д. В. Технология регенерационной очистки щелочных моющих растворов // *Политранспортные системы : материалы X Международной научно-технической конференции (Новосибирск,*

15–16 ноября 2018 г.). Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2019. С. 447–450.

13. Рязанцев А. А., Глазков Д. В. Технология регенерационной очистки щелочных моющих растворов от машин мойки колесных пар, подшипников и корпусов букс // Политранспортные системы : материалы IX Международной научно-технической конференции (Новосибирск, 17–18 ноября 2016 г.). Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2017. С. 273–275.

References

1. Jiantao Li, Fawei Lin, Kai Li, Fa Zheng, Beibei Yan, Lei Che, Wangyang Tian, Guanyi Chen and Kunio Yoshikawa. A critical review on energy recovery and non-hazardous disposal of oily sludge from petroleum industry by pyrolysis. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;406:124706.
2. Hui K., Tang J., Lu H., Xi B., Qu C., Li J. Status and prospect of oil recovery from oily sludge: A review. *Arabian Journal of Chemistry*. 2020;13(8):6523–6543.
3. Johnson A. C. Affam, Petroleum sludge treatment and disposal: A review. *Environmental Engineering Research*. 2019;24(2):191–201.
4. Li Yu, Mei Han, Fang He. A review of treating oily wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*. 2017;10:S1913–S1922.
5. Syarifah Nazirah Wan Ikhsan, Norhaniza Yusof, Farhana Aziz, Nurasyikin Misdan. A review of oilfield wastewater treatment using membrane filtration over conventional technology. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*. 2017;21(3):643–658.
6. Edzwald James and Haarhoff Johannes. Dissolved Air Flotation For Water Clarification. US: McGraw-Hill Professional; 2011. 352 p.
7. Jayaprakash Saththasivam, Kavithaa Loganathan, Sarper Sarp. An overview of oil-water separation using gas flotation systems. *Chemosphere*. 2016;144:671–680.
8. Ariana M. A. Pintor, Vítor J. P. Vilar, Cidália M. S. Botelho, Rui A. R. Boaventura. Oil and grease removal from wastewaters: Sorption treatment as an alternative to state-of-the-art technologies. A critical review. *Chemical Engineering Journal*. 2016;297:229–255.
9. New generation demulsifiers based on liquid crystal nanotechnology (2017). (In Russ.). URL: <https://s.siteapi.org/bd6f411869160c7/docs/32d6695fde2daabbfdc9f720f81c629e5b0306d9.pdf>.
10. Quantitative chemical analysis of water. Method of measuring the mass concentration of petroleum products in samples of natural, drinking, and waste water by the fluorimetric method on the fluid analyzer “Fluorat-02” (2012). (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200079424>.
11. Yuxiao Sun, Yi Liu, Jianqi Chen [et al.]. Physical pretreatment of petroleum refinery wastewater instead of chemicals addition for collaborative removal of oil and suspended solids. *Journal of Cleaner Production*. 2021;278:123821.
12. Ryazantsev A. A., Glazkov D. V. Technology of regeneration cleaning of alkaline detergent solutions. *Polytransport systems. Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference. (Novosibirsk November 15-16, 2018)*. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University; 2019. P. 447–450. (In Russ.).
13. Ryazantsev A. A., Glazkov D. V. Technology of regenerative cleaning of alkaline detergent solutions from washing machines for wheel pairs, bearings and axle boxes. *Polytransport systems. Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference. (Novosibirsk November 17-18, 2016)*. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University; 2017. P. 273–275. (In Russ.).

Информация об авторе

Д. В. Глазков – заведующий кафедрой «Гидравлика, водоснабжение и химия» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент.

Information about the author

D. V. Glazkov – Head of the Hydraulics, Water Supply and Chemistry Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering, Associate Professor.

Статья поступила в редакцию 22.03.2022; одобрена после рецензирования 08.04.2022; принята к публикации 13.04.2022.

The article was submitted 22.03.2022; approved after reviewing 08.04.2022; accepted for publication 13.04.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.121.532:624.131
doi 10.52170/1815-9265_2022_61_103

Статический анализ предельного равновесия свода обрушения при проходке подземных выработок в скальных и полускальных грунтах

Константин Валерьевич Королев^{1✉}, Ярослав Олегович Стахнев²

^{1, 2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ korolev_kv@mail.ru✉

² yaroslav.stakhnev.95@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена совершенствованию методов расчета горного давления в скальных и полускальных грунтах. Необходимость развития теории расчета горного давления вытекает из представленного здесь же критического анализа существующей нормативной методики определения этой величины. Отмечены две крупные проблемы нормативной методики: отсутствие методов определения коэффициента крепости, который прямо определяет величину горного давления, и в ряде случаев более высокие значения коэффициента крепости в дисперсных грунтах по сравнению со скальными. Последнее обстоятельство противоречит основной идее теории сводообразования М. М. Протодяконова, на которой и базируется нормативная методика.

Предлагается два новых метода расчета горного давления: для скальных и полускальных грунтов. Эти методы также базируются на теории сводообразования и содержат статический анализ силового взаимодействия свода обрушения и окружающего грунтового массива в предельном состоянии. При этом выполняется поиск такой высоты свода обрушения, который максимизирует величину горного давления. Отличительной чертой предлагаемых методов является использование паспорта прочности грунта для оценки предельных усилий. Это позволило напрямую связать высоту свода обрушения и параметры прочности грунта, определяемые в стандартных испытаниях, избегая при этом весьма небезусловных эмпирических зависимостей.

В результате установлено, что при заданных параметрах прочности грунта над выработкой в зависимости от ее ширины либо формируется столб обрушения (вне зависимости от глубины заложения), либо формируется свод обрушения, либо обрушение грунта невозможно. В этой связи предлагается ввести понятия двух критических пролетов подземной выработки. Первый критический пролет отделяет случай полностью устойчивого состояния грунта над выработкой от ситуации, когда над выработкой образуется свод обрушения. При превышении шириной выработки значения второго критического пролета разрушение грунта происходит по схеме столба обрушения.

Ключевые слова: свод обрушения, горное давление, теория сводообразования М. М. Протодяконова, паспорт прочности грунта, предельное равновесие свода, критические пролеты выработки, метод горизонтального слоя

Для цитирования: Королев К. В., Стахнев Я. О. Статический анализ предельного равновесия свода обрушения при проходке подземных выработок в скальных и полускальных грунтах // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 103–115. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_103.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Static analysis of the ultimate equilibrium of the collapse arch during the excavation of underground workings in rocky and semi-horizontal soils

Konstantin V. Korolev^{1✉}, Yaroslav O. Stakhnev²

^{1, 2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ korolev_kv@mail.ru✉

² yaroslav.stakhnev.95@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the improvement of methods for calculating mountain pressure in rocky and semi-horizontal soils. The need to develop the theory of calculating mountain pressure follows from the critical analysis of the existing normative methodology for determining this value presented here. Two major problems of the normative methodology are noted: the lack of methods for determining the strength coefficient, which directly determines the amount of mountain pressure, and in some cases higher values of the strength coefficient in dispersed soils compared to rocky ones. The latter circumstance contradicts the main idea of the theory of arch formation by M. M. Protodyakonov, on which the normative methodology is based.

Two new methods of mountain pressure calculation are proposed – for rocky and semi-horizontal soils. These methods are also based on the theory of vaulting and contain a static analysis of the force interaction of the collapse vault and the surrounding soil mass in the limiting state. At the same time, a search is performed for such a height of the roof of the building that maximizes the amount of mountain pressure. A distinctive feature of the proposed methods is the use of a soil strength passport to assess the ultimate effort. This made it possible to directly link the height of the collapse arch and the soil strength parameters determined in standard tests, while avoiding very conditional empirical dependencies.

As a result, it was found that with the specified parameters of the soil strength, a collapse column is either formed above the excavation, depending on its width (regardless of the depth of the foundation), or a collapse arch is formed, or the collapse of the soil is impossible. In this regard, it is proposed to introduce the concepts of two critical spans of underground workings. The first critical span separates the case of a completely stable state of the soil above the mine from the situation when a collapse arch is formed above the mine. When the width of the mine exceeds the value of the second critical span, the destruction of the soil occurs according to the scheme of the collapse column.

Keywords: the arch of the collapse, mountain pressure, the theory of arch formation by M. M. Protodyakonov, the passport of soil strength, the ultimate equilibrium of the arch, critical spans of workings, the method of the horizontal layer

For citation: Korolev K. V., Stakhnev Ya. O. Static analysis of the ultimate equilibrium of the collapse arch during the excavation of underground workings in rocky and semi-horizontal soils. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):103–115. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_103.

Введение

История развития методов расчета горного давления на крепь подземных выработок насчитывает около полутора века. Перечень публикаций по этой теме обширен, и даже классификации этих работ, приводимые различными авторами, сильно отличаются друг от друга [1–3]. Несколько упрощая, можно сказать, что большинство работ различаются по следующим признакам:

- глубина выработки (глубокое заложение или заложение вблизи поверхности) [4–6];
- используемая модель грунта (упругая, упругопластическая, жесткопластическая, вязкоупругопластическая) [6–9];
- моделируемые механические процессы, развивающиеся в грунтовом массиве вокруг выработки (столб обрушения, свод обрушения, зоны неупругих, или запредельных, деформаций, гипотеза плит) [7, 10, 11].

В практике проектирования тоннелей и метрополитенов наибольшее распространение получили схемы свода и столба обрушения грунта в жесткопластической постановке. Эти схемы регламентируются сразу двумя нормативными документами – СП 120.13330.2012 [12] и СП 122.13330.2012 [13]. Они базируются на теории сводообразования проф. М. М. Протодьяконова, которая впоследствии получила развитие в трудах проф. П. М. Цимбаревича [1, 2, 11].

Критический анализ нормативной методики

Согласно теории М. М. Протодьяконова при проходке подземной выработки шириной B и высотой h , образуется область обрушения грунта, называемая сводом обрушения, высотой h и шириной, или пролетом, L (рис. 1, а). Очертание свода обычно принимается по квадратной параболе [1]. Ясно, что высота h свода обрушения будет тем меньше, чем прочнее грунт. На этом основании вводится важнейшая в горном деле и подземном строительстве характеристика грунта – коэффициент крепости, определяемый по формуле

$$f = \frac{a}{h}, \quad (1)$$

где $a = L / 2$ – полупролет свода обрушения.

Пролет L свода обрушения вычисляют по формуле

$$L = B + 2h_t \cdot \operatorname{tg}(\pi / 4 - \varphi_k / 2), \quad (2)$$

где φ_k – кажущийся угол внутреннего трения, который связывают с коэффициентом крепости посредством соотношения $\varphi_k = \operatorname{arctg} f$.

Вертикальная составляющая горного давления, действующего на крепь выработки, рассчитывается как максимальное давление от свода высотой h :

$$p = \gamma h, \quad (3)$$

где γ – удельный вес грунта свода обрушения.

Если выработка располагается в обводненных несвязных или глинистых грунтах, то сводообразование невозможно [12, 13], и в выработку стремится обрушиться весь вышележащий грунт – до дневной поверхности грунта (рис. 1, б). В этом случае на крепь действует вес столба обрушения, а горное давление дается формулой

$$p = \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i, \quad (4)$$

где n – число слоев грунта над выработкой до дневной поверхности; γ_i и H_i – удельный вес и мощность грунта каждого такого слоя.

Согласно [12, 13] схему столба обрушения следует также применять и в случае малой глубины заложения выработки, когда расстояние H от верха конструкции тоннеля до дневной поверхности грунта не превышает $2h$.

Итак, если схема столба обрушения содержит одну характеристику грунта – его удельный вес, то схема свода обрушения принципиально «завязана» на величину коэффициента крепости, для которого не существует общепринятых экспериментальных методов определения. По сути, коэффициент крепости представляет собой интегральный показатель

устойчивости грунтового массива вокруг выработки в процессе ее проходки. Значения f , по М. М. Протодяконову, принимаются по описанию грунта и изменяются в пределах от 0,3...0,5 для слабых дисперсных грунтов и до 20,0 для крепких кварцитов и базальтов. Именно эти значения были закреплены в нормах [14, 15] и действовали вплоть до 2012 г.

В СП 2012 г. [12, 13] для скальных грунтов коэффициент крепости, хотя и не рассчитывается напрямую, фактически определяется зависимостью

$$f = 0,1 \cdot R_c \cdot \alpha_r, \quad (5)$$

где R_c – предел прочности на одноосное сжатие, МПа; α_r – коэффициент, учитывающий влияние трещиноватости массива на прочность грунта в массиве, который изменяется от 0,1 для раздробленных скальных грунтов при $R_c = 160$ МПа до 1,7 для практически нетрещиноватых грунтов при $R_c = 10$ МПа.

