

ISSN 2222-9396

**№1**

# Современные проблемы транспортного комплекса России

**Международный  
научный журнал**

- региональные железнодорожные пассажирские перевозки Польши
- организация ремонтного обслуживания карьерных автосамосвалов
- расчёт крепления твердотельного груза
- структурно-имитационное моделирование макроструктуры лёгких бетонов для наружных ограждающих конструкций железнодорожных зданий

• инфраструктура • логистика • технология • организация  
• управление • экономика • техника • методология



[www.transcience.ru](http://www.transcience.ru)

**2020  
ТОМ 10**

**International Scientific Journal**

**Modern Problems of Russian  
Transport Complex**

**2020, Vol.10, No.1**

# Современные проблемы транспортного комплекса России

2020. Т. 10, №1

Журнал индексируется: РИНЦ, Crossref, BASE, CiteFactor, ERIH PLUS, ESJI, EZB, Google Scholar, OAI, OpenAIRE, PKP Index, ResearchBib, ROARMAP, Scilit, WorldCat, ВИНТИ РАН, Киберленинка

Электронная версия журнала размещается:

- Научная Электронная Библиотека (НЭБ) – <https://elibrary.ru/>
- сайт журнала – <https://transcience.ru>
- сайт научной электронной библиотеки «Киберленинка» – <https://cyberleninka.ru>

Издаётся с 2011 года

## Редакционный совет

**Б. Абрамович** – Загребский университет, Хорватия  
**А.И. Адилходжаев** – Ташкентский институт инженеров  
железнодорожного транспорта, Узбекистан  
**Э. Бабулак** – Национальный научный фонд,  
Александрия, Виргиния, США  
**В.В. Багинова** – Российский университет транспорта,  
Москва, Россия  
**Т.П. Воскресенская** – Сибирский государственный  
индустриальный университет, Новокузнецк, Россия  
**М. Вохоска** – Институт технологий и бизнеса  
в Ческе-Будеёвице, Чехия  
**Е.П. Дудкин** – Петербургский государственный  
университет путей сообщения Императора Александра-I,  
Россия  
**С.Н. Корнилов** – Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова, Россия  
**П. Митра** – Индийский технологический институт  
в Харагпуре, Индия  
**А.Т. Попов** – Липецкий государственный технический  
университет, Россия  
**В. Росо** – Технический университет Чалмерс, Швеция  
**В.М. Сай** – Уральский государственный университет  
путей сообщения, Екатеринбург, Россия  
**А.В. Сладковский** – Силезский технический  
университет, Катовице, Республика Польша

**Ж. Стевич** – Восточно-Сараевский университет,  
Добой, Босния и Герцеговина  
**М. Страка** – Технический университет в Кошице,  
Словакия  
**Ш. Фенг** – Даляньский университет информатики  
Neusoft, КНР  
**К.Ш. Шункеев** – Актыбинский региональный  
государственный университет им.К.Жубанова, Ка-  
захстан  
**Х. Ху** – Шанхайский университет транспорта, КНР

Главный редактор  
**А.Н. Рахмангулов**

Зам. главного редактора  
**Н.А. Осинцев**

Редакционная коллегия  
**М.А. Зайцева**

**О.А. Копылова**

**П.Н. Мишуров**

**Д.С. Муравьев**

**В.А. Пикалов**

**О.В. Фридрихсон**

**А.В. Цыганов**

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2020

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.  
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

16+, в соответствии с Федеральным Законом от 29.12.10. №436-ФЗ.

## Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

Тел.: (3519) 29-85-16

URL: <https://transcience.ru>

E-mail: [editor@transcience.ru](mailto:editor@transcience.ru)

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова  
Выход в свет 24.12.2020.

Заказ 367. Тираж 500 экз. Цена свободная.

# Modern Problems of Russian Transport Complex

2020, Vol. 10, No. 1

Indexing: Russian Science Citation Index, Crossref, BASE, CiteFactor, ERIH PLUS, ESJI, EZB, Google Scholar, OAI, OpenAIRE, PKP Index, ResearchBib, ROARMAP, Scilit, WorldCat, Russian VINITI RAS, CyberLeninka

Online versions of the journal can be found in the:

- Scientific Electronic Library – <https://elibrary.ru>
- Journal web-site – <http://transience.org>
- Scientific Electronic Library «CyberLeninka» – <https://cyberleninka.ru>

PUBLISHED SINCE 2011

## Editorial Board Members

**B. Abramovic** – University of Zagreb, Croatia  
**A.I. Adilhodzaev** – Tashkent Railway Engineering institute, Uzbekistan  
**E. Babulak** – National Science Foundation, Alexandria, Virginia, United States  
**V.V. Baginova** – Russian University of Transport, Moscow, Russia  
**T.P. Voskresenskaya** – Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia  
**M. Vochozka** – Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, Czech Republic  
**E.P. Dudkin** – Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia  
**S.N. Kornilov** – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia  
**P. Mitra** – Indian Institute of Technology Kharagpur, India  
**A.T. Popov** – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia  
**V. Roso** – Chalmers University of Technology, Sweden  
**V.M. Say** – Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia  
**A.V. Śladkowski** – Silesian University of Technology, Katowice, Poland

**Z. Stević** – University of East Sarajevo, Dobo, Bosnia and Herzegovina  
**M. Straka** – Technical university of Kosice, Slovakia  
**S. Feng** – Dalian Neusoft University of Information, China  
**K.S. Shunkeyev** – K. Zhubanov Aktobe Regional State University, Kazakhstan  
**H. Hu** – Shanghai Jiao Tong University, China

## Editor-in-chief

**A.N. Rakhmangulov**

## First deputy chief editor

**N.A. Osintsev**

## Executive editors

**M.A. Zaitseva**  
**O.A. Kopylova**  
**P.N. Mishkurov**  
**D.S. Muravev**  
**V.A. Pikalov**  
**O.V. Fridrikhson**  
**A.V. TSyganov**

© Federal state budgetary institution of higher education  
«Nosov Magnitogorsk State Technical University», 2020

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University  
(455000, Chelyabinsk Region, Magnitogorsk, Lenin prospect, 38)  
16+ in accordance with the Federal Law 29.12.10. №436-FL

## Editorship address:

455000, Russia, Magnitogorsk, Lenin prospect, 38  
Phone number: +7(3519) 29-85-16.  
URL: <http://transience.org>  
E-mail: [editor@transience.ru](mailto:editor@transience.ru)

Printed in the Printing NMSTU Area  
Signed for press 2019.12.24.  
Order 367. Circulation – 500 items. Free of charge.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Логистика

**Каминьски В.** Анализ обеспеченности подвижным составом региональных железнодорожных пассажирских перевозок Польши..... 4

### Техника транспорта

**Хажиев В.А., Байкин В.С.,  
Хакимьянов В.А., Маслюков С.П.**  
Мониторинг и совершенствование организации ремонтного обслуживания карьерных автосамосвалов БелАЗ-7513 и БелАЗ-75306 на разрезе «Черногорский»... 25

**Туранов Х.Т., Рuzметов Я.О.,  
Шихназаров Ж.А.** К расчёту крепления твердотельного груза при воздействии продольных сил..... 32

### Транспортная инфраструктура

**Адилходжаев А.И., Шаумаров С.С.**  
Структурно-имитационное моделирование макроструктуры лёгких бетонов для наружных ограждающих конструкций железнодорожных зданий ..... 43

## CONTENTS

### Logistics

**Kamiński W.** Analysis of capacity of rolling stock used in regional passenger transport in different regions of Poland ..... 15

### Transport Equipment

**Khazhiev V.A., Baikin V.S.,  
Khakimianov V.A., Maslyukov S.P.**  
Monitoring and improvement of the BelAZ-7513 and BelAZ-75306 mining dump trucks repair service organization at the open pit "Chernogorsky" ..... 25

**Turanov Kh.T., Ruzmetov Iai.O.,  
Shikhnazarov Zh.A.** To the calculation of fastening a solid load under the influence of longitudinal forces ..... 32

### Transport Infrastructure

**Adilhodzaev A.I., Shaumarov S.S.**  
Structural-simulation modeling of machine structure of light concrete for external protecting constructions of railway buildings. 43

ISSN 2222-9396 (Print)  
УДК 656.223(438)  
<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-4-24>



## АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ПОЛЬШИ

Войцех КАМИНЬСКИ

Силезский технологический университет, г. Катовице, Польша  
E-mail: [Wojciech.Kaminski@polsl.pl](mailto:Wojciech.Kaminski@polsl.pl)