Известны и другие эмпирические зависимости, связывающие f и R_c , например, формула Л. И. Барона (ед. изм. R_c – МПа):

$$f = \frac{R_c}{30} + \sqrt{\frac{R_c}{3}}. \quad (6)$$

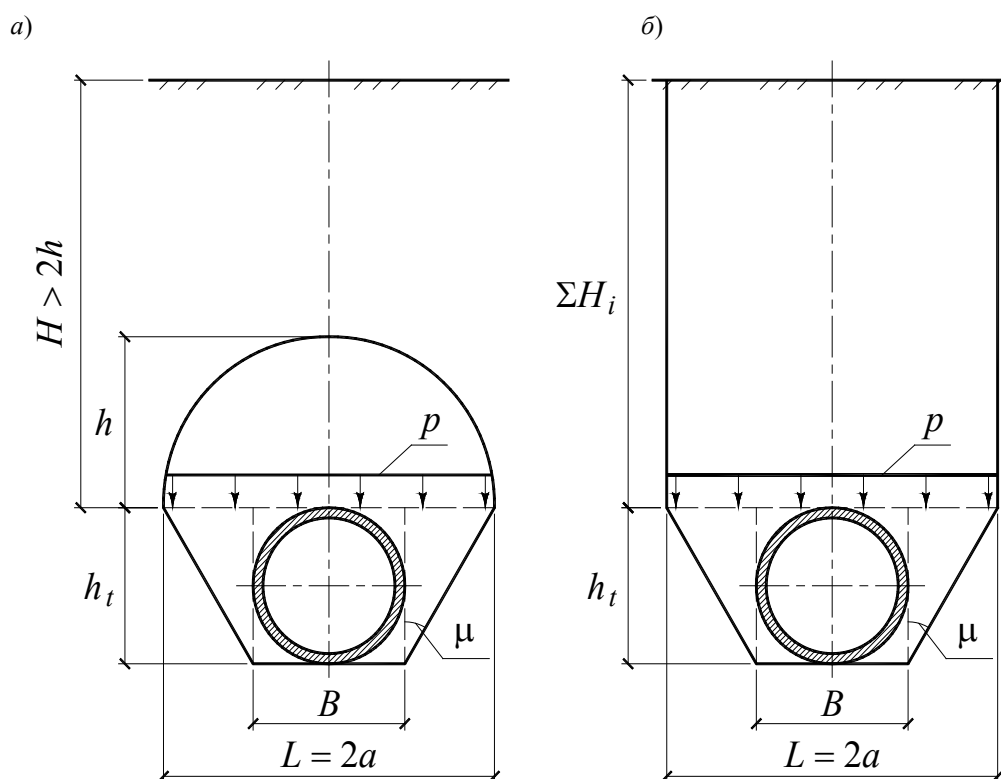


Рис. 1. Принципиальные схемы обрушения грунта над выработкой ($\mu = \pi / 4 - \varphi_k / 2$): а – свод обрушения; б – столб обрушения

Возвращаясь к нормативной методике, надо сказать, что она содержит, на наш взгляд, одно весьма спорное положение. В отличие от скальных грунтов для дисперсных грунтов величина f принимается в зависимости от вида грунта [12, табл. 5.9]. Тогда, сопоставляя значения коэффициентов крепости в скальных и дисперсных грунтах, получаем, что при $R_c = 10$ МПа и $\alpha_t = 0,9$ (как для сильнотрещиноватой скалы [12, 13])

$$f = 0,1 \cdot 10 \cdot 0,9 = 0,9,$$

т. е. столько же, сколько для переуплотненных глин твердой консистенции [12].

Это очевидным образом вступает в противоречие с базовыми положениями теории М. М. Протодяконова.

При $R_c < 10$ МПа значения коэффициентов α_t в [12] вообще не приводятся. И если даже принять максимальное значение $\alpha_t = 1,7$, то, например, при $R_c = 1$ МПа имеем:

$$f = 0,1 \cdot 1 \cdot 1,7 = 0,17.$$

То есть коэффициент крепости полускального грунта может оказаться меньше, чем у глин и суглинков полутвердой консистенции по [12] ($f = 0,6$) или чем у плавунув и болотистого грунта по М. М. Протодяконову [14] ($f = 0,3$).

Использование формулы (6) ненамного улучшает ситуацию. Так, при $R_c = 1$ МПа имеем $f = 0,6$, т. е. столько же, сколько у суглинков полутвердой консистенции, прочность и деформируемость которых даже не позволяет испытать их по схеме одноосного сжатия.

Итак, первой принципиальной проблемой нормативной методики является отсутствие общепринятых экспериментальных методов определения коэффициента крепости, величина которого играет главную роль при назначении высоты свода обрушения и, следовательно, величины горного давления.

Второй проблемой можно считать некоторую размытость определения границ между схемой свода обрушения и столба обрушения, поскольку в [12, 13] не детализировано понятие «водонасыщенные слабые глинистые грунты», в частности, отсутствуют конкретные значения физических характеристик (влажности, степени водонасыщения, показателя текучести).

Третья проблема состоит в том, что методика СП [12] содержит явное противоречие:

высота h свода обрушения в скальных и полускальных грунтах может оказаться больше, чем в дисперсных.

Цель исследования

Учитывая все вышесказанное, естественным направлением развития теории М. М. Протодяконова становится поиск такого решения, которое обеспечит:

- статический анализ системы сил, действующих на свод обрушения, на основе паспорта прочности скального грунта;
- аналитическое обоснование перехода от схемы свода обрушения к схеме столба обрушения;
- приведение в соответствие геометрических размеров сводов обрушения, возникающих в скальных, полускальных и дисперсных грунтах.

В данной статье предлагаются два взаимосвязанных варианта решения этой задачи для условий плоской деформации – для скальных и полускальных грунтов.

Решение для скальных грунтов

Расчетная схема. На рис. 2, а представлена схема силового взаимодействия свода обрушения с несмещающейся частью скального массива, окружающего выработку. Предполагается, что свод обрушения уже сформирован и по границе свода действуют предельные напряжения τ_n и σ_n .

В скальных грунтах свод имеет пологое очертание, поэтому напряжения по его контуру, очевидно, будут направлены так, как это показано на схеме. Это означает, что по всему контуру свода грунт будет работать на отрыв. В механике грунтов положительными принимаются сжимающие напряжения, по этой причине на рисунке нормальные напряжения указаны под знаком модуля.

Свод стремится обрушиться под действием собственного веса G . Этому препятствует сопротивление грунта, возникающее по контуру свода, т. е. результирующая сила напряжений τ_n и σ_n . Ее вертикальную проекцию обозначим через R . Если $G > R$, то для удержания свода необходимо дополнительно приложить к его нижней границе напряжения p , которые, по существу, представляют собой давление на крепь выработки.

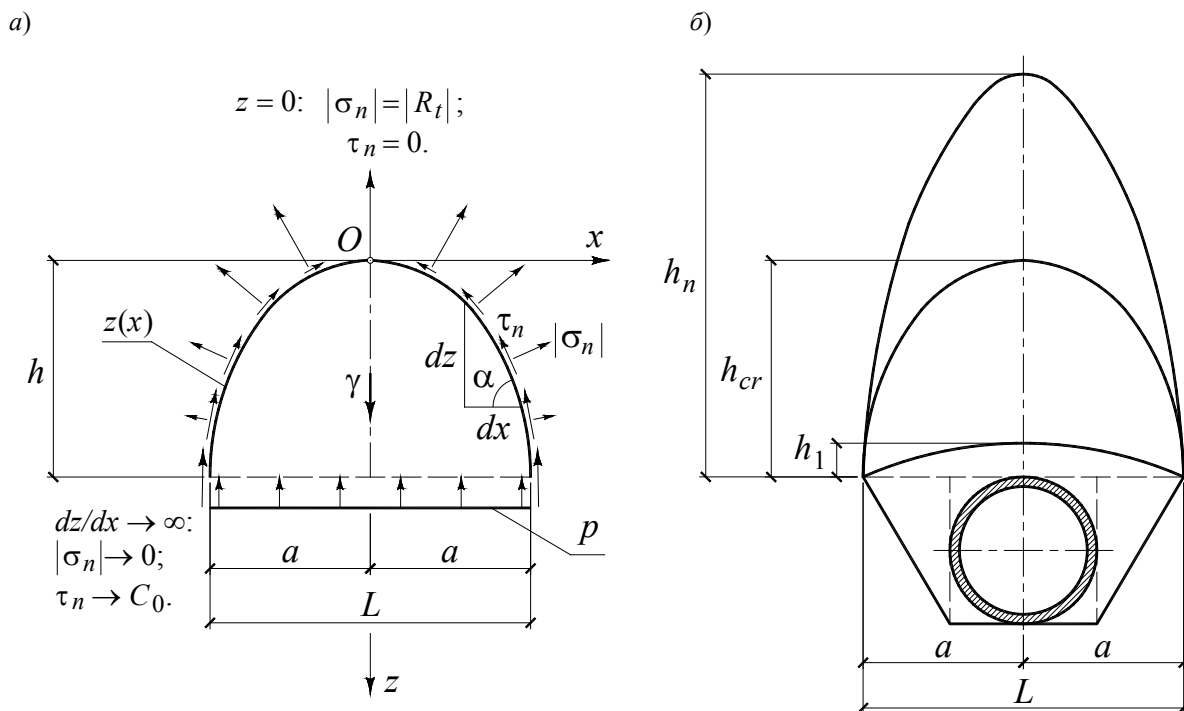


Рис. 2. Схема сил, действующих на свод обрушения в скальном грунте (а), и схема к поиску наиболее невыгодного очертания свода обрушения (б)

Общая схема решения. Исследуем систему сил, действующих на свод обрушения, при $a = \text{const}$ и при фиксированных значениях прочностных характеристик грунта. В этом случае разность между весом G свода обрушения и суммарной удерживающей силой R будет зависеть от значения высоты h свода (см. рис. 2, б):

$$F(h) = G(h) - R(h). \quad (7)$$

Можно ожидать следующее [16]:

- при малой величине h_1 грунт будет работать в основном на отрыв, причем вес свода будет столь незначителен, что для его удержания вполне будет хватать прочности грунта на растяжение;

- с увеличением высоты свода h_n грунт будет сопротивляться обрушению в основном за счет трения, причем суммарная сила трения, предположим, будет настолько значительной, что сможет удержать свод даже большого веса;

- существует некоторый интервал значений h , при которых вес свода превысит силу сопротивления грунта, или, по крайней мере, существует такое значение h_{cr} , при котором разность между весом G свода и реакцией R по контуру будет максимальной, т. е.

$$\max F(h) = G(h_{cr}) - R(h_{cr}).$$

В рамках сделанных предположений величина $F_{\max} \equiv \max F(h)$ может оказаться как больше нуля, так и меньше нуля. В первом

случае давление грунта на крепь выработки определится как

$$p = \frac{F_{\max}}{L \cdot 1}.$$

Если $F_{\max} < 0$, давление на крепь выработки отсутствует, так как в этом случае прочности грунта достаточно для удержания свода любой высоты, и обрушения грунта теоретически не произойдет.

По существу, описанная схема решения является уточнением классической задачи В. Риттера [1]. Отличие состоит в том, что здесь учитываются предельные касательные напряжения по контуру свода.

Для того чтобы определиться с видом функции (7), введем еще три гипотезы.

Гипотеза 1. Функцию, описывающую контур свода обрушения, примем в виде

$$z = h \cdot (x/a)^n. \quad (8)$$

В принципе, можно поставить задачу отыскать сам вид функции $z(x)$, при котором $F(h)$ достигнет максимума. Однако в данном случае будем отталкиваться от классической теории сводообразования [1, 10], в рамках которой очертание свода обрушения описывается квадратной параболой, т. е. $n = 2$.

Гипотеза 2. Как уже сказано выше, в момент обрушения свода по его контуру будут действовать предельные напряжения τ_n и σ_n .

Эти напряжения предлагается определять по паспорту прочности грунта (рис. 3). Свяжем τ_n и σ_n уравнением нелинейной огибающей предельных кругов Мора, которое запишем в виде

$$\tau_n = C_0 \left(1 - \frac{\sigma_n}{R_t} \right)^m, \quad (9)$$

где C_0 – сопротивление грунта сдвигу при $\sigma_n = 0$; R_t – предел прочности на одноосное растяжение; m – параметр кривой.

Как и прочность на одноосное сжатие R_c , величины C_0 , R_t , m определяются по результатам стандартных испытаний скальных грунтов – на одноосное сжатие, одноосное растяжение и объемное сжатие [17]. Тем самым предлагается отказ от коэффициента крепости в пользу характеристик, для которых существуют апробированные нормативные методы лабораторного определения.

Гипотеза 3. Введем гипотезу относительно распределения напряжений τ_n и σ_n по границе свода обрушения. В вершине свода действуют предельные растягивающие напряжения σ_n , равные прочности грунта на одноосное растяжение R_t , а касательные напряжения τ_n равны нулю (см. рис. 2, а). Следуя вниз по контуру свода, величина $|\sigma_n|$ уменьшается, а касательные напряжения τ_n возрастают согласно (9). Для скальных грунтов можно предположить, что по мере того, как контур свода стремится к вертикали, нормальные напряжения стремятся к нулю, а касательные – к величине C_0 (см. рис. 2, а). В соответствии со сказанным примем следующее распределение нормальных напряжений по границе свода:

$$|\sigma_n| = |R_t| \cos \alpha, \quad (10)$$

где α – угол между касательной к контуру свода и осью Ox .

Основное уравнение свода в скальных грунтах. Запишем выражение для суммарной вертикальной силы сопротивления грунта отрыву и сдвигу на границе свода обрушения:

$$R(h) = 2 \int_0^a (|\sigma_n| \cos \alpha + \tau_n \sin \alpha) dl,$$

где $dl = dx / \cos \alpha$ (см. рис. 2, а).

Подставим в данную формулу выражения (8)–(10) и, учитывая, что $\tan \alpha = dz / dx \equiv z'(x)$, после элементарных преобразований имеем:

$$R(h) = 2 \int_0^a \left[\frac{|R_t|}{\sqrt{1+z'(x)^2}} + z'(x) C_0 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+z'(x)^2}} \right)^m \right] dx, \quad (11)$$

где $z'(x) = n \cdot h \cdot (x/a)^{n-1}$.

Собственный вес свода обрушения равен:

$$G(h) = 2\gamma ah - 2\gamma \int_0^a z(x) dx, \quad (12)$$

где $z(x)$ – уравнение контура свода, которое здесь принято в виде (8).

Подставим выражения (11) и (12) в равенство (7) и численно исследуем функцию $F(h)$ на экстремум.

Анализ результатов решения для скальных грунтов. Вычисления осуществлялись в относительных переменных: $a = 1$ – единица длины, $\gamma = 1$ – единица объемного веса. Соответственно, γa – единица напряжений. Параметры огибающей (9) предельных кругов Мора примем равными: $R_t = -0,1 \cdot R_c$; $C_0 = 0,25 \cdot R_c$;

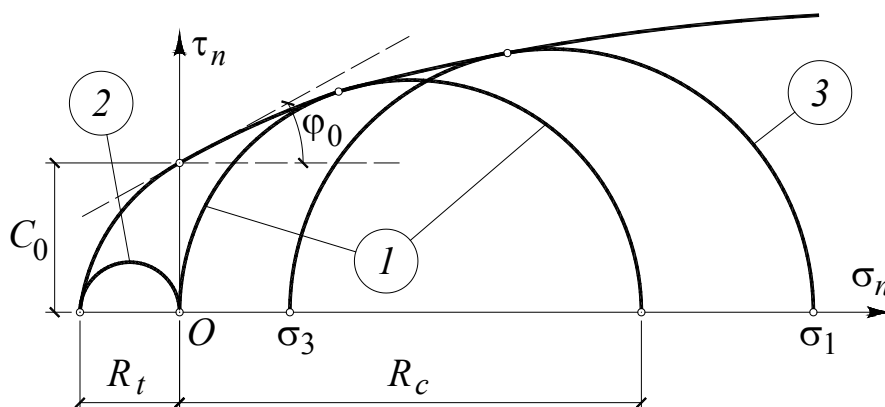


Рис. 3. Паспорт прочности грунта и огибающая предельных кругов Мора, полученных в испытаниях:

1 – на одноосное сжатие; 2 – на одноосное растяжение; 3 – на объемное сжатие

$m = 0,44$. На рис. 4 показаны графики $p(h) = F(h) / (2a \cdot 1)$ для $R_c = 2,5$, $R_c = 2,8$ и $R_c = 3,0$.

Анализ полученных результатов позволяет сделать принципиально важный вывод. При любой наперед заданной ширине свода обрушения в зависимости от прочности грунта возможны три принципиально различные схемы потери устойчивости грунта над выработкой:

1) если $p(h) < 0$ при любом h , то потери устойчивости грунта не происходит, так как прочности грунта достаточно для удержания любого свода обрушения (см. рис. 4, кривая $R_c = 3,0$);

2) если $p(h) > 0$ на некотором интервале значений h , то формируется свод обрушения высотой h , которая отвечает максимуму функции p на этом интервале (см. рис. 4, кривая $R_c = 2,8$);

3) если $p(h) \rightarrow \infty$ при $h \rightarrow \infty$, то давление грунта на крепь тем больше, чем выше значение h , т. е. фактически это означает, что потеря устойчивости грунта над выработкой будет происходить по схеме столба обрушения (см. рис. 4, кривая $R_c = 2,5$).

Аналогично, если задаться каким-либо значением $R_c = \text{const}$ и изменять величину $a = L / 2$, то, как показали результаты расчетов, существуют два критических значения пролета свода обрушения $L_{кр1}$ и $L_{кр2}$ такие, что:

– при $L < L_{кр1}$ грунт над выработкой будет устойчив, поэтому крепления выработки не требуется;

– при $L_{кр1} \leq L \leq L_{кр2}$ потеря устойчивости грунта над выработкой будет реализована по схеме свода обрушения, следовательно, необ-

ходимо крепление выработки, а горное давление может быть принято равным весу свода обрушения;

– при $L \geq L_{кр2}$ над выработкой образуется столб обрушения, и тогда на крепь будет действовать давление, равное бытовому давлению на этой глубине.

Определение критических пролетов удобно выполнять при $R_c = 1$ и $\gamma = 1$. Остальные параметры прочности оставим такими же: $R_t = -0,1 \cdot R_c$; $C_0 = 0,25 \cdot R_c$; $m = 0,44$. В результате расчета установлено: $L_{кр1} = 0,672$ и $L_{кр2} = 0,750$. Переход от относительных величин пролетов $L_{кр1}$ и $L_{кр2}$ к фактическим осуществляется по формулам:

$$L_{кр1, \text{факт}} = \frac{R_c}{\gamma} \cdot L_{кр1}, \quad L_{кр2, \text{факт}} = \frac{R_c}{\gamma} \cdot L_{кр2}.$$

Значения $L_{кр1}$ дают явно завышенные значения пролетов, при которых крепи не требуется. В то же время значения $L_{кр2}$ определяют переход к схеме столба обрушения в ситуациях, не предусмотренных в СП, и вполне могут использоваться на практике.

Связь между шириной B выработки и пролетом L свода обрушения предлагается определять по формуле (2) с заменой кажущегося угла внутреннего трения ϕ_k на угол ϕ_0 касательной к огибающей кругов Мора в точке $\sigma_n = 0$ [17].

Таким образом, предлагается ввести понятие двух критических пролетов выработки. Первый критический пролет (или ширина) $B_{кр1}$ выработки отделяет полностью устойчивое состояние грунта при проходке от потери устойчивости по схеме свода обрушения. Второй критиче-

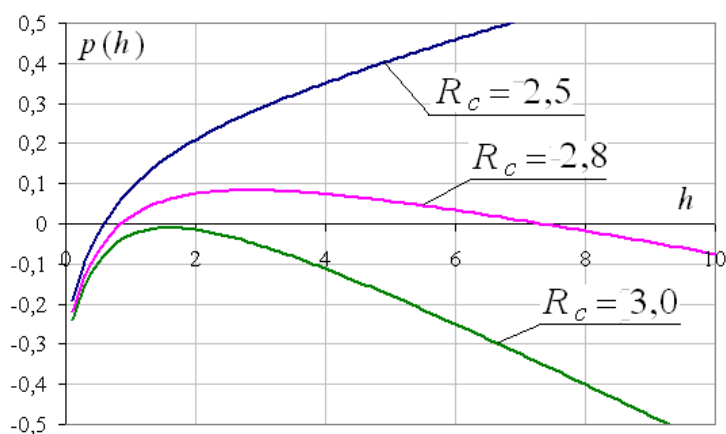


Рис. 4. Графики горного давления $p(h)$ для разных значений R_c (для скальных грунтов)

ский пролет (или ширина) $B_{кр2}$ выработки отделяет схему образования свода обрушения от схемы образования столба обрушения.

Если $B \leq B_{кр2}$, то величину горного давления предлагается рассчитывать по формуле (3) при таком значении h , которое отвечает $p_{max}(h)$, т. е. наиболее опасному очертанию свода обрушения. Если $B \geq B_{кр2}$, то горное давление следует рассчитывать по формуле (4).

В заключение еще раз подчеркнем, что вводимые здесь критические ширины $B_{кр1}$ и $B_{кр2}$ существуют для любых грунтов, для которых можно построить паспорт прочности.

Решение для полускальных грунтов

Расчетная схема. Необходимость отдельного решения для полускальных грунтов вызвана тем, что в предыдущем решении подразумевалось растяжение по всему контуру свода обрушения. В менее прочных полускальных грунтах согласно теории М. М. Протодьяконова можно ожидать формирования более подъемистых сводов. Следовательно, в процессе деформирования, даже в начальный момент потери устойчивости, ближе к основанию свода могут возникнуть распорные усилия. Другими словами, если в вершине свода имеет место растяжение и отрыв, то ниже по контуру свода вполне вероятно появление сжимающих напряжений в результате распора.

Расчетная схема показана на рис. 5. Как и в решении для скальных грунтов, здесь положительными являются сжимающие напряжения. В теле свода обрушения действуют вертикальные σ_z и горизонтальные σ_x напряжения. По контуру свода действуют предельные нормальные σ_n и касательные τ_n напряжения. Касательными напряжениями внутри свода, допустим, можно пренебречь.

С точки зрения техники построения решения данная схема может рассматриваться как комбинация известных решений В. Риттера и Янсена-Кеттера [1, 10] с оптимизацией величины горного давления по высоте свода. С другой стороны, это можно трактовать как приложение решений В. Г. Федоровского [18] и Цзиньгоу Пена [19] к задаче об устойчивости грунта над выработкой. Иногда подобные схемы относят к методу элементарного горизонтального слоя.

Основные уравнения. Итак, запишем уравнения равновесия всех сил, действующих на элементарный горизонтальный слой мощностью dz :

$$\begin{aligned} \sigma_x dz - \sigma_n dl \sin \alpha - \tau_n dl \cos \alpha &= 0; \\ \sigma_z x - (\sigma_z + d\sigma_z)(x + dx) + \sigma_n dl \cos \alpha - \\ - \tau_n dl \sin \alpha + \gamma dV &= 0. \end{aligned}$$

Поскольку, как следует из геометрии,

$$dl = \frac{dx}{\cos \alpha}, \quad dl = \frac{dz}{\sin \alpha}, \quad dV = \frac{2x + dx}{2} dz \times 1,$$

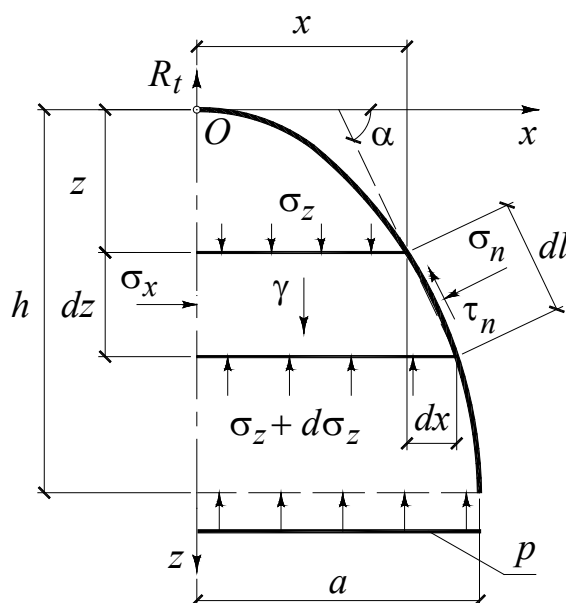


Рис. 5. Расчетная схема по методу горизонтального слоя

то, пренебрегая величинами высшего порядка малости, имеем:

$$\sigma_x = \tau_n x' + \sigma_n; \quad (13)$$

$$\sigma_z' + (\sigma_z - \sigma_n) \frac{x'}{x} + \tau_n \frac{1}{x} - \gamma = 0, \quad (14)$$

здесь $x' \equiv dx / dz = \operatorname{ctg} \alpha$; $\sigma_z' \equiv d\sigma_z / dz$.

Горизонтальные и вертикальные напряжения свяжем зависимостью

$$\sigma_x = K_0 \sigma_z,$$

где K_0 – коэффициент бокового давления, который, предположим, можно принять постоянным в пределах свода.

Тогда уравнение (13) примет вид:

$$K_0 \sigma_z = \tau_n x' + \sigma_n. \quad (15)$$

Очертание свода примем по уравнению (8), которое здесь удобнее представить в виде

$$x = a \cdot (z / h)^{\frac{1}{n}}.$$

Касательные τ_n и нормальные σ_n напряжения на границе свода будут связаны уравнением (9) огибающей предельных кругов Мора.

В результате имеем дифференциальное уравнение (14), на которое наложены алгебраические ограничения (8), (9) и (15).

Отметим, что в отличие от решения для скальных грунтов здесь нет необходимости вводить гипотезу (10).

Поскольку по границе свода действуют предельные напряжения, то в верхней точке $z = 0$ должно быть

$$\sigma_z(0) = \sigma_n(0) = R_t.$$

Основным результатом решения будет значение вертикальных напряжений в теле свода обрушения в уровне $z = h$:

$$p = \sigma_z(h).$$

Величина p , как и ранее, представляет собой давление, которое будет действовать на крепь при высоте h свода обрушения. Поставим задачу найти такое значение h , при котором давление p было бы максимальным.

Поиск $p_{\max}(h)$ будем осуществлять в тех же относительных переменных, что и в решении для скальных грунтов: $a = 1$ – единица длины, $\gamma = 1$ – единица объемного веса.

Анализ результатов решения для полускальных грунтов. Приведем некоторые результаты расчета для тех же исходных данных, что и ранее: $R_t = -0,1 \cdot R_c$; $C_0 = 0,25 \cdot R_c$; $m = 0,44$. На рис. 6 даны графики функции $p(h)$

при различных значениях R_c и различных величинах коэффициента бокового давления K_0 .

В целом поведение графиков $p(h)$ совпадает с тем, что было получено в скальных грунтах (см. рис. 4). Здесь также подтверждается основной вывод о трех схемах потери устойчивости грунта над выработкой – полностью устойчивое состояние, свод обрушения и столб обрушения. Вместе с тем решение для полускальных грунтов приводит к более высоким значениям R_c , которые бы обеспечивали полностью устойчивое состояние грунта над выработкой. Так, если в решении для скальных грунтов обрушения не должно было произойти при $R_c = 3$, то здесь полностью безопасное состояние требует прочности $R_c \approx 4$ при $K_0 = 0,01$ (см. рис. 6, а) и $R_c \approx 5$ при $K_0 = 0,99$ (см. рис. 6, в). Кроме того, несколько меняется сам характер графиков от $K_0 = 0,01$ до $K_0 = 0,99$.

Отметим еще одну особенность данных решений. В теле свода обрушения могут возникать растягивающие напряжения σ_z , превышающие предел прочности R_t (рис. 7). Данный эффект проявляется тем сильнее, чем меньше величина K_0 и больше значение h .

С физической точки зрения это означает, что при таких значениях K_0 и h формирование свода обрушения невозможно, поскольку для того, чтобы по контуру возникли предельные напряжения, необходимо приложить дополнительную растягивающую нагрузку внутри свода.

Общий анализ результатов и некоторые сопоставительные оценки

Выполним сопоставление значений высоты свода обрушения, полученных по различным методам.