**Аннотация.** Представлены результаты оценки влияния социально-экономических факторов и объёма выполненной транспортной работы на вместимость подвижного состава, используемого на региональных железнодорожных пассажирских перевозках Польши. Исследование проводилось для железнодорожных линий, расположенных в различных регионах страны. Цель статьи – проверка наличия и оценка связей между вместимостью подвижного состава, используемого на региональных железнодорожных линиях, и показателями социально-экономической среды регионов, обслуживаемых этими линиями. Анализ проводился для 32 железнодорожных линий, расположенных в разных регионах (воеводствах) Польши. Для исследования в каждом воеводстве были выбраны по одной главной и местной линии. Средняя вместимость региональных поездов рассчитывалась для каждой из анализируемых линий. Выполнен расчёт значений частных коэффициентов корреляции между исследуемыми величинами. В расчётах среднее число мест в поездах использовалось как зависимая переменная, а социально-экономические показатели, влияющие на величину пассажиропотоков и объём выполненной транспортной работы, – как независимые. Расчёты выполнены с использованием статистических данных об объёмах перевозок и показателях социально-экономической среды за 2018 год. Результаты расчётов показали наличие сильной связи между вместимостью используемого подвижного состава и объёмом выполненной транспортной работы. На линиях с большим объёмом пассажирских перевозок используется более вместительный подвижной состав. С другой стороны, связь вместимости подвижного состава и социально-экономических факторов, определяющих размер пассажиропотоков, невелика.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, пассажирский транспорт, подвижной состав, коэффициент корреляции, вместимость, социально-экономические факторы, регион

© Каминьски В., 2020

Поступила: 01 апреля 2020; Принята к публикации: 17 июня 2020; Опубликовано: 24 декабря 2020

### Для цитирования:

Каминьски В. Анализ обеспеченности подвижным составом региональных железнодорожных пассажирских перевозок Польши // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2020. Т.10. №1. С.4-24.  
<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-4-24>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Введение

Объём пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте зависит от различных социально-экономических факторов, например, численности жителей, количества предприятий, а также числа автобусных и трамвайных маршрутов, обеспечивающих доступ из центра города к железнодорожному вокзалу. В свою очередь, величина пассажиропотока напрямую связана с объёмом выполненной транспортной работы [1].

Поскольку для удовлетворения возрастающего спроса на железнодорожные пассажирские перевозки требуется большее число поездов, то это является сигналом для увеличения как численности парка подвижного состава на определённой железнодорожной линии, так и использования более вместительных транспортных средств. Изменение числа пассажирских поездов на линии может осуществляться постепенно, в результате разработки нового годового графика движения поездов или его ежеквартальной корректировки. Это может быть реализовано путём изменения времени оборота поездов, в частности, времени простоя на конечных железнодорожных станциях (головных станциях или пунктах оборота составов).

Увеличение числа поездов на линии требует дополнительного финансирования, что может быть осуществлено достаточно быстро. Однако практически сложно быстро адаптировать провозную способность пассажирского железнодорожного транспорта к текущему спросу на перевозки. Поскольку собственником подвижного состава в Польше являются операторы пассажирских перевозок, то их задача заключается в предоставлении достаточного числа мест для пассажиров путём использования подвижного состава соответствующей вместимости при минимальных эксплуатационных затратах [2].

Состояние железнодорожной инфраструктуры в Польше систематически ухудшалось с конца 1980-х до начала XXI века. В течение последних десяти лет ситуация на многих железнодорожных линиях улучшается в результате ремонтов и модернизации [3]. Аналогичное улучшение наблюдается и в отношении подвижного состава, когда после длительного периода отсутствия закупок новых вагонов и локомотивов операторы пассажирских перевозок произвели их обновление.

Региональные железнодорожные пассажирские перевозки в Польше в настоящее время осуществляются различными операторами. Крупнейшим оператором является компания «Polregio», которая обслуживает региональные маршруты в десяти воеводствах (административная единица Польши). В оставшихся шести воеводствах работают следующие операторы: «Koleje Małopolskie», «Koleje Dolnośląskie», «Koleje Śląskie», «Koleje Wielkopolskie», «Koleje Mazowieckie» и «Łódzka Kolej Aglomeracyjna». Кроме того, в крупных мегаполисах, таких как Трójmieście (городская агломерация на севере Польши, включающая в себя Гданьск, Сопот и Гдыню) и Варшава, пассажирские перевозки обеспечивают следующие операторы: PKP

(Polskie Koleje Państwowe – Польские государственные железные дороги), SKM (Szybka Kolej Miejska – пригородный поезд), «Trójmieście» (принадлежит центральному правительству, региональным и местным властям), SKM «Warszawa» (собственность муниципалитета Варшавы), «Warszawska Kolej Dojazdowa» (принадлежит конгломерату самоуправлений), а также частный оператор «Arriva RP».

В связи с наличием множества операторов пассажирских перевозок в Польше, имеет место проблема согласования их работы на границах воеводств. Часто маршрут поездов одного оператора заканчивается на последней железнодорожной станции данного воеводства, что не обеспечивает надлежащие связи с соседними воеводствами.

Некоторые операторы имеют также проблемы с подвижным составом. Большая часть подвижного состава, включая все недавно приобретённые электропоезда и рельсовые автобусы, принадлежит воеводствам, которые предоставляют его операторам региональных пассажирских перевозок. Только региональные перевозчики имеют собственный подвижной состав. Однако это, в основном, старые вагоны. Кроме того, на региональном уровне работает множество операторов, парк подвижного состава которых состоит из небольшого количества вагонов. Недостаточное число вагонов объясняется тем, что новый подвижной состав приобретается в меньшем количестве, чем списывается изношенных вагонов и локомотивов.

Тем не менее, в настоящее время имеющийся в наличии подвижной состав обеспечивает средний объём пассажирских перевозок. Однако в случае поломки или ремонта транспортных средств наблюдается их нехватка. Это приводит к переполнению пассажирских вагонов или к необходимости перевода части пассажиропотока на автобусное сообщение.

До настоящего времени недостаточно изученным остаётся влияние различных социально-экономических факторов регионов с железнодорожным сообщением на использование вместимости железнодорожного пассажирского подвижного состава. Эти факторы, вероятно, оказывают существенное влияние на размер пассажиропотока, что, в свою очередь, определяет использование вместимости вагонов и потребность в подвижном составе.

В настоящем исследовании оценивается влияние социально-экономических факторов и объёма выполненной транспортной работы на загруженность пассажирского железнодорожного подвижного состава на отдельных железнодорожных линиях, расположенных в различных регионах Польши. Также была исследована взаимосвязь между выполненной транспортной работой и вместимостью подвижного состава. Расчёты проводились с использованием частных коэффициентов корреляции. В ходе данных расчётов среднее число мест в транспортных средствах использовалось в качестве зависимой переменной, а социально-экономические факторы, влияющие на размер пассажиропотока и объём выполненной транспортной работы, – в качестве независимых величин.