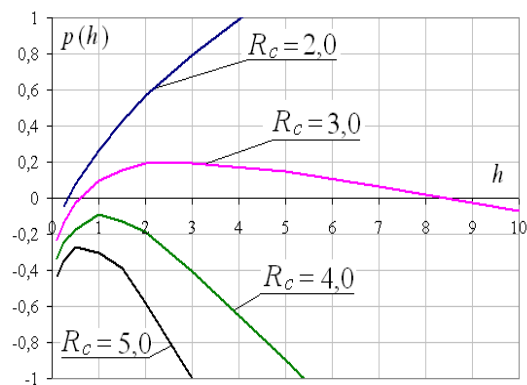
Согласно базовому определению (1)

$$h = \frac{a}{f}.$$

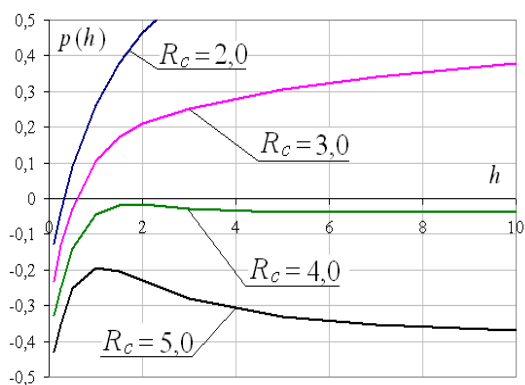
Здесь коэффициент крепости f вычислим по формуле (5) [12, 13] и по формуле Барона (6). Полученные значения сравним с величинами h , при которых достигался максимум функции $p(h)$ в представленных выше решениях для скальных и полускальных грунтов.

В качестве примера примем свод обрушения пролетом $L = 10$ м, а удельный вес грунта над выработкой $\gamma = 20$ кН/м³. В таблице представлены следующие результаты: $h_{\text{сп}}$ – значе-

а)



б)



в)

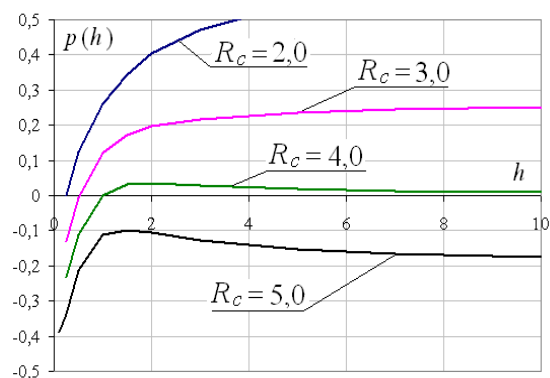


Рис. 6. Графики горного давления $p(h)$ для разных значений R_c (для полускальных грунтов):

а – при $K_0 = 0,01$; б – при $K_0 = 0,5$; в – при $K_0 = 0,99$

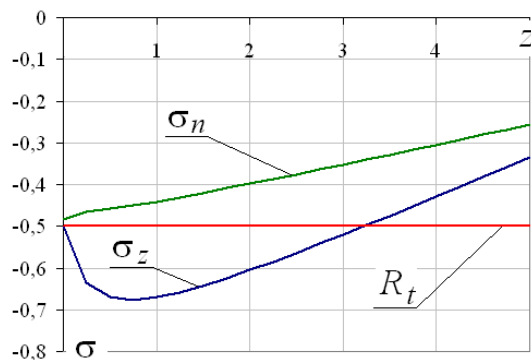


Рис. 7. Графики $\sigma_z(z)$ и $\sigma_n(z)$ при больших значениях h и малых значениях K_0

Сопоставительные значения высоты свода обрушения, м

R_c , МПа	$f_{СП}$	$f_{Барон}$	$h_{СП}$	$h_{Барон}$	$h_{ск}$	$h_{K=0,01}$	$h_{K=0,5}$	$h_{K=0,99}$
0,2	0,02	0,26	250,00	18,90	Столб	Столб	Столб	Столб
0,3	0,03	0,33	167,00	15,30	7,99	12,50	Столб	Столб
0,4	0,04	0,38	125,00	13,20	3,21	3,50	9,00	9,5
0,5	0,05	0,42	100,00	11,80	2,14	3,00	5,50	7,5
0,7	0,07	0,51	71,40	9,87	1,31	2,50	3,50	6,0
1,0	0,10	0,61	50,00	8,19	0,82	1,50	2,50	5,0
1,5	0,15	0,76	33,30	6,60	0,50	0,77	1,50	4,8
2,0	0,20	0,88	25,00	5,66	0,35	0,73	1,00	4,6
3,0	0,30	1,10	16,70	4,55	0,22	0,50	0,75	4,4
5,0	0,50	1,46	10,00	3,43	0,12	0,47	0,55	4,1
7,5	0,75	1,83	6,67	2,73	0,07	0,28	0,50	4,0
10,0	1,00	2,16	5,00	2,32	0,05	0,25	0,48	3,5

ния, рассчитанные по методике СП [12, 13], т. е. по формулам (1) и (5); $h_{\text{Барон}}$ – значения, рассчитанные на основании формул (1) и (6); $h_{\text{СК}}$ – значения, рассчитанные по изложенной выше методике для скальных грунтов; $h_{K=0,01}$, $h_{K=0,5}$, $h_{K=0,99}$ – значения, рассчитанные по предлагаемой методике для полускальных грунтов при коэффициентах бокового давления, равных соответственно $K_0 = 0,01$, $K_0 = 0,5$ и $K_0 = 0,99$.

На первый взгляд, цифры, полученные по предлагаемым методикам (особенно $h_{\text{СК}}$ и $h_{K=0,01}$), чрезвычайно занижают значения высоты свода обрушения. Однако следует обратить внимание на величины коэффициента крепости $f_{\text{СП}}$ и $f_{\text{Барон}}$, рассчитанные по формулам (5) и (6). Так, методика СП устанавливает $f_{\text{СП}} = 1$ (без учета коэффициента α_r) для скального грунта с $R_c = 10$ МПа, т. е. столько же, сколько в твердых глинах. Далее, формула Барона дает $f_{\text{Барон}} = 0,6$ для полускального грунта с $R_c = 1$ МПа, т. е. столько же, сколько в полутвердых суглинках. Это обстоятельство нами уже отмечалось выше.

Учитывая сказанное, значения $h_{\text{СП}}$ и $h_{\text{Барон}}$ едва ли можно считать эталонными, особенно для полускальных грунтов. Например, в полускальных грунтах с $R_c = 1$ МПа образование свода высотой $h_{\text{СП}} = 50$ м при $L = 10$ м маловероятно, и более правдоподобными выглядят значения $h_{\text{Барон}} = 8,19$ м или $h_{K=0,99} = 5$ м. Для этого же случая величина $h_{K=0,01} = 1,5$ м, скорее всего, будет заниженной, поэтому для применения результатов решений, полученных при малых K_0 , следует тщательно обосновывать значение коэффициента бокового давления. К слову, небольшие значения K_0 справедливы для скальных грунтов, причем обычно они составляют порядка 0,2...0,25.

Что касается значений $h_{\text{СК}}$, то, с одной стороны, они также могут показаться сильно заниженными. С другой стороны, согласно п. 5.6.4.15 СП 120.13330.2012, «при высоте свода обрушения скального грунта менее 1/6

его пролета расчет подземных конструкций следует выполнять на воздействие вывалов» [12]. То есть в данном случае кардинально меняется схема приложения горного давления.

Схема вывала не является предметом данного исследования. Более того, моделирование данной ситуации, по нашему мнению, требует перехода к вероятностным методам анализа. Поэтому расчет по схеме вывала, на наш взгляд, следует выполнять уже по [12, 13], что несколько увеличит запас прочности. Таким образом, результаты расчета по предлагаемой методике для скального грунта будут в основном выполнять роль критерия, определяющего переход к схеме вывала, принятой в нормативных документах, а применение формул (1) и (5) уже в рамках схемы вывала даст дополнительный запас прочности.

Наиболее близки к существующим методикам результаты, полученные для полускальных грунтов при $K_0 = 0,99$. Эти величины занимают промежуточное положение между $h_{\text{СП}}$ и $h_{\text{Барон}}$ при $R_c > 3$ МПа.

Основные выводы

Получено решение об устойчивости массива вокруг подземной выработки с использованием стандартных параметров прочности скальных и полускальных грунтов.

Показано, что в любом грунте, для которого можно опытным путем построить паспорт прочности, существуют три схемы потери устойчивости: полностью устойчивое состояние, свод обрушения и столб обрушения. Реализация той или иной схемы для данного грунта зависит от ширины (пролета) выработки. На этом основании предлагается ввести понятие о двух критических пролетах подземных выработок.

Предлагаемые методики в ряде случаев позволяют более достоверно спрогнозировать горное давление, чем нормативная методика.

Список источников

1. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов. М. : Недра, 1980. 360 с.
2. Геомеханика / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия, А. Н. Шашенко, В. Н. Борисов. В 2 т. Т. 2. Геомеханические процессы. М. : Издательство Московского государственного университета, 2004. 249 с.
3. Картозия Б. А. Традиционная инженерная задача геомеханики // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 1. С. 236–245.
4. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. М. : Недра, 1989. 270 с.

5. Фотиева Н. Н., Воронина И. Ю. Исследование влияния сооружения сервисного тоннеля на напряженное состояние обделок параллельных подводных тоннелей // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. Вып. 3. С. 125–134.
6. Фролов Ю. С., Шэнь Ц. Влияние методов поэтапного раскрытия выработки большого пролета на напряженно-деформированное состояние системы «крепь – грунтовый массив» // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 1 (48). С. 73–83.
7. Литвинский Г. Г. Запредельное поведение пород вокруг горной выработки (порождающее решение) // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2017. № 6 (49). С. 5–14.
8. Панфилова Д. В., Ремезов А. В. Анализ методик расчета горного давления, возникающего при ведении очистных работ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2005. № 4-1 (48). С. 48–52.
9. Саммаль А. С., Фотиева Н. Н., Деев П. В. Оценка устойчивости пород вокруг горных выработок при тектонических и сейсмических воздействиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 5. С. 186–189.
10. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Два случая запредельного деформирования массива пород вокруг горной выработки // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 2, № 5. С. 81–88.
11. Зерцалов М. Г. Механика скальных грунтов и скальных массивов. М. : Юриспруденция, 2003. 184 с.
12. СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095542> (дата обращения: 15.02.2022).
13. СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095544> (дата обращения: 15.02.2022).
14. СНиП II-44-78. Тоннели железнодорожные и автодорожные. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200041182> (дата обращения: 15.02.2022).
15. СНиП 32-04-97. Тоннели железнодорожные и автодорожные. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901701418> (дата обращения: 15.02.2022).
16. Королев К. В., Стахнев Я. О., Жукова Е. Н. К вопросу о горном давлении и сводообразовании // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений : труды VI Международной конференции (Екатеринбург, 10–11 апреля 2019 г.). Екатеринбург, 2019. С. 209–215.
17. ГОСТ 21153.8–88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023978> (дата обращения: 15.02.2022).
18. Федоровский В. Г., Безволев С. Г. Метод расчета свайных полей и других вертикально армированных грунтовых массивов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1994. № 3. С. 11–15.
19. Junguo Peng Simplified Method for Calculating Active Earth Pressure Against Rigid Retaining Walls for Cohesive Backfill // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. Vol. 55. P. 374–379.

References

1. Borisov A. A. Mechanics of rocks and massifs. M.: Nedra; 1980. 360 p. (In Russ.).
2. Baklashov I. V., Kartoziya B. A., Shashenko A. N., Borisov V. N. Geomechanics. In 2 volumes. M.: Publishing House of Moscow State University, 2004. Vol. 2. Geomechanical processes. 249 p. (In Russ.).
3. Kartoziya B. A. The traditional engineering problem of geomechanics. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;(1):236–245. (In Russ.).
4. Bulychov N. S. Mechanics of underground structures in examples and problems. M.: Nedra; 1989. 270 p. (In Russ.).
5. Fotieva N. N., Voronina I. Yu. Investigation of the influence of the construction of a service tunnel on the stress state of parallel underwater tunnel linings. *News of the Tula State University. Earth Sciences*. 2015;3:125–134. (In Russ.).
6. Frolov Yu. S., Shen Ts. The influence of the methods of step-by-step opening of the large span development on the stress-strain state of the support – soil mass system. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(48):73–83.
7. Litvinsky G. G. The transcendental behavior of rocks around mining (generating solution). *Collection of scientific papers of the State Educational Institution of the LPR DonGTU*. 2017;(49):5–14. (In Russ.).
8. Panfilova D. V., Remezov A. V. Analysis of methods for calculating the mountain pressure arising during the conduct of cleaning operations. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2005;(48):48–52. (In Russ.).
9. Sammal A. S., Fotieva N. N., Deev P. V. Assessment of rock stability around mine workings under tectonic and seismic impacts. *Mining information and analytical Bulletin*. 2003;(5):186–189. (In Russ.).

10. Chanyshiev A. I., Abdulin I. M. Two cases of extreme deformation of the rock mass around the mining. *Interexpo Geo-Siberia*. 2019;2(5):81–88. (In Russ.).
11. Zertsalov M. G. Mechanics of rocky soils and rock massif. M.: Publishing House Jurisprudence; 2003. 184 p. (In Russ.).
12. SP 120.13330.2012. Subways. Updated version of SNiP 32-02-2003. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095542>.
13. SP 122.13330.2012. Railway and road tunnels. Updated version of SNiP 32-04-97. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095544>.
14. SNiP II-44-78. Railway and road tunnels. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200041182>.
15. SNiP 32-04-97. Railway and road tunnels. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901701418>.
16. Korolev K. V., Stakhnev Ya. O., Zhukova E. N. On the issue of mountain pressure and vaulting. *In the collection: Design, construction and operation of complexes of underground structures. Proceedings of the VI International Conference*. 2019. P. 209–215. (In Russ.).
17. GOST 21153.8-88. Rocks are mountainous. Method for determining the ultimate strength in volumetric compression. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023978>.
18. Fedorovsky V. G., Bezvoley S. G. Method of calculation of pile fields and other vertically reinforced soil massifs. *Foundations, foundations and mechanics of soils*. 1994;(3):11–15. (In Russ.).
19. Junguo Peng. Simplified Method for Calculating Active Earth Pressure Against Rigid Retaining Walls for Cohesive Backfill. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2019;55:374–379.

Информация об авторах

К. В. Королёв – заведующий кафедрой «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, доцент, профессор.

Я. О. Стахнев – аспирант кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

K. V. Korolev – Head of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor.

Ya. O. Stakhnev – Post-graduate Student of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 07.04.2022; одобрена после рецензирования 15.04.2022; принята к публикации 18.04.2022.

The article was submitted 07.04.2022; approved after reviewing 15.04.2022; accepted for publication 18.04.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.131

doi 10.52170/1815-9265_2022_61_116

Анализ устойчивости оползневого склона в г. Сочи

Александр Михайлович Караулов¹, Александр Николаевич Донец^{2✉},
Юрий Николаевич Савельев³

^{1, 2, 3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ karaulov_am@mail.ru

² donetsan@me.com ✉

³ savelev-1953@mail.ru

Аннотация. В статье приводится методика оценки устойчивости оползневого склона неоднородного геологического строения, с учетом планируемой нагрузки и сейсмических воздействий. При выполнении расчета реального объекта – оползневого склона в г. Сочи основное внимание уделяется анализу полученных результатов в аспекте их надежности. Оползневые склоны отличаются особой сложностью как в геологическом строении, так и в отношении действующих на них нагрузок и природных факторов. Для анализа поведения таких сложных геотехнических объектов в настоящее время предлагается целый ряд программных комплексов, основанных на методе конечных элементов.

В рамках этих комплексов возможен учет разнообразных начальных и граничных условий. Однако в части упругопластической работы грунтовых массивов есть определенные сложности, связанные именно с оценкой предельного состояния. Поэтому на практике для этой цели применяются методы предельного равновесия.

В научной и нормативной литературе по геотехнике приводится большое количество различных методов оценки устойчивости склонов. Вместе с тем наиболее обоснованным можно признать подход к расчету устойчивости грунтовых массивов, основанный на линейном программировании и реализуемый симплекс-методом. В рамках расчетной схемы методов отсеков обеспечивается выполнение статических уравнений равновесия без привлечения дополнительных гипотез, что существенно повышает достоверность результатов. Данное направление еще не получило широкого распространения в практике проектирования откосов и склонов. В определенной степени это обусловлено тем, что методы линейного программирования не нашли еще массового применения в механике сплошной среды. Хотя некоторый прогресс здесь наблюдается.

Разработка конкретных алгоритмов расчета устойчивости симплекс-методом, в частности оползневых склонов, безусловно, является актуальной задачей, которой и посвящена настоящая статья.

Ключевые слова: теория устойчивости грунтов, оползни, симплекс-метод, геологическое строение

Для цитирования: Караулов А. М., Донец А. Н., Савельев Ю. Н. Анализ устойчивости оползневого склона в г. Сочи // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 116–122. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_116.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Analysis of the stability of the landslide slope in Sochi

Aleksandr M. Karaulov¹, Aleksandr N. Donets^{2✉}, Yuriy N. Savelyev³

^{1, 2, 3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ karaulov_am@mail.ru

² donetsan@me.com ✉

³ savelev-1953@mail.ru

Abstract. The article presents a methodology for assessing the stability of a landslide slope, an inhomogeneous geological structure, taking into account the planned load and seismic impacts. When considering the calculation of the real object of the landslide slope in Sochi, the main attention is paid to the analysis of the results obtained with respect to their reliability. Landslide slopes are particularly complex both in their geological structure and in relation to the loads and natural factors acting on them. To analyze the behavior of such complex

geotechnical objects, a number of software packages based on the finite element method are currently being proposed.

Within the framework of these complexes, it is possible to take into account a wide variety of initial and boundary conditions. However, with regard to the elastic-plastic work of soil massifs, there are certain difficulties associated precisely with the assessment of the limit state. Therefore, in practice, limit equilibrium methods are used for this purpose.

The scientific and regulatory literature on geotechnics provides a large number of different methods for assessing the stability of slopes. At the same time, the approach to calculating the stability of soil massifs based on linear programming and implemented by the simplex method can be recognized as the most reasonable. Here, within the framework of the calculation scheme of the compartment methods, static equilibrium equations are performed without involving additional hypotheses, which significantly increases the reliability of the results. This direction has not yet become widespread in the practice of designing slopes and slopes. To a certain extent, this is due to the fact that linear programming methods have not yet found mass application in continuum mechanics. Although some progress is being observed here.

Therefore, the development of specific algorithms for calculating stability by the simplex method, in particular landslide slopes, seems to be an urgent task, to which this article is devoted.

Keywords: soil stability theory, landslides, simplex method, geological structure

For citation: Karaulov A. M., Donets A. N., Savelyev Yu. N. Analysis of the stability of the landslide slope in Sochi. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):116–122. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_116.

Введение

Оценка устойчивости оползневых склонов может выполняться в настоящее время в двух вариантах – с помощью численного моделирования и путем расчета предельного равновесия. В качестве преимуществ численного моделирования можно назвать универсальность и возможность учета реальных условий и силовых воздействий [1, 2]. При этом порог устойчивости – коэффициент запаса – строго не формулируется. В данной статье мы не будем рассматривать этот вариант.

Из приближенных методов анализа предельного равновесия используется расчетная схема методов отсеков и, как правило, для условий плоской деформации [3, 4]. Это обусловлено чрезвычайной сложностью начальных и граничных условий оползневых склонов. Тем не менее

именно это направление является основным при принятии решений относительно степени устойчивости откосов и склонов.

Критический анализ существующих решений

С целью анализа существующих решений примем классификацию методов отсеков для условий плоской деформации по количеству статических уравнений равновесия, которые учитываются при выводе расчетных зависимостей, и обратимся к трем характерным группам методов [3].

На рис. 1 показана расчетная схема методов отсеков. Линией скольжения выделена область предполагаемого обрушения склона, которая разбита вертикальными линиями на отдельные отсеки.

Наибольшей популярностью пользуется метод Терцаги [5], в котором принимается во

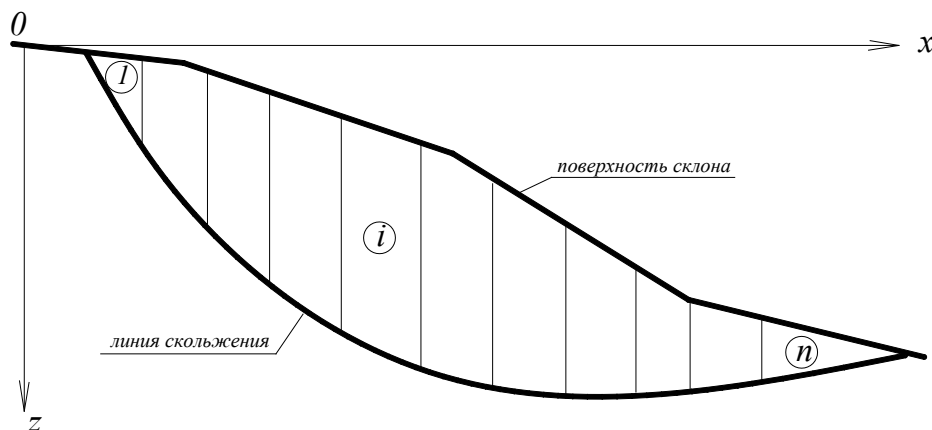


Рис. 1. Расчетная схема методов отсеков

внимание равновесие в вертикальном направлении. На рис. 2, а показана система учитываемых сил: вертикальный вес G_i плюс внешняя нагрузка P_i (раскладываемые на две компоненты – N_i , Q_i) и сила трения T_i , определяемая законом Кулона. Выражение для этих сил имеют вид

$$\begin{aligned} N_i &= (G_i + P_i) \cos \alpha_i; \\ Q_i &= (G_i + P_i) \sin \alpha_i; \\ T_i &= N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где l_i , α_i – длина подошвы отсека и ее наклон к горизонтали соответственно; c_i , φ_i – удельное сцепление и угол внутреннего трения грунта по подошве отсека соответственно.

В методе Терцаги коэффициент устойчивости k_{st} имеет традиционное определение – отношение удерживающих сил к сдвигающим:

$$k_{st} = \sum_{i=1}^n T_i / \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^n T_i$ и $\sum_{i=1}^n Q_i$ – суммы удерживающих и сдвигающих сил по линии скольжения соответственно.

Не меньшей популярностью пользуется метод Бишопа [6], в котором учитывается статическое равновесие в вертикальном и горизонтальном направлениях. При этом, однако, силы взаимодействия между отсеками принимаются горизонтальными. Система сил в методе Бишопа показана на рис. 2, б. Далее, коэффициент устойчивости k_{st} формулируется в виде отношения

$$k_{st} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_u} = \frac{c}{c_u}, \quad (3)$$

где φ и c – фактические значения прочностных характеристик грунта; φ_u и c_u – их предельные значения, при которых произойдет разрушение массива.

Для определения коэффициента устойчивости в методе Бишопа предлагается трансцендентное уравнение

$$k_{st} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{st} (G_i + P_i) - c_i l_i \sin \alpha_i + c_i l_i}{\sum_{i=1}^n \cos \alpha_i (k_{st} \operatorname{ctg} \varphi_i + \operatorname{tg} \alpha_i)} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i + P_i) \sin \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \cos \alpha_i (k_{st} \operatorname{ctg} \varphi_i + \operatorname{tg} \alpha_i)}. \quad (4)$$

В части оценки устойчивости симплекс-методом постановка задачи начинается с базовых уравнений статического равновесия, ограничений по прочности и по положению равнодействующих сил [7, 8]. Система сил в симплекс-методе показана на рис. 2, в и представлена составляющими:

U_i , V_i , W_i – вертикальная, горизонтальная силы и момент соответственно, эквивалентные действию внешних нагрузок и массовых сил на i -й отсек;

Z_i , X_i , M_i – вертикальная, горизонтальная силы и момент соответственно, действующие на боковую грань i -го отсека справа;

Z_{i-1} , X_{i-1} , M_{i-1} – вертикальная, горизонтальная силы и момент соответственно, действующие на боковую грань i -го отсека слева, эти факторы являются неизвестными при рассмотрении $(i-1)$ -го отсека;

N_i , T_i , C_i – нормальная, касательная силы и момент соответственно, эквивалентные силовому воздействию на подошву i -го отсека.

Геометрические параметры отсека обозначены на рис. 2, в.

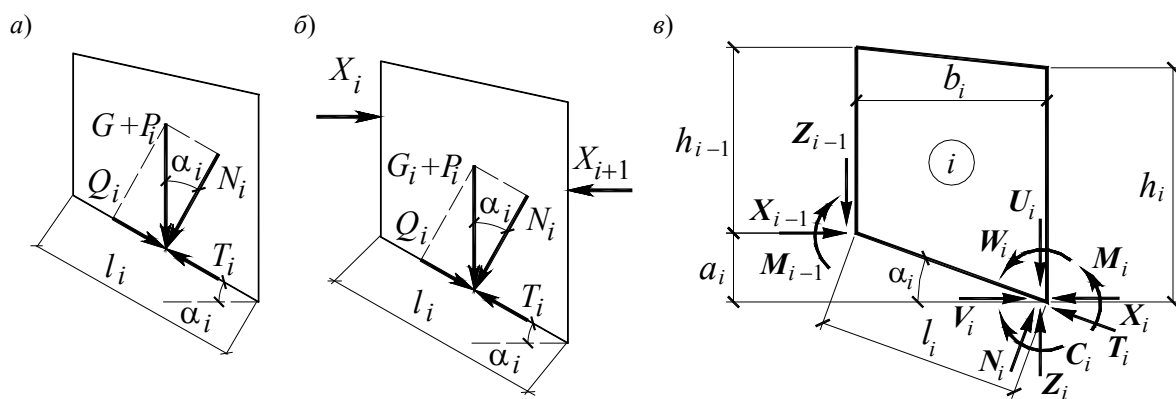


Рис. 2. Система сил, действующих на отсек:
а – метод Терцаги; б – метод Бишопа; в – симплекс-метод

Для грунтового массива можно принять:
 $X_i \geq 0$; $M_i \geq 0$; $N_i \geq 0$; $T_i \geq 0$; $C_i \geq 0$.

Общая система линейных ограничений-равенств и ограничений-неравенств имеет вид

$$\begin{aligned} 0 &= -Z_{i-1} + N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i + Z_i - U_i; \\ 0 &= X_{i-1} + N_i \sin \alpha_i - T_i \cos \alpha_i - X_i + V_i; \\ 0 &= -Z_{i-1} b_i + X_{i-1} a_i + M_{i-1} + C_i - M_i - W_i; \\ \eta_{1i} &= N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i - T_i \geq 0; \\ \eta_{2i} &= X_i \operatorname{tg} \varphi_i^* + c_i^* h_i - Z_i \geq 0; \\ \eta_{3i} &= X_i \operatorname{tg} \varphi_i^* + c_i^* h_i + Z_i \geq 0; \\ \eta_{4i} &= N_i l_i - C_i \geq 0; \\ \eta_{5i} &= X_i h_i - M_i \geq 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Приведенная система замыкается функцией цели, представляющей собой сумму разностей между касательными силами, действующими по подошве отсеков, и их предельными значениями:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{i=n} (T_i - N_i \operatorname{tg} \varphi - c_i l_i).$$

В результате решения данной системы ограничений-равенств и ограничений-неравенств устанавливается либо экстремальное значение функции цели Φ , либо факт несовместности системы [9]. В первом случае величина $\Phi \leq 0$. При $\Phi = 0$ имеет место предельное равновесие, соответствующее коэффициенту устойчивости $k_{st} = 1$. При $\Phi < 0$ имеет место безопасное состояние. Наконец, факт несовместности системы свидетельствует о недопустимом состоянии склона в части его устойчивости. В этом

случае система сил взаимодействия между отсеками в принципе не может быть уравновешена при имеющемся уровне прочности грунта. Отметим, что решение выполняется для заданного очертания линии скольжения и характеристик грунтов. Для оценки устойчивости симплекс-методом строятся диаграммы устойчивости первого типа для однородных склонов и второго типа для неоднородных склонов. Для неоднородных склонов предлагается выполнять оценку устойчивости симплекс-методом с помощью коэффициента устойчивости.