Таблица 1. Исследуемые главные и местные железнодорожные линии Польши

| №             | Воеводство               | Наименование линии                           | Длина,<br>км | Тип<br>перегона            | Электри-<br>фикация | Максимальная<br>скорость,<br>км/час | Среднее число<br>поездов в будние<br>дни, ед. |
|---------------|--------------------------|----------------------------------------------|--------------|----------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Главные линии |                          |                                              |              |                            |                     |                                     |                                               |
| 1             | Нижнесилезское           | Вроцлав-Главный –<br>Легница                 | 65           | двухпутный                 | да                  | 160                                 | 34                                            |
| 2             | Куявско-Поморское        | Быдгощ-Главный –<br>Торунь-Главный           | 51           | двухпутный                 | да                  | 120                                 | 24                                            |
| 3             | Люблинское               | Люблин – Реёвец                              | 55           | двухпутный                 | да                  | 120                                 | 26                                            |
| 4             | Любушское                | Збоншинек – Жепин                            | 75           | двухпутный                 | да                  | 160                                 | 14                                            |
| 5             | Лодзинское               | Лодзь-Калиская – Серадз                      | 59           | двухпутный                 | да                  | 80                                  | 28                                            |
| 6             | Малопольское             | Краков-Главный – Тарнув                      | 77           | двухпутный                 | да                  | 160                                 | 36                                            |
| 7             | Мазовецкое               | Варшава-Западная –<br>Гродзиск-Мазовецкий    | 27           | двухпутный                 | да                  | 120                                 | 136                                           |
| 8             | Опольское                | Ополе-Главный – Бжег                         | 40           | двухпутный                 | да                  | 160                                 | 28                                            |
| 9             | Подкарпатское            | Жешув-Главный –<br>Пшеворск                  | 36           | двухпутный                 | да                  | 120                                 | 30                                            |
| 10            | Подляское                | Белосток – Сокулка                           | 42           | однопутный                 | да                  | 80                                  | 16                                            |
| 11            | Поморское                | Гданьск-Главный – Тчев                       | 32           | двухпутный                 | да                  | 160                                 | 24                                            |
| 12            | Силезское                | Катовице – Гливице                           | 27           | двухпутный                 | да                  | 160                                 | 66                                            |
| 13            | Свентокшиское            | Кельце –<br>Скаржиско-Каменна                | 45           | двухпутный                 | да                  | 120                                 | 16                                            |
| 14            | Варминьско-<br>Мазурское | Олыштын-Главный –<br>Илава-Главный           | 69           | двухпутный                 | да                  | 100                                 | 20                                            |
| 15            | Великопольское           | Познань-Главный –<br>Збоншинь                | 74           | двухпутный                 | да                  | 160                                 | 30                                            |
| 16            | Западно-Поморское        | Щецин-Главный –<br>Голенюв                   | 38           | двухпутный                 | да                  | 120                                 | 36                                            |
| Местные линии |                          |                                              |              |                            |                     |                                     |                                               |
| 17            | Нижнесилезское           | Клодско-Главный –<br>Валбжих-Главный         | 51           | однопутный /<br>двухпутный | нет                 | 80                                  | 10                                            |
| 18            | Куявско-Поморское        | Грудзёндз – Хелмжа                           | 38           | однопутный                 | нет                 | 90                                  | 16                                            |
| 19            | Люблинское               | Замосць-Восточный –<br>Звежинец              | 32           | однопутный                 | нет                 | 80                                  | 10                                            |
| 20            | Любушское                | Жары – Зелёна-Гура                           | 53           | однопутный                 | нет                 | 80                                  | 8                                             |
| 21            | Лодзинское               | Лодзь-Калиская – Кутно                       | 68           | двухпутный                 | нет                 | 70                                  | 20                                            |
| 22            | Малопольское             | Новы-Сонч – Мушина                           | 51           | однопутный                 | нет                 | 80                                  | 10                                            |
| 23            | Мазовецкое               | Насельск – Серпц                             | 88           | однопутный                 | нет                 | 80                                  | 10                                            |
| 24            | Опольское                | Ныса – Кендзежин-Козле                       | 75           | двухпутный                 | нет                 | 50                                  | 14                                            |
| 25            | Подкарпатское            | Ясло – Загуж                                 | 69           | однопутный                 | нет                 | 80                                  | 4                                             |
| 26            | Подляское                | Белосток – Черемха                           | 77           | однопутный                 | нет                 | 80                                  | 8                                             |
| 27            | Поморское                | Хойнице – Косцежина                          | 69           | однопутный                 | нет                 | 80                                  | 8                                             |
| 28            | Силезское                | Живец – Звардонь                             | 37           | однопутный                 | да                  | 70                                  | 20                                            |
| 29            | Свентокшиское            | Скаржиско-Каменна –<br>Остروец-Свентокшиский | 46           | двухпутный                 | да                  | 80                                  | 10                                            |
| 30            | Варминьско-<br>Мазурское | Олыштын-Главный –<br>Бранево                 | 96           | однопутный                 | нет                 | 80                                  | 8                                             |
| 31            | Великопольское           | Лешно – Вольштын                             | 46           | однопутный                 | нет                 | 80                                  | 12                                            |
| 32            | Западно-Поморское        | Колобжег – Голенюв                           | 100          | однопутный                 | нет                 | 80                                  | 14                                            |



### 3. Подвижной состав, используемый на анализируемых железнодорожных линиях

В настоящее время парк пассажирского железнодорожного подвижного состава, обслуживающий региональные перевозки в отдельных воеводствах, имеет сложную структуру. Это связано с тем, что производители подвижного состава предлагают его адаптацию под нужды заказчика. Чаще всего это электропоезда одного семейства (например, Pesa Elf, Newag Impuls), но в разных модификациях, различающихся длиной поезда (числом секций), дизайном интерьера, числом мест для сидения, наличием специализированного оборудования для удовлетворения потребностей людей с ограниченными возможностями или с крупногабаритным багажом, включая велосипеды. Результатом таких изменений стало наличие в инвентарном парке перевозчиков электропоездов различных серий и разновидностей.

В последние годы, в связи с растущим спросом региональных пассажирских перевозчиков на подвижной состав, увеличилось предложение различных моделей электрических и дизельных поездов, при одновременном значительном сокращении численности традиционных пассажирских вагонов [5]. Это связано с заменой классических поездов электропоездами на электрифицированных линиях и рельсовыми автобусами на не электрифицированных. Кроме того, в настоящее время модернизировано большое число бывших в употреблении электропоездов путём изменения интерьера и его адаптации к современным потребностям.

С одной стороны, имеется возможность адаптации подвижного состава к потребностям перевозчика или даже конкретной железнодорожной линии. С другой – в случае нехватки подвижного состава необходимо приобретать новый, что связано с привлечением значительных финансовых ресурсов, подготовкой и проведением тендера, длительным ожиданием изготовления и поставки техники. Случаи, когда подвижной состав, отвечающий всем требованиям оператора, имеется в наличии у производителя в необходимом количестве, чрезвычайно редки. Таким образом, если перевозчик обеспечивает потребный объём пассажирских перевозок имеющимся подвижным составом, то, из-за указанных причин, а также из-за высокой закупочной стоимости, новый подвижной состав не приобретается. Однако устаревший подвижной состав может не удовлетворять современным требованиям, соблюдение которых особенно актуально для железнодорожных станций, на которых осуществляется пересадка пассажиров в поезда других перевозчиков.

На железнодорожных линиях, где наблюдается уменьшение пассажиропотока, решение о сохранении провозной способности на прежнем уровне приводит к высоким эксплуатационным расходам. С другой стороны, на линиях, где количество перевезённых пассажиров увеличилось, использование недостаточно вместительного подвижного состава создаёт трудности для пассажиров и может ограничить дальнейший рост пассажиропотока.

Другая проблема связана с разработкой схем и графиков движения пассажирских поездов и необходимостью сокращения порожнего пробега пассажирских вагонов [6]. Для решения соответствующих задач чаще всего используются методы линейного программирования [7].

Кроме того, необходимо учитывать изменения интенсивности пассажиропотоков в течение суток. Использование подвижного состава постоянной вместимости может приводит либо к его переполнению в часы пик, либо к недостаточной загруженности в межпиковые периоды. Таким образом, необходимо рассчитывать численность транспортных средств различной вместимости для обеспечения пассажирских перевозок на различных направлениях. В утренние и дневные часы пик несколько секций электропоездов могут быть соединены вместе, чтобы обеспечить большую вместимость, тогда как в межпиковые периоды транспортные средства могут быть выведены из эксплуатации для снижения операционных расходов [8]. Реализация таких решений требует выполнения дополнительных маневровых операций с подвижным составом, а также наличия свободных путей на железнодорожных станциях для отстоя составов поездов в межпиковые периоды [9]. Результатом подобной адаптации провозной способности конкретной железнодорожной линии к текущему спросу на пассажирские перевозки является минимизация эксплуатационных расходов перевозчиков [10].

Для выработки оптимальных решений по использованию подвижного состава применяют разнообразные математические методы, в частности, основанные на использовании эвристического распределения Бендера [11]. Такие методы позволяют рассчитать минимальную потребную численность парка подвижного состава [12]. Однако ключевым условием, позволяющим организовать надлежащее транспортное обслуживание населения, является наличие у перевозчика достаточного количества подвижного состава соответствующей вместимости.

Важной задачей, которую ежедневно приходится решать диспетчерам, является оптимальное распределение транспортных средств по маршрутам. Такое распределение осуществляется как вручную, так и с использованием специального программного обеспечения, позволяющего сократить затраты времени на решение таких задач [13]. Программные инструменты также помогают оперативно принимать решения по согласованию провозной способности линий с текущими потребностями в пассажирских перевозках [14]. При планировании маршрутов большой протяжённости могут использоваться интегрированные алгоритмы, основанные на теории графов [15], применение которых позволяет также учитывать плановые технические осмотры и ремонты, вероятность вывода подвижного состава из эксплуатации в результате отказов или аварий.

Характеристики подвижного состава, который эксплуатировался на исследуемых железнодорожных линиях в 2018 году, представлен в табл. 2, 3.