Цель работы

Цель работы заключалась в оценке устойчивости склона, расположенного в Адлеровском районе г. Сочи, в связи с планируемым строительством жилого дома с учетом сейсмичности до 9 баллов по шкале MSK-64. Для этого были выполнены расчет устойчивости приближенными методами Терцаги и Бишопа, а также строгий анализ устойчивости симплекс-методом. Кроме того, показана возможность сопоставления полученных коэффициентов устойчивости с результатами симплекс-анализа.

Исходные данные и расчет

На рис. 3 приведен топографический план с обозначением положения двух профилей 1–1 и 2–2. В качестве расчетного принят профиль 1–1. Также представлен геологический разрез по профилю 1–1. На этом разрезе показан участок приложения нагрузки от жилого дома. Распределенная нагрузка от здания 60 кПа (рис. 4).



Рис. 3. Топографический план участка

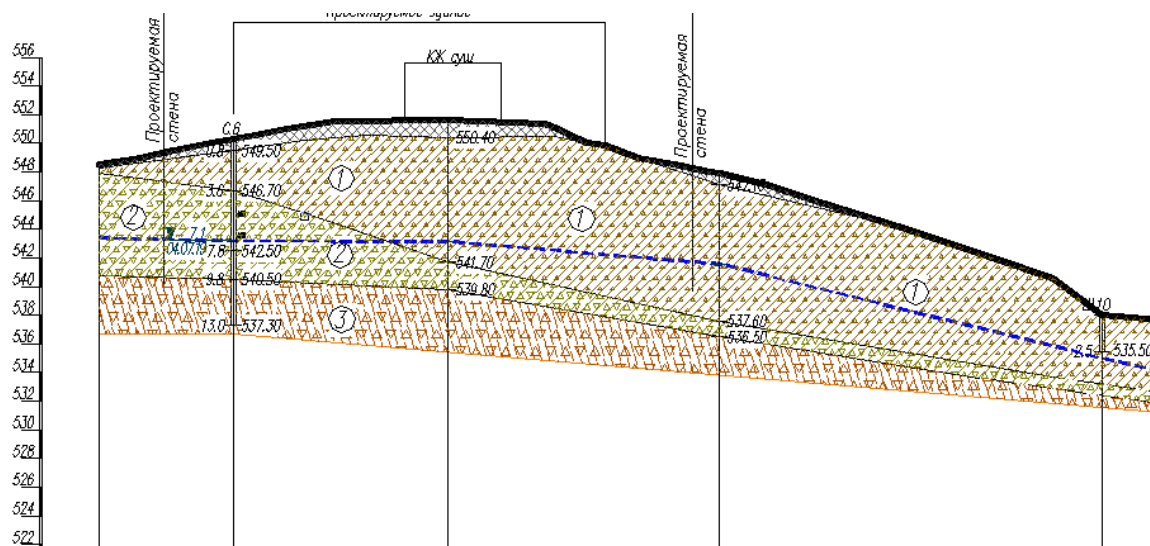


Рис. 4. Геологический разрез расчетного профиля

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов

Характеристика	Единица измерения	ИГЭ 1 (грунт 1)	ИГЭ 2 (грунт 2)	ИГЭ 3 (грунт 3)
Удельный вес γ	кН/м ³	22	22,7	23,5
Параметры прочности:				
неконсолидированно-недренированный сдвиг:				
c	кПа	14,9	10,7	7,8
φ	градус	15,5	17,8	24,1
консолидированно-дренированный сдвиг:				
c	кПа	22,5	18,3	15,0
φ	градус	19,6	22,3	30,1

В табл. 1 приведены данные о физико-механических свойствах грунтов, образующих склон. Нумерация инженерно-геологических элементов (ИГЭ) в таблице соответствует нумерации ИГЭ на расчетных профилях (геологических разрезах). Виды испытаний: НН – неконсолидированно-недренированные (быстрый сдвиг), КД – консолидированно-дренированные (медленный сдвиг) [10].

Анализ устойчивости оползневого склона предлагается выполнять по следующей программе.

Во-первых, приближенным методом установить положение опасной линии скольжения и соответствующий ей коэффициент устойчивости. Данную операцию выполнить для различных точек выхода линии скольжения на поверхность склона в верхней части. Для каждой точки выхода установить линию скольжения с минимальным значением коэффициента устойчивости. В результате мы имеем целое семейство линий скольжения. Таким образом, получается график зависимости значения коэффициента

устойчивости от положения точки выхода линии скольжения на поверхность и очертание этой линии. Разумеется, среди полученных линий скольжения найдется наиболее опасная с минимальным значением коэффициента устойчивости. Однако построение опасных линий скольжения с соответствующими им коэффициентами устойчивости весьма полезно при решении вопросов усиления склона, например при определении области закрепления грунтов.

Во-вторых, для полученных опасных линий скольжения провести симплекс-анализ устойчивости в следующем виде. Организовать серию расчетов с расчетными характеристиками прочности грунтов (c_p , φ_p) по линии скольжения, назначаемыми по формулам

$$c_p = kc, \quad \text{tg } \varphi_p = k \text{ tg } \varphi.$$

Фиксируя в каждом решении симплекс-таблицы полученное состояние – безопасное, предельное или недопустимое, установить граничные значения коэффициента k , а именно значение k_{u1} (граница между недопустимым и предельным состоянием) и k_{u2} (гра-

ница между предельным и безопасным состоянием).

Соотношение между коэффициентами устойчивости k_{st} и граничными коэффициентами k_{u1} и k_{u2} позволяет с большой точностью оценить результаты анализа устойчивости оползневого склона.

Заметим, что учет сейсмичности следует осуществлять путем введения в расчет горизонтальных сил, равных $\alpha_c M$, где α_c – коэффициент сейсмичности, а M – масса тела, попадающего в область обрушения грунта в пределах i -го отсека. Для значения интенсивности землетрясения 9 баллов принимается $\alpha_c = 0,1 \text{ м/с}^2$.

Итак, расчеты выполнялись методами Терцаги, Бишопа и симплекс-методом. В табл. 2 приведены результаты расчетов.

На рис. 5 дано графическое представление опасных линий скольжения и графики зависимости коэффициентов устойчивости и граничных

коэффициентов от положения точки выхода опасной линии скольжения на поверхность.

Результаты приведены для наиболее тяжелого случая – неконсолидированно-недренированных характеристик прочности грунтов.

Выводы

Проанализировав ситуацию на рассмотренном реальном объекте – оползневом склоне г. Сочи, следует заключить, что устойчивость склона при нагружении и сейсмичности не обеспечена. Поэтому необходимо выполнить противооползневые мероприятия. Например, возведение подпорной стенки или закрепление грунтов склона.

В качестве общей рекомендации предлагается комплексная оценка устойчивости оползневых склонов, включающая в себя как расчет известными приближенными методами отсеков, так и выполнение симплекс-анализа устойчивости.

Таблица 2

Результаты расчета нагруженного склона

Исходные данные				НН-характеристики				КД-характеристики			
$x_b, \text{ м}$	$z_0, \text{ м}$	$x_0, \text{ м}$	$r, \text{ м}$	k_{ut}	k_{ub}	k_{u1}	k_{u2}	k_{ut}	k_{ub}	k_{u1}	k_{u2}
16,5	-53,6	61,5	70	0,954	0,981	0,86	1,03	1,28	1,32	1,11	1,45
20,1	-38,89	58,9	55	0,924	0,962	0,82	0,99	1,24	1,31	1,05	1,48
31,5	-16,5	60,1	33	0,968	0,954	0,87	1,06	1,32	1,34	1,12	1,47
35,4	-13,0	61,4	30	1,06	1,09	0,96	1,18	1,44	1,58	1,15	1,62
39,3	-11,6	64,4	29	1,07	1,15	0,99	1,22	1,46	1,51	1,26	1,65
43,2	-6,24	65,0	24	1,09	1,18	1,03	1,28	1,49	1,61	1,31	1,64
55,1	4,39	66,6	12	1,21	1,28	1,06	1,32	1,68	1,73	1,42	1,78

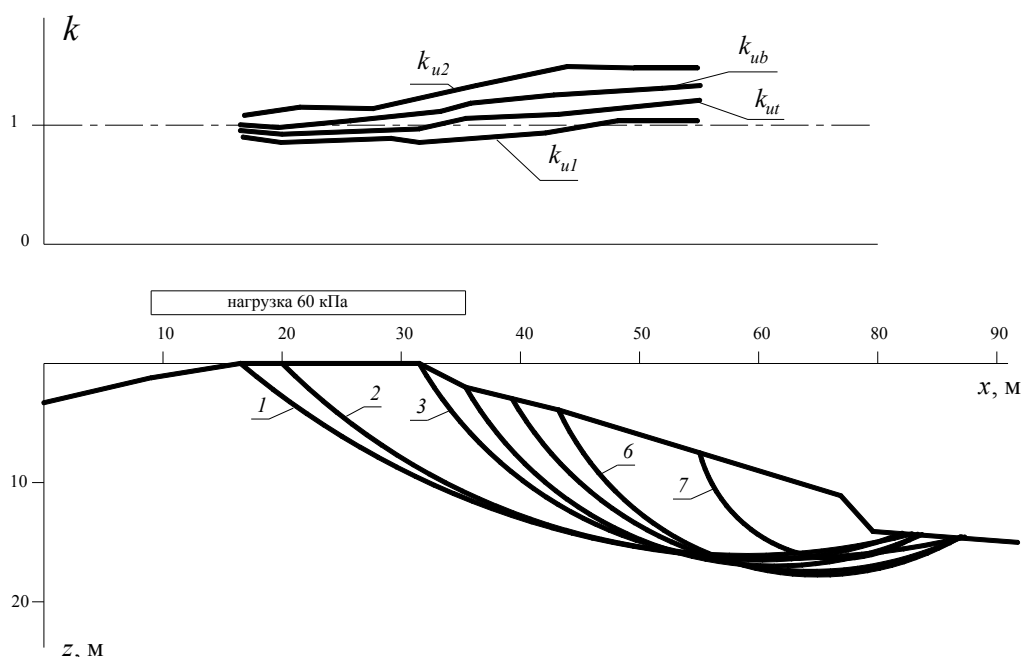


Рис. 5. Положение опасных линий скольжения и зависимости коэффициентов устойчивости и граничных коэффициентов от точки выхода опасной линии скольжения на поверхность

Список источников

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 541 с.
2. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М. : Недра, 1987. 221 с.
3. Хуан Я. Х. Устойчивость земляных откосов. М. : Стройиздат, 1988. 240 с.
4. Костэ Ж., Санглера Г. Механика грунтов. М. : Стройиздат, 1981. 456 с.
5. Terzaghi K., Peck R., Gholamreza M. Soil mechanics in engineering practice. N. Y. : John Wiley and sons 1967. 534 p.
6. Bishop A. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes // *Geotechnique*. 1955. Vol. 5, no. 1. P. 7–17.
7. Караулов А. М. Постановка и решение задачи устойчивости откосов и склонов как задачи линейного программирования // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2005. № 3. С. 2–6.
8. Ерхов В. И. Теория идеально пластических тел. М. : Наука, 1978. 352 с.
9. Зуховицкий С. И., Авдеева Л. И. Линейное и выпуклое программирование. М., 1964. 230 с.
10. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. М. : Стройиздат, 1979. 304 с.

References

1. Zenkevich O. Finite element method in engineering. M.: Mir; 1975. 541 p. (In Russ.).
2. Fadeev A. B. Finite element method in geomechanics. M.: Nedra; 1987. 221 p. (In Russ.).
3. Huang Ya.Kh. Stability of earth slopes. M.: Stroyizdat; 1988. 240 p. (In Russ.).
4. Koste Zh., Sanglera G. Mechanics of soils. M.: Stroyizdat; 1981. 456 p. (In Russ.).
5. Terzaghi K., Peck R., Gholamreza M. Soil mechanics in engineering practice. New York: John Wiley and sons; 1967.
6. Bishop A. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotech-nique*. 1955;5(1):7–17.
7. Karaulov A. M. Formulation and solution of the problem of stability of slopes and slopes as a linear programming problem. *Foundations, foundations and soil mechanics*. 2005;3:2–6. (In Russ.).
8. Erkhov V. I. Theory of ideally plastic bodies. M.: Nauka; 1978. 352 p. (In Russ.).
9. Zukhovitsky S. I., Avdeeva L. I. Linear and convex programming. M.; 1964. 230 p. (In Russ.).
10. Goldstein M. N. Mechanical properties of soils. M.: Stroyizdat; 1979. 304 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А. М. Караулов – профессор кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

А. Н. Донец – доцент кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Ю. Н. Савельев – доцент кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

A. M. Karaulov – Professor of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

A. N. Donets – Associate Professor of the Bridges Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Yu. N. Savelyev – Associate Professor of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 13.04.2022; одобрена после рецензирования 15.04.2022; принята к публикации 18.04.2022.