Таблица 2. Подвижной состав региональных пассажирских железнодорожных перевозок Польши

| Наименование линии                         | Марка подвижного состава                            |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Главные линии                              |                                                     |
| Вроцлав-Главный – Легница                  | 31WE, 45WE, SA134 · 2, 36WEa, SA139                 |
| Быдгощ-Главный – Торунь-Главный            | EN76, EN57, ED72, EN71, EN96                        |
| Люблин – Реёвец                            | EN57, SA134                                         |
| Збоншинек – Жепин                          | EN57, ED78                                          |
| Лодзь-Калиская – Серадз                    | E 4268 (FLIRT), EN57, EN57 · 2                      |
| Краков-Главный – Тарнув                    | EN64, EN79, EN57, EN78, EN78 · 2, EN64, EN77, EN63A |
| Варшава-Западная – Гродзиск-Мазовецкий     | EN57 · 2, 45WE, 19WE, 35WE                          |
| Ополе-Главный – Бжег                       | EN57, EN63A, ED72Ac                                 |
| Жешув-Главный – Пшеворск                   | EN64, EN76, EN71, EN57, EN62                        |
| Белосток – Сокулка                         | SA133, EN57, SA108                                  |
| Ганьск-Главный – Тчев                      | EN57, EN76, EN56 · 2, EN90, EN71, SA137 · 2         |
| Катовице – Гливице                         | 27WEb, 35WE, EN57, EN75, EN76, 34WEa, 22WE, 22WEb   |
| Кельце – Скаржиско-Камённа                 | EN63A, EN96, EN57 · 2, EN57, EN81, ED78             |
| Ольштын-Главный – Илава-Главный            | EN57, ED72                                          |
| Познань-Главный – Збоншинь                 | EN76 · 2, EN76, EN57, ED78                          |
| Щецин-Главный – Голеньов                   | SA103, ED78, EN63A, SA136, EN57                     |
| Местные линии                              |                                                     |
| Клодско-Главный – Валбжих-Главный          | SA134, SA135                                        |
| Грудзёндз – Хелмжа                         | MR/MRD, SA133, SA106, SA106+SA123, 628.4            |
| Замосць-Восточный – Звежинец               | SA134                                               |
| Жары – Зелёна-Гура                         | SA105, SA133, SA108                                 |
| Лодзь-Калиская – Кутно                     | E 4268 (FLIRT)                                      |
| Новы-Сонч – Мушина                         | EN99, EN79, EN57                                    |
| Насельск – Серпц                           | SA135, VT627                                        |
| Ныса – Кендзежин-Козле                     | SA134, SA103, SA137                                 |
| Ясло – Загуж                               | SA103, SA135, SA109                                 |
| Белосток – Черемха                         | SA133, SA108                                        |
| Хойнице – Косцежина                        | SA109                                               |
| Живец – Звардонь                           | EN76, EN71, EN75, 36WE, 27WEb                       |
| Скаржиско-Камённа – Островец-Свентокшиский | EN63A, EN96, EN57, EN81, ED78                       |
| Ольштын-Главный – Бранево                  | SA106                                               |
| Лешно – Вольштын                           | SA108, OI49 + 2 · 120A, SA134                       |
| Колобжег – Голеньов                        | SA103, SA136                                        |

Таблица 3. Марки подвижного состава, используемого на региональных пассажирских железнодорожных перевозках Польши

| Тип подвижного состава      | Марка подвижного состава                                                                                                                                |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Новые электропоезда         | 22WE, 22WEb, 27WEb, 31WE, 34WEa, 35WE, 36WE, 36WEa, 45WE, E 4268 (FLIRT), EN56, EN62, EN63A, EN64, EN75, EN76, EN77, EN78, ED78, EN79, EN90, EN96, EN99 |
| Устаревшие электропоезда    | EN57, EN71, ED72, ED72Ac                                                                                                                                |
| Новые дизельные поезда      | SA105, SA106, SA108, SA133, SA134, SA135, SA137, SA139                                                                                                  |
| Устаревшие дизельные поезда | MR/MRD, 628.4, VT627                                                                                                                                    |
| Паровоз                     | OI49                                                                                                                                                    |

На основании данных, представленных в табл. 2, а также с учётом вместимости отдельных марок подвижного состава и числа пересадок на каждой из анализируемых железнодорожных линий, рассчитана средняя вместимость подвижного состава. Результаты расчёта представлены в табл. 4. Кроме того, в эту таблицу включены значения объёма транспортной работы, выполненного региональным пассажирским транспортом на анализируемых линиях в 2018 году.

#### 4. Социально-экономические факторы, влияющие на величину пассажиропотока

Объём пассажирских перевозок конкретной железнодорожной линии зависит от пространственной структуры и социально-экономических показателей региона, по которому проходит эта линия. В настоящем исследовании учитывались следующие социально-экономические факторы регионов:

- численность населения в городах и сёлах;
- число малых (до 9 чел.), средних (10-49 чел.) и крупных (более 50 чел.) предприятий;
- доступность железнодорожных линий (транспортная доступность);
- число мест в объектах размещения (гостиницах, motelах и т. д.);
- число пассажиров;
- среднесуточное число ездов автобусов и трамваев, обеспечивающих перевозку пассажиров до железнодорожного вокзала [16].

Данные по выбранным социально-экономическим факторам за 2018 года для анализируемых линий и регионов представлены в табл. 5 [17].

Доступность железнодорожных линий рассчитывалась как отношение численности населения к длине железнодорожных линий в регионе. Для исключения влияния эффекта масштаба остальные показатели в дальнейших расчётах также рассчитывались как относительные величины к длине соответствующих железнодорожных линий. Среднесуточное число ездов автобусов и трамваев в дальнейших расчётах использовалось как абсолютная величина.

Таблица 4. Средняя вместимость подвижного состава и годовые объёмы транспортной работы на региональных пассажирских железнодорожных перевозках Польши

| Наименование линии                          | Транспортная работа, поезд-километры | Средняя вместимость поездов, мест |
|---------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Главные линии                               |                                      |                                   |
| Вроцлав-Главный – Легница                   | 811200                               | 221.2                             |
| Быдгощ-Главный – Торунь-Главный             | 441558                               | 192.6                             |
| Люблин – Рёвец                              | 518210                               | 157.0                             |
| Збоншинек – Жепин                           | 352050                               | 185.5                             |
| Лодзь-Калиская – Серадз                     | 631534                               | 150.0                             |
| Краков-Главный – Тарнув                     | 1009008                              | 194.6                             |
| Варшава-Западная – Гродзиск-Мазовецкий      | 1349136                              | 381.1                             |
| Ополе-Главный – Бжег                        | 404800                               | 181.7                             |
| Жешув-Главный – Пшеворск                    | 398016                               | 169.9                             |
| Белосток – Сокулка                          | 236544                               | 137.3                             |
| Ганьск-Главный – Тчев                       | 277056                               | 229.0                             |
| Катовице – Гливице                          | 647892                               | 216.1                             |
| Кельце – Скаржиско-Камённая                 | 244080                               | 172.8                             |
| Ольштын-Главный – Илава-Главный             | 489348                               | 206.0                             |
| Познань-Главный – Збоншинь                  | 808240                               | 248.7                             |
| Щецин-Главный – Голенюв                     | 499472                               | 164.7                             |
| Местные линии                               |                                      |                                   |
| Клодско-Главный – Валбжих-Главный           | 179826                               | 73.5                              |
| Грудзёндз – Хелмжа                          | 218044                               | 112.5                             |
| Замосць-Восточный – Звежинец                | 105920                               | 134.0                             |
| Жары – Зелёна-Гура                          | 143736                               | 95.2                              |
| Лодзь-Калиская – Кутно                      | 480307                               | 120.0                             |
| Новы-Сонч – Мушина                          | 186150                               | 166.8                             |
| Насельск – Серпц                            | 321200                               | 60.7                              |
| Ныса – Кендзежин-Козле                      | 352050                               | 88.5                              |
| Ясло – Загуж                                | 102120                               | 64.9                              |
| Белосток – Черемха                          | 224840                               | 116.0                             |
| Хойнице – Косцежина                         | 237102                               | 73.0                              |
| Живец – Звардонь                            | 282312                               | 235.3                             |
| Скаржиско-Камённая – Островец-Свентокшиский | 167900                               | 148.6                             |
| Ольштын-Главный – Бранево                   | 290496                               | 60.0                              |
| Лешно – Вольштын                            | 211140                               | 130.7                             |
| Колобжег – Голенюв                          | 542400                               | 105.5                             |

## 5. Оценка провозной способности региональных железнодорожных линий Польши

В разделе представлены результаты расчёта зависимостей вместимости подвижного состава от социально-экономических факторов, определяющих объёмы региональных пассажирских железнодорожных перевозок. Оценка производилась на основании расчёта коэффициента корреляции.

### 5.1 Метод расчёта и принятые допущения

В расчётах не учитывались перевозки в поездах дальнего следования, международные перевозки, поскольку такие перевозки имеют свою специфику. Поезда дальнего следования осуществляют перевозки между крупными населёнными пунктами и обеспечивают, в основном, перевозку туристов и путешественников, совершающих нерегулярные поездки. Поэтому социально-экономические факторы региона не оказывают существенного влияния на перевозки в поездах дальнего следования.

Коэффициенты корреляции часто используются для анализа функционирования систем железнодорожного транспорта. Например, с использованием этого метода выполнен анализ влияния различных факторов, в частности, погодных условий, на величину задержек поездов на четырёх железнодорожных линиях Венгрии [18]. Коэффициенты корреляции также используются для оценки взаимосвязи между пропускной способностью линий, длиной участков линии и расписанием движения поездов [19].

В простейшем случае для оценки наличия взаимосвязи между двумя случайными величинами используется коэффициент корреляции Пирсона. Полученное значение коэффициента корреляции Пирсона может быть неточным из-за влияния на исследуемые случайные величины других факторов. Для устранения такого влияния в настоящем исследовании использовался частный коэффициент корреляции. Этот коэффициент позволяет определить силу взаимосвязи двух случайных величин, исключая влияние других анализируемых факторов [20].

Для расчёта частного коэффициента корреляции используется матрица корреляции, которая содержит все отношения между анализируемыми переменными. Элементами корреляционной матрицы являются значения коэффициентов корреляции Пирсона для переменных  $i$  и  $j$ . Значение частного коэффициента корреляции рассчитывается в соответствии со следующей формулой

$$r_{ij \cdot 1 \dots (i-1)(i+1) \dots (j-1)(j+1) \dots k} = - \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii} - C_{ij}}},$$

где  $C_{ij}$ ,  $C_{ii}$ ,  $C_{jj}$  – алгебраические дополнения элементов  $r_{ij}$ ,  $r_{ii}$ ,  $r_{jj}$  матрицы коэффициентов корреляции;  $k$  – число случайных величин.

Таблица 5. Социально-экономические показатели регионов размещения анализируемых железнодорожных линий

| №             | Наименование<br>линии                              | Население,<br>чел. | Число предприятий, ед. |         |         | Доступ-<br>ность<br>линий,<br>чел./км | Число мест в<br>гостиницах,<br>чел. | Число<br>пасса-<br>жиров,<br>чел. | Среднесуточ-<br>ное число<br>автобусных и<br>трамвайных<br>ездов, ед. |
|---------------|----------------------------------------------------|--------------------|------------------------|---------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
|               |                                                    |                    | Малых                  | Средних | Крупных |                                       |                                     |                                   |                                                                       |
| Главные линии |                                                    |                    |                        |         |         |                                       |                                     |                                   |                                                                       |
| 1             | Вроцлав-Главный –<br>Легница                       | 758013             | 135152                 | 3641    | 985     | 3591.72                               | 13296                               | 73076                             | 285.62                                                                |
| 2             | Быдгощ-Главный –<br>Торунь-Главный                 | 572163             | 68354                  | 2330    | 698     | 3516.38                               | 8115                                | 43327                             | 210.00                                                                |
| 3             | Люблин – Реёвец                                    | 388645             | 48982                  | 1514    | 418     | 2735.39                               | 4526                                | 41053                             | 34.86                                                                 |
| 4             | Збоншинек – Жепин                                  | 40853              | 6528                   | 227     | 54      | 356.75                                | 2566                                | 6295                              | 2.64                                                                  |
| 5             | Лодзь-Калиская –<br>Сéрадз                         | 863521             | 107563                 | 4303    | 925     | 10267.10                              | 9521                                | 57623                             | 74.15                                                                 |
| 6             | Краков-Главный –<br>Тарнув                         | 948204             | 163658                 | 6068    | 1421    | 5268.79                               | 35440                               | 123357                            | 80.00                                                                 |
| 7             | Варшава-Западная –<br>Гродзиск-Мазовецкий          | 2025760            | 442698                 | 14809   | 3939    | 20361.57                              | 34149                               | 283173                            | 402.50                                                                |
| 8             | Ополе-Главный – Бжег                               | 174910             | 27909                  | 882     | 237     | 2478.87                               | 1839                                | 24582                             | 71.63                                                                 |
| 9             | Жёшув-Главный –<br>Пшеворск                        | 241271             | 31858                  | 1018    | 318     | 3633.26                               | 4469                                | 52132                             | 45.90                                                                 |
| 10            | Белосток – Сокулка                                 | 337044             | 38361                  | 1134    | 386     | 3542.62                               | 3094                                | 17521                             | 59.78                                                                 |
| 11            | Гданьск-Главный –<br>Тчев                          | 564995             | 85415                  | 2824    | 670     | 8287.99                               | 18557                               | 49672                             | 178.00                                                                |
| 12            | Катовице – Гливице                                 | 948112             | 107774                 | 4971    | 1281    | 20223.53                              | 8960                                | 174321                            | 327.50                                                                |
| 13            | Кельце –<br>Скаржиско-Камénна                      | 254824             | 36147                  | 1317    | 372     | 2843.10                               | 5726                                | 29370                             | 40.27                                                                 |
| 14            | Ольштын-Главный –<br>Илава-Главный                 | 244163             | 29237                  | 997     | 291     | 1914.11                               | 8099                                | 21784                             | 84.23                                                                 |
| 15            | Познань-Главный –<br>Збоншинь                      | 584872             | 121611                 | 4568    | 977     | 2842.12                               | 10617                               | 98209                             | 197.87                                                                |
| 16            | Щецин-Главный –<br>Голенюв                         | 428136             | 71782                  | 2207    | 459     | 5199.20                               | 7624                                | 26800                             | 110.00                                                                |
| Местные линии |                                                    |                    |                        |         |         |                                       |                                     |                                   |                                                                       |
| 17            | Клодско-Главный –<br>Валбжих-Главный               | 184290             | 20654                  | 577     | 141     | 1185.58                               | 2601                                | 12719                             | 8.33                                                                  |
| 18            | Грудзéндз – Хелмжа                                 | 111431             | 9684                   | 369     | 115     | 1954.70                               | 1425                                | 3813                              | 31.33                                                                 |
| 19            | Замосць-Восточный –<br>Звежинец                    | 76677              | 8541                   | 279     | 90      | 1919.04                               | 2544                                | 7084                              | 23.89                                                                 |
| 20            | Жары – Зелёна-Гура                                 | 185775             | 26129                  | 897     | 208     | 1514.98                               | 1534                                | 21145                             | 28.10                                                                 |
| 21            | Лодзь-Калиская –<br>Кутно                          | 828287             | 102150                 | 3985    | 903     | 10864.94                              | 8965                                | 53155                             | 86.56                                                                 |
| 22            | Новы-Сонч – Мушина                                 | 104896             | 13308                  | 527     | 143     | 987.71                                | 4755                                | 11364                             | 69.13                                                                 |
| 23            | Насельск – Серпц                                   | 64274              | 7012                   | 270     | 65      | 456.27                                | 611                                 | 3274                              | 2.86                                                                  |
| 24            | Ныса –<br>Кендзежин-Козле                          | 132923             | 19273                  | 654     | 159     | 1462.31                               | 5057                                | 9562                              | 25.46                                                                 |
| 25            | Ясло – Загуж                                       | 145984             | 17548                  | 667     | 221     | 1821.32                               | 2831                                | 32628                             | 26.91                                                                 |
| 26            | Белосток – Черемха                                 | 328781             | 38718                  | 1155    | 399     | 1837.33                               | 2863                                | 17894                             | 46.86                                                                 |
| 27            | Хойнице – Косцежина                                | 80769              | 7976                   | 305     | 92      | 609.45                                | 905                                 | 5758                              | 21.79                                                                 |
| 28            | Живец – Звардонь                                   | 60542              | 7308                   | 306     | 74      | 1032.82                               | 1682                                | 9718                              | 32.33                                                                 |
| 29            | Скаржиско-Камénна –<br>Островец-Свентокшис-<br>кий | 176108             | 18966                  | 639     | 195     | 2677.22                               | 1379                                | 13415                             | 11.00                                                                 |
| 30            | Ольштын-Главный –<br>Бранево                       | 214861             | 28478                  | 983     | 249     | 1258.51                               | 6091                                | 19930                             | 62.33                                                                 |
| 31            | Лешно – Вольштын                                   | 88347              | 15812                  | 725     | 167     | 1125.74                               | 3706                                | 13128                             | 9.15                                                                  |
| 32            | Колобжег – Голенюв                                 | 120852             | 20622                  | 627     | 160     | 872.65                                | 23929                               | 8174                              | 19.94                                                                 |



Частный коэффициент корреляции позволяет оценить исключительно линейную зависимость между исследуемыми переменными. Поэтому после его расчёта и в случае отсутствия тесной связи между переменными, необходимо при помощи построения диаграммы разброса оценить отклонение исследуемых переменных от графика линейной функции, соответствующей рассчитанному коэффициенту корреляции, а также проверить наличие нелинейной зависимости между анализируемыми переменными. Кроме того, расчёт частных коэффициентов корреляции характеризуется довольно высокой вычислительной сложностью.