The article was submitted 13.04.2022; approved after reviewing 15.04.2022; accepted for publication 18.04.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.15

doi 10.52170/1815-9265_2022_61_123

Особенности проектирования усиления грунтовых оснований зданий и сооружений армированием грунтоцементными колоннами

Иван Олегович Гребенников

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, ivan05031996@gmail.com

Аннотация. Увеличение темпов строительства и освоение площадок со слабыми грунтовыми основаниями влекут за собой развитие геотехнической сферы, строительных технологий. В данной статье рассматриваются перспективные способы усиления основания армированием вертикальными грунтоцементными колоннами: Jet-цементация и глубинное перемешивание грунтов, широко применяемые как в нашей стране, так и в зарубежных странах. Рассмотрены основные методики назначения проектных параметров, а также выделены имеющиеся обобщения и допущения в существующей нормативной базе. К таким методам относятся: методика СП 22.13330 по принципам естественных грунтовых оснований; методика СП 24.13330 для массивного фундамента; моделирование методом конечных элементов с использованием программных комплексов. Анализ существующих методов расчетов усиленного основания позволил выделить области необходимых исследований, направленных на совершенствование существующих методик проектирования и назначения проектных параметров. Рассмотрены способы контроля качества работ по усилению грунтов основания армированием вертикальными грунтоцементными колоннами. Показаны основные критерии и способы оценки качества усиления, отраженные в нормативной документации. Представлен опыт проектирования усиления грунтовых оснований грунтоцементными колоннами и контроля параметров усиления. Сформулированы выводы, поставлены конкретные задачи дальнейших исследований, направленные на совершенствование таких методов усиления грунтового массива, как глубинное перемешивание грунта и Jet-цементация.

Ключевые слова: Jet-цементация, глубинное перемешивание грунтов, грунтоцементные колонны, контроль качества усиления грунтов, геотехнический мониторинг, усиление грунтов основания

Для цитирования: Гребенников И. О. Особенности проектирования усиления грунтовых оснований зданий и сооружений армированием грунтоцементными колоннами // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 123–130. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_123.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Design features of strengthening soil foundations of buildings and structures by reinforcing soil-cement columns

Ivan O. Grebennikov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, ivan05031996@gmail.com

Abstract. An increase in the pace of construction and the development of sites with weak soil foundations entails the development of the geotechnical sphere and construction technologies. This article discusses promising methods of strengthening the base by reinforcing vertical soil-cement columns: Jet-cementing and deep mixing of soils, which are widely used both in our country and in foreign countries. The main methods of assigning design parameters are considered, and the available generalizations and assumptions in the existing regulatory framework are highlighted. These methods include: the method of SP 22.13330 according to the principles of natural soil foundations; methodology SP 24.13330 as for a massive foundation; modeling by the finite element method using software systems. An analysis of the existing methods for calculating the reinforced foundation by these methods made it possible to identify the areas of necessary research aimed at improving the existing methods of designing and assigning design parameters. The existing methods of quality control of the work performed the foundation soils by reinforcing vertical soil-cement columns are considered. The main criteria and methods for assessing the quality of amplification, reflected in the regulatory documentation, are shown. The experience of designing reinforcement of soil foundations with soil-cement columns and control of reinforcement parameters is presented.

Conclusions are formulated and specific tasks for further research are set to improve such methods of strengthening the soil mass, as methods of deep soil mixing and Jet cementation.

Keywords: Jet-cementation, deep soil mixing, soil-cement columns, quality control of reinforcement soil, geotechnical monitoring, soil reinforcement

For citation: Grebennikov I. O. Design features of strengthening soil foundations of buildings and structures by reinforcing soil-cement columns. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):123–130. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_123.

Согласно официальным данным Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, с 2010 г. по настоящее время на территории субъектов РФ наблюдается положительная динамика в сфере строительства и ввода нового жилья в эксплуатацию. Рост темпов строительства в совокупности с освоением строительных площадок со слабыми грунтами в основании естественным образом стимулирует развитие строительных технологий, оборудования, регулирующих документов, расчетных методик и т. п. [1, 2]. Отдельно можно отметить развитие геотехнической сферы, которая затрагивает вопросы создания усиленных грунтовых массивов в качестве оснований фундаментов вновь возводимых и реконструируемых зданий и сооружений [3].

Большой интерес представляет метод усиления грунтов армированием вертикальными грунтоцементными колоннами как альтернативный вариант свайного фундамента. Данный метод усиления позволяет создавать в основании зданий геотехнические массивы с относительно высокими прочностными и деформационными показателями, а также, в зависимости от конкретных грунтовых условий и конструктивных особенностей объектов строительства и способов устройства армирующих элементов, позволяет снизить расходы на устройство фундаментов сооружений [1, 3].

За последние 10–15 лет большое развитие получили бурсмесительный (глубинное перемешивание грунта) и струйный (Jet-цементация) способы, они показывают высокую эффективность на строительных площадках со слабыми обводненными грунтами. Эти способы в целом схожи и позволяют создавать в грунтах грунтоцементные колонны большого диаметра (от 0,5 до 1,5 м и более) [4]. Для создания армированных оснований указанными способами в основном используется идентичные ключевые компоненты – вода, цемент и

местный грунт. Различия заключаются непосредственно в способах изготовления армирующих элементов – грунтоцементных колонн. У каждого из них есть свои преимущества и недостатки.

Jet-цементация заключается в использовании энергии высоконапорной струи цементного раствора или воды с воздушным потоком для разрушения и одновременного перемешивания грунта с цементным раствором. После твердения смеси образуется грунтоцементная колонна, обладающая повышенными (в сравнении с исходным грунтом) прочностными и деформационными характеристиками.

Глубинное перемешивание грунта заключается в механическом перемешивании грунта с цементным раствором. Перемешивание грунтов осуществляется при помощи лопастей (ножей) на буровом инструменте (смесителе). После твердения смеси образуется грунтоцементная колонна с выдержанными геометрическими параметрами.

Данные способы получили широкое распространение за рубежом и в нашей стране [3–5]. В настоящее время накоплен опыт, разработаны отдельные профильные научно-технические документы, затрагивающие вопросы армирования грунтовых массивов грунтоцементными колоннами, опубликовано множество соответствующих научных трудов, подробный анализ которых позволяет выделить ряд вопросов к способам изготовления грунтоцементных колонн, соответствующим методикам расчета, проектирования и контроля качества усиления [6–12]. Решение этих вопросов позволит расширить область применения рассматриваемого метода усиления грунтов и повысить экономическую эффективность.

Основные требования к проектированию, реализации и контролю усиления грунтов армированием грунтоцементными колоннами отражены в нормативных документах: СП 22.13330, СП 291.1325800, СП 45.13330.

Существующая методика назначения проектных параметров грунтоцементных колонн имеет определенные обобщения и допущения. К примеру, назначение параметров прочности и деформируемости грунтоцемента или диаметра колонн осуществляется по обобщенным номограммам с разделением только по виду грунта и не учитывает гранулометрический состав грунта, его консистенцию, происхождение, содержание органических включений и т. п. Очевидно, что разное содержание пылеватых и глинистых частиц грунта влияет на прочность грунтоцемента, а консистенция и структурная прочность грунта влияют на диаметр грунтоцементных колонн или расход цемента для Jet-цементации, о чем свидетельствуют исследования, проводимые как в нашей стране, так и за рубежом [6, 11, 13]. Как следствие, для совершенствования методик назначения параметров прочности и деформируемости грунтоцемента необходимо проведение обширных лабораторных и полевых исследований. Также в нормах отсутствуют указания по циклам перемешивания грунта смесителем для обеспечения необходимой сплошности закрепленного массива при глубинном перемешивании. В связи с этим требуется проведение обязательных предпроектных опытных работ с проверкой заложенных в проекте решений и возможной их корректировкой, а также уточнением технологических параметров.

Из-за имеющихся допущений и обобщений нормативной базы проектирование усиления оснований армированием грунтоцементными колоннами зачастую осуществляется с использованием научных наработок и собственного опыта исполнения работ. А в ряде случаев реальный опыт реализации усиления противоречит положениям нормативных документов, что на стадии экспертизы соответствующей проектной документации может вызвать существенные проблемы. Получение качественных результатов при усилении грунтовых оснований зданий и сооружений армированием грунтоцементными колоннами осложняется специфическими особенностями производства работ и отсутствием критериально обоснованной методики проектирования и методики контроля качества. Эта проблема оказывает существенное влияние на надежность и безопасность строящегося сооружения и

требует дополнительных материальных затрат для минимизации рисков при проектировании. Решение существующей проблемы обеспечения надежности строящихся сооружений при армировании их оснований грунтоцементными колоннами весьма актуально для строительной отрасли.

Анализ отечественной нормативно-технической документации позволяет сделать вывод, что для армированных грунтоцементными колоннами массивов, являющихся основанием для фундаментов зданий и сооружений, отсутствует четкий подход к расчетам по предельным состояниям. В СП 22.13330 присутствует раздел, касающийся расчетов армированных грунтов. Для рассматриваемого варианта армирования в этом разделе СП расчеты выполняются по принципам естественных грунтовых оснований, т. е. как для сплошной среды с интегральными значениями модуля общих деформаций и расчетного сопротивления. Расчеты осадок при этом допускается проводить методом послойного суммирования с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого полупространства. При этом очевидно, что для армированного массива допустимо применение положений СП 24.13330 по расчету осадок с рассмотрением армированного массива как условного фундамента или использование метода ячейки. Несущую способность грунтоцементных колонн по грунту рекомендуется оценивать так же, как для свай.

Еще одним вариантом расчетов является моделирование изменения напряженно-деформированного состояния армированного массива численными методами с применением специализированных геотехнических комплексов. Высокая точность расчетов с использованием метода конечных элементов (МКЭ) требует введения большего количества исходных данных, таких как модель работы грунта и материала грунтоцемента, контактная модель, ограничение расчетной области, характеристики грунта и грунтоцемента и т. п. Набор вводимых исходных данных напрямую влияет на конечный результат расчетов, особенно при определении осадок здания. Вызывает вопросы и корректная оценка нагрузки на грунтоцементную колонну, необходимой для проверки прочности армирующих элементов

и расчетов несущей способности по грунту. В сравнении со свайным типом основания армирующие элементы конструктивно не сопряжены с фундаментом здания, и, как правило, между ним и таким основанием предусматривают буферный слой – песчаную или щебеночную подушку. В результате этого происходит перераспределение напряжений между грунтом и грунтоцементными колоннами.

Таким образом, как минимум три способа расчета (методика СП 22.13330 по принципам естественных грунтовых оснований, методика СП 24.13330 для массивного фундамента и МКЭ) будут показывать различные результаты прогноза деформаций усиленного основания. Проектирование по наихудшему результату прогноза может привести к удорожанию строительства, проектирование по наилучшему варианту несет в себе большие риски. В связи с этим весьма актуально проведение соответствующих исследований, цель которых – разработка единого подхода к расчетам армированных оснований.

Важным вопросом при устройстве армированных оснований является достоверная оценка качества усиления. Основные вопросы контроля качества устройства грунтоцементных колонн отражены в СП 291.1325800 и СП 45.13330. Основными критериями, согласно нормативным документам, являются достижение проектной прочности на одноосное сжатие материала грунтоцементной колонны, ее геометрические характеристики и однородность материала. Для обеспечения этих критериев требуется в момент производства работ осуществлять операционный контроль, который включает в себя проверку:

- водоцементного отношения и расхода вяжущего;
- давления и скорости его подачи;
- скорости вращения и количества погружений и поднятий смесителя (для способа глубинного перемешивания);
- крутящего момента и силы вдавливания;
- фактического расхода раствора в объеме образованной грунтоцементной колонны.

Исследования, проводимые в области контроля качества устройства грунтоцементных колонн, показывают, что контроль геометрических параметров при струйной цементации в отличие от глубинного перемешивания за-

труднен [6]. Например, это осложнено при работах в обводненных неустойчивых грунтах, если речь идет про откапывание грунтоцементных колонн и измерение их диаметров. Для более качественной оценки, как отмечалось ранее, необходимы опытные работы с целью уточнения запроектированных параметров грунтоцементных колонн.

Основной акцент при контроле качества делается на сами грунтоцементные колонны, при этом важной деформационной характеристикой усиленного основания является модуль деформации усиленного массива грунта, который может контролироваться с использованием методик ГОСТ 20276.1 и ГОСТ 5686 по свайным и штамповым испытаниям. Однако, согласно данным нормативных документов, максимально регламентированная площадь плоского штампа для проведения подобных испытаний составляет 5 000 см². В свою очередь грунтоцементные колонны, выполняемые по описанным выше способам, имеют значения диаметров от 0,5 до 1,5 м и более. Если проводить штамповые испытания для данных диаметров грунтоцементных колонн, то фактически получаем несущую способность грунтоцементной колонны по грунту и ее сжимаемость, а не модуль деформации усиленного грунтового массива. Для грунтовых оснований, армированных грунтоцементными колоннами большого диаметра, для оценки интегрального модуля деформации требуется применение штампов больших размеров, что влечет за собой, во-первых, отступление от существующих ГОСТов, во-вторых, использование масштабных нагрузочных систем. Фактически роль такого штампа может выполнять фундаментная плита здания, тогда контроль качества будет основан на геодезических наблюдениях при строительстве здания. Но такой подход к контролю качества несет в себе определенные риски и требует комплексного подхода к проводимому геотехническому мониторингу. Помимо наблюдений за деформациями зданий и сооружений, на таких усиленных основаниях необходимо производить фиксацию отклонений контролируемых параметров и устанавливать причины их возникновения, осуществлять прогноз развития дальнейших деформаций и, при необходимости, своевременно выполнять корректировку напряженно-деформированного

состояния основания на протяжении всего этапа возведения здания и сооружения [14, 15].

Таким образом, для дальнейшего развития способов усиления грунтовых оснований зданий и сооружений армированием грунтоцементными колоннами необходимо проведение дополнительных исследований конструктивных и технологических параметров усиления, а также разработка единого подхода к проектированию и контролю качества.

Автором проведено исследование работы грунтоцементных колонн, изготовленных на строительной площадке Новосибирска. Изготовлены опытные грунтоцементные колонны, и проведены штамповые испытания грунтового массива с определением модуля деформации. Выполнено сравнение полученных значений штампового модуля деформации с соответствующим расчетным значением. Расчеты модуля деформации усиленного грунто-

вого массива произведены по методике п. 6.2 СП 22.13330 как для средневзвешенного между грунтом и грунтоцементом.