## 5.2 Расчёт частных коэффициентов корреляции

Расчёт значений частных коэффициентов корреляции выполнялся с использованием программы STATISTICA. В качестве независимых переменных, определяющих объем пассажирских перевозок, использовались показатели по отдельным социально-экономическим факторам (табл. 5). В качестве зависимой переменной выбрана средняя вместимость подвижного состава (табл. 6, вариант1). Затем значения исследуемых независимых переменных были пересчитаны с учетом коэффициента, учитывающего количество региональных пассажирских поездов, пропущенных по каждой железнодорожной линии в течение года (табл. 6, вариант 2). В данной таблице значение коэффициента корреляции, попадающего в двусторонний доверительный интервал с уровнем значимости 0.05, выделено жирным шрифтом [21].

Таблица 6. Расчётные значения частных коэффициентов корреляции

| Показатель                                                  | Вариант 1 | Вариант 2    |
|-------------------------------------------------------------|-----------|--------------|
| Численность населения в регионе, чел./км                    | -0.036    | -0.123       |
| Численность малых предприятий, ед./км                       | -0.076    | -0.189       |
| Численность средних предприятий, ед./км                     | 0.078     | 0.116        |
| Численность крупных предприятий, ед./км                     | 0.029     | 0.109        |
| Доступность пассажирских железнодорожных перевозок, чел./км | -0.081    | 0.022        |
| Число мест размещения в гостиницах, чел./км                 | 0.073     | 0.104        |
| Число пассажиров, чел./км                                   | 0.178     | -0.019       |
| Число автобусных и трамвайных ездов, ед.                    | 0.286     | 0.303        |
| Число поездов, ед.                                          | -         | <b>0.481</b> |

Результаты расчёта частных коэффициентов корреляции показали, что выбранные социально-экономические факторы, определяющие размер пассажиропотока на конкретной железнодорожной линии, не оказывают существенного влияния на среднюю вместимость подвижного состава, используемого на этой линии. Это говорит о том, что при выборе вместимости

поездов, используемых на пригородных железнодорожных перевозках, не учитываются социально-экономические факторы соответствующего региона.

Примером фактора, не влияющего на среднюю вместимость железнодорожного пассажирского подвижного состава, является доступность железнодорожного транспорта для населения, величина которой зависит от размера и расположения населённых пунктов относительно железнодорожных линий. На рис. 2 представлена диаграмма разброса величины средней вместимости подвижного состава и доступности железнодорожных перевозок. Диаграмма показывает не только отсутствие линейной зависимости, которая исследовалась с использованием частного коэффициента корреляции, но и отсутствие какой-либо связи между этими величинами.

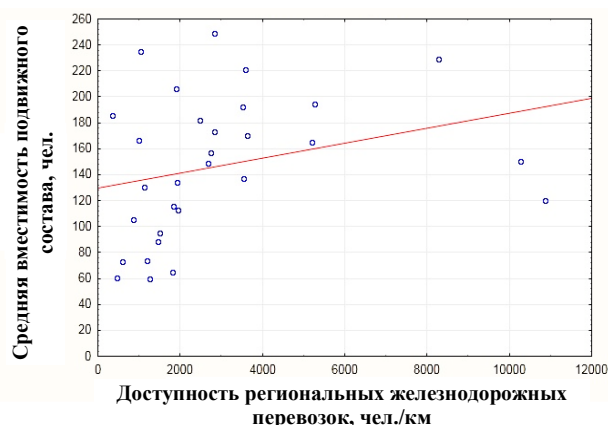


Рис. 2. Диаграмма разброса значений средней вместимости подвижного состава и доступности региональных железнодорожных перевозок для жителей

Более сильная связь наблюдается между величиной вместимости подвижного состава и среднесуточным числом ездов автобусов и трамваев, обеспечивающих перевозку пассажиров до железнодорожного вокзала (рис. 3).

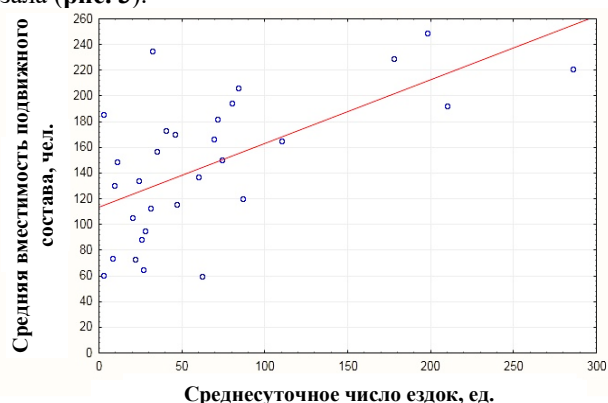


Рис. 3. Диаграмма разброса значений средней вместимости пассажирского железнодорожного подвижного состава и среднесуточного числа ездов автобусов и трамваев до железнодорожных вокзалов

На этой диаграмме разброса видно, что связь между исследуемыми величинами невелика, однако отчётливо прослеживается. Это вызвано тем, что люди, имеющие удобный доступ от места проживания к железнодорожному вокзалу, чаще решают воспользоваться этим видом транспорта. Кроме того, интенсивность автобусных и трамвайных перевозок выше в густонаселённых и экономически развитых регионах Польши, где существует большая потребность в пассажирских перевозках, что приводит к увеличению пассажиропотока. В свою очередь, региональные железнодорожные перевозчики, работающие в густонаселённых районах, имеют в своём распоряжении большие финансовые ресурсы, позволяющие им приобретать вместительный подвижной состав.

Однако наиболее сильная связь обнаружилась между величиной средней вместимости эксплуатируемого подвижного состава и числом поездов, пропущенных линиями в течение года. Диаграмма разброса для этих величин показана на **рис. 4**.

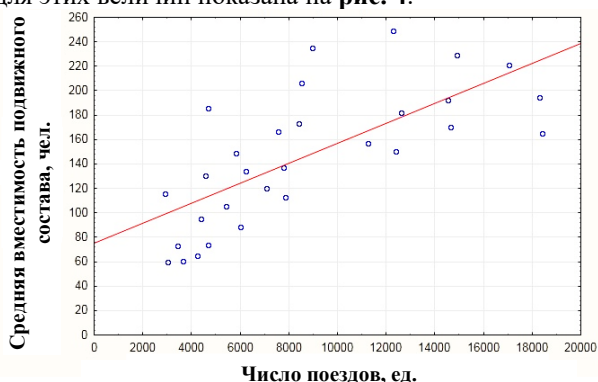


Рис. 4. Диаграмма разброса значений средней вместимости пассажирского железнодорожного подвижного состава и числа пропущенных железнодорожной линией поездов в течение года

Этот график показывает наличие линейной зависимости между этими величинами. На железнодорожных линиях с большим пассажиропотоком, помимо большего числа ниток графика движения пассажирских поездов, по сравнению с малодеятельными линиями, как правило используются в среднем более вместительные поезда.

## 6. Заключение

Авторы впервые исследовали связи между социально-экономическими факторами регионов с железнодорожным сообщением, объёмом пассажирских перевозок и вместимостью подвижного состава, используемого на соответствующих железнодорожных линиях. Расчёты показали, что среднее число мест в подвижном составе, используемом для региональных пассажирских перевозок на анализируемых железнодорожных линиях, не зависит от социально-экономических факторов, определяющих размеры пассажиропотоков. Не выявлена зависимость вместимости используемого подвижного состава от таких факторов, как: числен-

ность населения в регионе; число предприятий; доступность железнодорожного сообщения для населения; число мест размещения в гостиницах. Основной причиной отсутствия такой связи может быть недостаточный учёт спроса на региональные железнодорожные пассажирские перевозки в процессе их организации, в частности, при определении вместимости подвижного состава. В экономически менее развитых регионах Польши, например, в Подкарпатском и Подляском воеводствах, из-за нехватки подвижного состава у перевозчиков наблюдается недостаточная провозная способность железнодорожных линий.

Выявлена слабая связь между среднесуточным числом ездов автобусов и трамваев по маршрутам, связывающих населённые пункты с железнодорожными вокзалами, и вместимостью используемого подвижного состава. Это связано с тем, что люди, которым легче добраться от места жительства до железнодорожного вокзала, чаще совершают поездки по железной дороге. Кроме того, число автобусных и трамвайных маршрутов обычно больше в экономически развитых регионах страны. В таких регионах, например, в Силезском, Мазовецком воеводствах, региональные железнодорожные перевозчики располагают достаточными финансовыми средствами для приобретения более вместительного подвижного состава.