Верхняя часть разреза площадки сложена супесью песчанистой твердой консистенции с модулем деформации 14,6 МПа. В этих грунтах устраивалась грунтоцементная колонна диаметром 400 мм на глубину 5,0 м с использованием установки глубинного перемешивания грунта (рис. 1).

Штамповые испытания проведены с помощью плоского круглого штампа площадью 5 000 см². Нагружение штампа производилось через домкрат и анкерную систему. Перемещения штампа фиксировались прогибомерами системы Аистова, установленными на реперной системе. Штамповые испытания проводились через подушку из отсева дробления щебня фракции 0...5 (рис. 2).

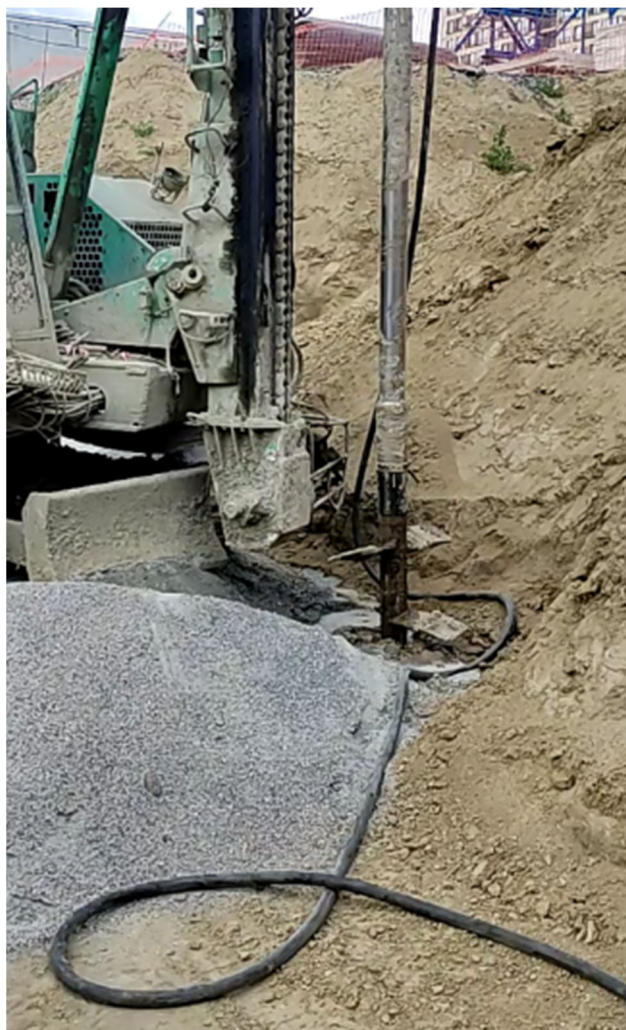


Рис. 1. Устройство опытной грунтоцементной колонны



Рис. 2. Штамповое испытание усиленного грунтового массива

Всего на опытной площадке устроены две грунтоцементные колонны и проведено два штамповых испытания. Расход цемента при изготовлении колонн был принят 250 кг/м^3 . При таком расходе и виде грунта, согласно проектным рекомендациям СП 291.1325800, модуль деформации грунтоцемента составляет 120 МПа, а расчетный модуль деформации грунтового массива, определенный по методике СП 22.13330 (при коэффициенте армирования, принимаемом из соотношения площадей грунтоцементной колонны и штампа), определяется по формуле:

$$E_{\text{мас}} = \alpha E_{\text{стб}} + (1 - \alpha) E_{\text{гр}},$$

$$E_{\text{мас}} = 40,9 \text{ МПа},$$

где α – коэффициент армирования; $E_{\text{гр}}$ – модуль деформации грунта.

Штамповый модуль деформации усиленного грунтового массива составил 30,2 и 31,4 МПа. Штамповые испытания проводились на 14-е сутки после изготовления грунтоцементных колонн. Среднее значение штампового модуля деформации получилось ниже проектного значения на 25 %. Необходимо отметить, что согласно п. 5.1.6 СП 291.1325800.2017 полный набор прочности грунтоцементного элемента происходит на 56-е сутки. Таким образом, грунтоцементные колонны на 14-е сутки еще не набрали полной проектной проч-

ности. Это обстоятельство требует дополнительных исследований влияния срока и условий твердения на величину прочности и деформационных характеристик усиленного грунтового массива. Полученные результаты опытных работ подтверждают необходимость проведения дополнительных исследований способов усиления грунтового основания грунтоцементными колоннами.

Выводы

Армирование грунтов грунтоцементными колоннами является эффективным методом усиления грунтов основания строящихся и реконструируемых зданий и сооружений. Большой интерес для исследований представляют способы изготовления грунтоцементных колонн и особенности проектирования, расчета и контроля качества таких усиленных оснований в глинистых грунтах от пластичной до текучей консистенции. В дальнейших исследованиях для способов глубинного перемешивания грунта и Jet-цементации планируется более подробно исследовать следующие вопросы:

- 1) влияние вида грунта, его происхождения, консистенции, гранулометрического состава, содержания органических включений на прочностные и деформационные характеристики грунтоцемента;

2) влияние таких технологических параметров усиления, как количество циклов перемешивания, мощность буровых установок, размеры смесителя, частота вращения смесителя и монитора, на геометрические параметры устраиваемых грунтоцементных колонн в различных грунтовых условиях;

3) подход к расчету и проектированию армированных грунтовых оснований грунтоцементными колоннами, принципы формирования расчетной схемы;

4) способы практического контроля деформационных параметров усиленного грунтового массива грунтоцементными колоннами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ланис А. Л., Попов А. М., Ломов П. О. Устройство оснований методом раскатки скважин с инъектированием твердеющего раствора // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 7. С. 29–38.
2. Причины деформаций зданий и сооружений в Новосибирске / М. Я. Крицкий, А. Ф. Сухорукова, А. Л. Ланис, С. В. Колышкин // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2005. № 1. С. 20–24.
3. Зехниев Ф. Ф., Внуков Д. А., Корпач А. И. Преобразование грунтовых оснований с применением технологии глубинного перемешивания грунта // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8, № 4. С. 116–125. DOI 10.15593/2224-9826/2017.4.12.
4. Скрылев Г. Е., Монастырский А. Е., Тимофеев В. Ю. Особенности использования метода струйной цементации для укрепления грунтов основания при строительстве объектов трассы «Формулы-1» на Имеретинской низменности // Геотехника. 2012. № 6. С. 22–26.
5. Abbey S. J., Ngambi S., Ngeke B. E. Understanding the performance of deep mixed column improved soils-a review // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2015. Vol. 6, no. 3. С. 97–117.
6. Малинин А. Г. О необходимости корректировки СП 291.1325800.2017 «Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования» // Жилищное строительство. 2019. № 9. С. 11–16. DOI 10.31659/0044-4472-2019-9-11-16.
7. Определение несущей способности набивной сваи по грунту, выполненной в раскатанной скважине / А. Л. Ланис [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 9. С. 31–40.
8. Конюшков В. В. Несущая способность по материалу наклонных буроинъекционных свай // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 12. С. 88–92.
9. Малинин А. Г., Гладков И. Л., Жемчугов А. А. Влияние технологических параметров струйной цементации на прочность и диаметр грунтоцементных колонн // Метро и тоннели. 2012. № 5. С. 24–25.
10. Готман Н. З., Сафиуллин М. Н. Расчет и проектирование усиления плитного фундамента грунтоцементными сваями // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8, № 4. С. 64–73. DOI 10.15593/2224-9826/2017.4.07.
11. Ломов П. О., Ланис А. Л. К вопросу определения грунтовых параметров, оказывающих влияние на диаметр раскатанной скважины // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 3. С. 92–97.
12. Королев К. В., Караулов А. М., Галтер Д. С. Инженерная методика расчета вертикально армированных оснований // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 9 (705). С. 101–108.
13. Caraça O. Soil improvement by mixing: techniques and performances // Energy Procedia. 2016. Vol. 85. С. 85–92.
14. Геотехнический мониторинг при возведении многоэтажных зданий / Ломов П. О. [и др.] // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (55). С. 86–93.
15. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Соболев Е. С. Анализ данных геотехнического мониторинга плитных фундаментов большой площади // Геотехника. 2012. № 4. С. 28–34.

References

1. Lanis A. L., Popov A. M., Lomov P. O. Construction of foundations by the method of rolling wells with the injection of a hardening solution. *University Proceedings. Construction*. 2017;(7):29–38. (In Russ.).
2. Kritsky M. Ya., Sukhorukova A. F., Lanis A. L., Kolyshkin S. V. Causes of deformations of buildings and structures in Novosibirsk. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2005;(1):20–24. (In Russ.).

3. Zekhniev F. F., Vnukov D. A., Korpach A. I. Transformation of soil foundations with the use of deep soil mixing technology. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture tour*. 2017;8(4):116–125. DOI 10.15593/2224-9826/2017.4.12. (In Russ.).
4. Skrylev G. E., Monastyrsky A. E., Timofeev V. Yu. Peculiarities of using the jet grouting method to strengthen the foundation soils during the construction of Formula 1 track facilities on the Imeretinskaya Lowland. *Geotechnics*. 2012;(6):22–26. (In Russ.).
5. Abbey S. J., Ngambi S., Ngekpe B. E. Understanding the performance of deep mixed column improved soils-a review. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015;6(3):97–117.
6. Malinin A. G. On the need to adjust SP 291.1325800.2017 Reinforced soil-cement structures. Design rules. *Housing construction*. 2019;(9):11–16. DOI 10.31659/0044-4472-2019-9-11-16. (In Russ.).
7. Lanis A. L. [et al.]. Determination of the bearing capacity of a stuffed pile on the ground, made in a rolled well. *University Proceedings. Construction*. 2017;(9):31–40. (In Russ.).
8. Konyushkov V. V. Bearing capacity according to the material of inclined bored injection piles. *University Proceedings. Construction*. 2007;(12):88–92. (In Russ.).
9. Malinin A. G., Gladkov I. L., Zhemchugov A. A. Influence of technological parameters of jet grouting on the strength and diameter of soil-cement columns. *Metro and tunnels*. 2012;(5):24–25. (In Russ.).
10. Gotman N. Z., Safiullin M. Calculation and design of slab foundation reinforcement with soil-cement piles. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*. 2017;8(4):64–73. DOI 10.15593/2224-9826/2017.4.07. (In Russ.).
11. Lomov P. O., Lanis A. L. On the issue of determining soil parameters that affect the diameter of a rolled well. *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2015;(3):92–97. (In Russ.).
12. Korolev K. V., Karaulov A. M., Galter D. S. Engineering methodology for calculating vertically reinforced foundations. *News of higher educational institutions. Construction*. 2017;(705):101–108. (In Russ.).
13. Caraşca O. Soil improvement by mixing: techniques and performances. *Energy Procedia*. 2016;85:85–92.
14. Lomov P. O. [et al.]. Geotechnical monitoring during the construction of multi-storey buildings. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(55):86–93. (In Russ.).
15. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Sobolev E. S. Data analysis of geotechnical monitoring of large area slab foundations. *Geotechnics*. 2012;(4):28–34. (In Russ.).

Информация об авторе

И. О. Гребенников – аспирант кафедры «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

I. O. Grebennikov – Post-graduate Student of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 29.03.2022; одобрена после рецензирования 15.04.2022; принята к публикации 20.04.2022.

The article was submitted 29.03.2022; approved after reviewing 15.04.2022; accepted for publication 20.04.2022.

Информация для авторов

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

2. Статья представляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (гарнитура Times New Roman, кегль 14 pt; поля: верхнее и нижнее – 20, левое – 30, правое – 10 мм). Файл с текстом статьи должен быть назван фамилией автора (например: Иванов.doc).

3. Статья должна содержать:

- тип статьи (например, научная, обзорная, рецензия);
- УДК;
- название статьи;
- фамилию, имя и отчество каждого автора, место его работы/учебы, город, страну, ученую степень, звание, должность;
- аннотацию на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- библиографический список на русском и английском языках.

4. Список источников составляется в порядке упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Список должен содержать не менее 10 источников, из них собственных статей должно быть не более 30 %.

5. Графический материал должен быть выполнен в графических редакторах, поддерживающих векторную и растровую графику. Иллюстрации должны быть четкими, все подписи на рисунке должны хорошо читаться и иметь расшифровку. Если в тексте есть фотография, отсканированный рисунок, то они обязательно должны быть представлены также отдельным файлом в исходном графическом формате (например: jpeg, tiff).

6. Статья для опубликования в журнале и заявка отправляются по адресу: vestnik.stu@yandex.ru.

7. В редакцию предоставляются оригиналы документов: экспертное заключение о возможности опубликования статьи, статья и заявка.

8. Публикация статей в журнале бесплатная.

Более подробную информацию по вопросам опубликования статей и размещения другой информации в журнале можно найти на сайте издания.



www.stu.ru/science



vestnik.stu@yandex.ru



+7 383 328-04-36



630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук,
191, корп. 3, комн. 307



Главный редактор *А. Л. Манаков*
Заместитель главного редактора *А. Д. Абрамов*
Заместитель главного редактора *А. С. Ильиных*
Ответственный секретарь *М. С. Галай*
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*
Редакторы: *Е. Е. Рыжкова, А. О. Елесина, Ю. В. Печенкина*
Корректор *Б. В. Устинов*
Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*
Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Учредитель
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

Адрес редакции
630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, корп. 3, комн. 307.
Телефон/факс: (383) 328-04-36.
E-mail: vestnik.stu@yandex.ru

Адрес издателя
630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Телефон/факс: (383) 328-03-81.
E-mail: bvu@stu.ru

Подписано в печать 20.06.2022. Дата выхода в свет 22.06.2022
Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 15,7 уч.-изд. л., 16,5 усл.-печ. л. Заказ № 3727

Цена свободная

Отпечатано в издательстве СГУПС.
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
Тел. (383) 328-03-81; e-mail: bvu@stu.ru