Наиболее сильная прямая связь наблюдается между величиной средней вместимости подвижного состава на линии и числом поездов, пропущенных линией в течение года. Как и в случае со среднесуточным числом ездов автобусов и трамваев до железнодорожных вокзалов, это связано с тем, что линии с большим числом пропускаемых пассажирских поездов расположены в экономически развитых регионах Польши.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что наилучшее соответствие провозной способности железнодорожных линий потребностям в региональных пассажирских перевозках, обеспеченность этих перевозок подвижным составом достаточной вместимости наблюдается в экономически развитых регионах Польши, расположенных, в основном на юге и западе страны. В менее экономически развитых регионах используются подвижной состав недостаточной вместимости.

Увеличение провозной способности регионального пассажирского железнодорожного транспорта стимулирует спрос на соответствующие перевозки. Недостаточная провозная способность железнодорожных линий заставляет население пользоваться автомобилями. Понимание представленных в статье связей между социально-экономическими факторами регионов и параметрами региональных железнодорожных перевозок имеет важное значение для эффективного городского и регионального планирования. В частности, повышение удовлетворённости населения в региональных железнодорожных пассажирских перевозках способствует уменьшению интенсивности потока автомобилей, уменьшению заторов на автодорогах, снижению выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта.



## Список литературы

1. Kamiński W., Ślaskowski A. Determination the influence of socio-economic factors on the volume of railway passenger transport in different regions of Poland // Transport Problems: XI International Conference. Katowice-Bochnia, 26-28 June. C. 308-319.
2. Thorlacius P., Larsen J., Laumanns M. An integrated rolling stock planning model for the Copenhagen suburban passenger railway // Journal of Rail Transport Planning & Management. 2015. T. 5. № 4. C. 240-262. <https://www.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2015.11.001>.
3. Massel A. The evolution of the railway infrastructure in Poland in the years 1990-2014 // Logistics. 2014. № 4. C. 2182-2190.
4. Nationwide railway base Homepage [Электронный ресурс]. URL: [www.bazakolejowa.pl](http://www.bazakolejowa.pl).
5. Bartczak K. Rolling stock analysis in Poland // Rail Transport Technique. 2015. № 12. C. 1780-1785.
6. Cadarso L., Marín Á. Robust rolling stock in rapid transit networks // Computers & Operations Research. 2011. T. 38. № 8. C. 1131-1142. <https://www.doi.org/10.1016/j.cor.2010.10.029>.
7. Giacco G. L., D'Ariano A., Pacciarelli D. Rolling Stock Rostering Optimization Under Maintenance Constraints // Journal of Intelligent Transportation Systems. 2014. T. 18. № 1. C. 95-105. <https://www.doi.org/10.1080/15472450.2013.801712>.
8. Alfieri A., Groot R., Kroon L., Schrijver A. Efficient Circulation of Railway Rolling Stock // Transportation Science. 2006. T. 40. № 3. C. 378-391. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.1060.0155>.
9. Haahr J., Lusby R. M. Integrating rolling stock scheduling with train unit shunting // European Journal of Operational Research. 2017. T. 259. № 2. C. 452-468. <https://www.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.053>.
10. Andrés J., Cadarso L., Marín Á. Maintenance Scheduling in Rolling Stock Circulations in Rapid Transit Networks // Transportation Research Procedia. 2015. T. 10. C. 524-533. <https://www.doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.006>.
11. Cadarso L., Marín Á. Improving robustness of rolling stock circulations in rapid transit networks // Computers & Operations Research. 2014. T. 51. C. 146-159. <https://www.doi.org/10.1016/j.cor.2014.05.007>.
12. Cacchiani V., Caprara A., Galli L., Kroon L., Maróti G., Toth P. Railway Rolling Stock Planning: Robustness Against Large Disruptions // Transportation Science. 2012. T. 46. № 2. C. 217-232. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.1110.0388>.
13. Lai Y.-C., Fan D.-C., Huang K.-L. Optimizing rolling stock assignment and maintenance plan for passenger railway operations // Computers & Industrial Engineering. 2015. T. 85. C. 284-295. <https://www.doi.org/10.1016/j.cie.2015.03.016>.
14. Abbink E., van den Berg B., Kroon L., Salomon M. Allocation of Railway Rolling Stock for Passenger Trains // Transportation Science. 2004. T. 38. № 1. C. 33-41. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.1030.0044>.
15. Borndörfer R., Reuther M., Schlechte T., Waas K., Weider S. Integrated Optimization of Rolling Stock Rotations for Intercity Railways // Transportation Science. 2016. T. 50. № 3. C. 863-877. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.2015.0633>.
16. Kamiński W., Ślaskowski A. Analysis of the Influence of Socio-Economic Factors on the Volume of Railway Passenger Transport in Łódź Region. // Reliability and Statistics in Transportation and Communication / I. Kabashkin [и др.]. Cham: Springer International Publishing, 2020. C. 233-243.
17. Statistics Poland [Электронный ресурс]. URL: <https://stat.gov.pl/>.
18. Nagy E., Csiszár C. Analysis of Delay Causes in Railway Passenger Transportation // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. 2015. <https://www.doi.org/10.3311/PPtr.7539>.
19. Dicembre A., Ricci S. Railway traffic on high density urban corridors: Capacity, signalling and timetable // Journal of Rail Transport Planning & Management. 2011. T. 1. № 2. C. 59-68. <https://www.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2011.11.001>.
20. Asuero A. G., Sayago A., González A. G. The Correlation Coefficient: An Overview // Critical Reviews in Analytical Chemistry. 2006. T. 36. № 1. C. 41-59. <https://www.doi.org/10.1080/10408340500526766>.
21. Kończak G. Testing the significance of partial and multiple correlation coefficients for multidimensional division tables // Economic Studies. 2014. T. 189. C. 40-48.

ISSN 2222-9396 (Print)

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-4-24>

# ANALYSIS OF CAPACITY OF ROLLING STOCK USED IN REGIONAL PASSENGER TRANSPORT IN DIFFERENT REGIONS OF POLAND

**Wojciech KAMIŃSKI**

Silesian University of Technology, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

E-mail: [Wojciech.Kaminski@polsl.pl](mailto:Wojciech.Kaminski@polsl.pl)

**Abstract.** This article assesses the impact of socio-economic factors and the amount of transport work done on the capacity of rolling stock used in passenger transport on selected railway lines located in various regions of Poland. The purpose of this article was to check the relationship between the capacity of rolling stock running on a railway line in regional passenger transport, and the socio-economic factors occurring in the area through which the analyzed railway line runs, and between volume of transport on this line. The analysis was carried out for 32 railway lines located in different voivodeships, with one main line and one local line selected from each voivodeship. The average number of seats in regional trains running on it was calculated for each of the analyzed lines. Then calculations of partial correlation coefficients were performed. During calculations, the average number of seats was used as a dependent variable, while socio-economic factors affecting the size of passenger flows and the amount of transport work done were used as independent values. The calculation used the transport data and socio-economic factors that occurred in 2018. The calculations showed that there is a clear relationship between the rolling stock capacity and the amount of transport work done. On lines where more transport work is done, more capacious rolling stock also runs. On the other hand, the dependence of rolling stock capacity on socio-economic factors affecting the size of passenger flows is small.

**Keywords:** railway transport, passenger transport, rolling stock, correlation coefficient, capacity, socio-economic factors, region

© Kamiński W., 2020

Received: April 01, 2020; Accepted: June 17, 2020; Published: December 24, 2020

**For citation:**

Kaminski W. Analysis of capacity of rolling stock used in regional passenger transport in different regions of Poland // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2020, vol.10, no.1, pp.4-24.

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-4-24>

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Many different socio-economic factors, such as the number of inhabitants, the number of business entities or the number of bus and tram connections enabling access from the city center to the railway station, affect the size of passenger flows. In turn, the size of passenger flows is related to the volume transport work done [1].

To transport more passengers, it is necessary to run more trains, while many passengers on an analyzed railway line is a signal for the organizer of transport to run more trains on this line. If there are large passenger flows on an analyzed line, there should also be used more capacious rolling stock on this line than on the lines on which passenger flows are smaller. Running an additional number of trains or, in the case of lower demand, limiting the transport offer can take place smoothly and can be implemented in a short period of time, one year with the introduction of a new timetable or quarterly in the case of a timetable correction. It can be implemented by changing the rolling stock circulation or by reducing the stop-ping time at return stations.

Of course, the launch of an additional number of trains requires the organizer of transport to provide additional funding, but its implementation can take place in a short period of time. However, it is practically impossible to quickly adapt the capacity of rolling stock to the current demand for transport. Rolling stock currently owned by the carrier is used to make connections. For the passenger carrier, the main problem is to provide sufficient seats for passengers, by using rolling stock with appropriate capacity while minimizing operating costs [2].

The condition of railway infrastructure in Poland has been systematically deteriorating from the late 1980s to the beginning of the 21st century. For about 10 years, due to numerous repairs and modernization of railway lines, the condition of infrastructure on many railway lines has been improving [3]. The situation is similar when it comes to rolling stock, where after many years of not purchasing new rolling stock for more than 10 years, there is an increase in the number of new vehicles owned by carriers.

Regional passenger transport in Poland is currently operated by many different carriers. The largest carrier is Polregio company, which services regional connections in 10 provinces. In the remaining 6 voivodeships, this traffic is served by companies owned by regional self-governments such as: Koleje Małopolskie, Koleje Dolnośląskie, Koleje Śląskie, Koleje Wielkopolskie, Koleje Mazowieckie, and the Łódzka Kolej Aglomeracyjna. In addition, the PKP Szybka Kolej Miejska w Trójmieście (co owned by the central government and regional and local self-governments), SKM Warszawa (owned by the City of Warsaw) and Warszawska Kolej Dojazdowa (owned by the conglomeration of self-governments) operate in large metropolitan areas such as the Trójmiasto (Gdańsk, Sopot, Gdynia) and Warsaw. Arriva RP is private operator.

In connection with the division of transport into so many operators, there is a problem of handling connections at the provinces border. Often, one operator's trains end at the last station in each province, thus not providing a proper connection to the neighboring province.

Some operators also have rolling stock problems. Most of the rolling stock used in regional passenger traffic, including all newly purchased electric units and rail buses, is owned by the provinces that lend it to operators. Only Regional Transportation has its own rolling stock, but they are mostly old vehicles. In Poland, many passenger carriers currently have problems with the appropriate amount of rolling stock needed to make connections. This problem occurs mainly in regional carriers, where there are many entities with a limited number of rolling stocks. This is usually associated with the decommissioning of old electric units and wagon depots and their replacement by an insufficient number of new vehicles. The number of vehicles in normal conditions is sufficient to carry out the intended transport.

However, due to the insufficient number of reserve vehicles in the event of breakdowns or inspections of individual vehicles, often transport is carried out with rolling stock of inadequate capacity or even in extreme cases replaced by bus communication.

Until now, the impact of various socio-economic factors occurring in the area crossed by the railway on the capacity of rolling stock running on this line has not been analyzed. These factors probably have a significant impact on the size of passenger flows, which in turn translates into the capacity of rolling stock running on the line.

This study assesses the impact of socio-economic factors and the amount of transport work done on the capacity of rolling stock used in passenger transport on selected railway lines located in various regions of Poland. These studies allow determining whether various social and economic factors occur-ring in the area through which a given railway line runs have an impact on the capacity of rolling stock running on that line. The relationship between the transport work done and the rolling stock capacity was also checked. Calculations were carried out using partial correlation coefficients. During these calculations, the average number of seats in vehicles was used as the dependent variable, while the socio-economic factors affecting the size of passenger flows and the amount of transport work done were used as independent values.

## 2. Analyzed railway lines

The analysis was carried out for 32 railway lines located in different voivodeships, on which regional passenger transport is carried out. A representative one main line and one local line were selected from each voivodeship. These lines are shown in **Fig. 1**. The main railway lines are marked in red and numbers 1-16, while the green color and numbers 17-32 represents local lines. Some of the analyzed railway lines are included in their entirety, while others only on limited sections located within one voivodeship.

**Tab. 1** shows the analyzed railway lines divided into voivodeships in which they are located. In addition, **Tab. 1** shows the length of these lines, the number of tracks on individual lines, their electrification, the maximum permissible speed, and average number of trains running on an individual line on a workday.

the creation of different series and varieties of rolling stock causing a huge variety in terms of their series.

Due to the large number of orders, the number of electric and diesel multiple units available to regional passenger carriers has increased in recent years. However, the number of passenger cars decreased significantly [5]. This is due to the replacement of classic trains by electric multiple units on electrified lines and by railbuses on non-electrified lines. Many used electric multiple units have been modernized. Also, during the modernization of the previously used rolling stock, it is possible to arrange the interior and adapt it to new needs.

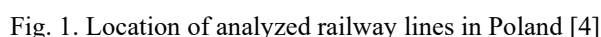


Table 1. Analyzed main and local lines

| №           | Voivodeship         | Line or Section                              | Line length, km | Number of tracks | Electrification | Maximum speed, km/h | Average number of trains on a workday |
|-------------|---------------------|----------------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|---------------------|---------------------------------------|
| Main lines  |                     |                                              |                 |                  |                 |                     |                                       |
| 1           | Lower Silesian      | Wrocław Główny – Legnica                     | 65              | double           | yes             | 160                 | 34                                    |
| 2           | Kuyavian-Pomeranian | Bydgoszcz Główny – Toruń Główny              | 51              | double           | yes             | 120                 | 24                                    |
| 3           | Lubelskie           | Lublin – Rejowiec                            | 55              | double           | yes             | 120                 | 26                                    |
| 4           | Lubuskie            | Zbąszynek – Rzepin                           | 75              | double           | yes             | 160                 | 14                                    |
| 5           | Łódzkie             | Łódź Kaliska - Sieradz                       | 59              | double           | yes             | 80                  | 28                                    |
| 6           | Lesser Poland       | Kraków Główny – Tarnów                       | 77              | double           | yes             | 160                 | 36                                    |
| 7           | Mazovian            | Warszawa Zachodnia – Grodzisk Mazowiecki     | 27              | double           | yes             | 120                 | 136                                   |
| 8           | Opolskie            | Opole Główny – Brzeg                         | 40              | double           | yes             | 160                 | 28                                    |
| 9           | Podkarpackie        | Rzeszów Główny – Przemyśl                    | 36              | double           | yes             | 120                 | 30                                    |
| 10          | Podlaskie           | Białystok – Sokółka                          | 42              | single           | yes             | 80                  | 16                                    |
| 11          | Pomeranian          | Gdańsk Główny – Tczew                        | 32              | double           | yes             | 160                 | 24                                    |
| 12          | Silesian            | Katowice – Gliwice                           | 27              | double           | yes             | 160                 | 66                                    |
| 13          | Świętokrzyskie      | Kielce – Skarżysko-Kamienna                  | 45              | double           | yes             | 120                 | 16                                    |
| 14          | Warmia-Masurian     | Olsztyn Główny – Iława Główny                | 69              | double           | yes             | 100                 | 20                                    |
| 15          | Greater Poland      | Poznań Główny – Zbąszyń                      | 74              | double           | yes             | 160                 | 30                                    |
| 16          | West Pomeranian     | Szczecin Główny – Goleniów                   | 38              | double           | yes             | 120                 | 36                                    |
| Local lines |                     |                                              |                 |                  |                 |                     |                                       |
| 17          | Lower Silesian      | Kłodzko Główny – Wałbrzych Główny            | 51              | single / double  | no              | 80                  | 10                                    |
| 18          | Kuyavian-Pomeranian | Grudziądz – Chełmża                          | 38              | single           | no              | 90                  | 16                                    |
| 19          | Lubelskie           | Zamość Wschód – Zwierzyniec                  | 32              | single           | no              | 80                  | 10                                    |
| 20          | Lubuskie            | Żary – Zielona Góra                          | 53              | single           | no              | 80                  | 8                                     |
| 21          | Łódzkie             | Łódź Kaliska - Kutno                         | 68              | double           | no              | 70                  | 20                                    |
| 22          | Lesser Poland       | Nowy Sącz – Muszyna                          | 51              | single           | no              | 80                  | 10                                    |
| 23          | Mazovian            | Nasielsk – Sierpc                            | 88              | single           | no              | 80                  | 10                                    |
| 24          | Opolskie            | Nysa – Kędzierzyn-Koźle                      | 75              | double           | no              | 50                  | 14                                    |
| 25          | Podkarpackie        | Jasło – Zagórz                               | 69              | single           | no              | 80                  | 4                                     |
| 26          | Podlaskie           | Białystok – Czeremcha                        | 77              | single           | no              | 80                  | 8                                     |
| 27          | Pomeranian          | Chojnice – Kościerzyna                       | 69              | single           | no              | 80                  | 8                                     |
| 28          | Silesian            | Żywiec – Zawonia                             | 37              | single           | yes             | 70                  | 20                                    |
| 29          | Świętokrzyskie      | Skarżysko-Kamienna – Ostrowiec Świętokrzyski | 46              | double           | yes             | 80                  | 10                                    |
| 30          | Warmia-Masurian     | Olsztyn Główny – Braniewo                    | 96              | single           | no              | 80                  | 8                                     |
| 31          | Greater Poland      | Leszno – Wolsztyn                            | 46              | single           | no              | 80                  | 12                                    |
| 32          | West Pomeranian     | Kołobrzeg – Goleniów                         | 100             | single           | no              | 80                  | 14                                    |



On the one hand, it is possible to accurately adapt the rolling stock to the needs of the carrier or even a specific railway line. However, the purchase of new rolling stock is an investment, the implementation of which requires the involvement of significant financial resources and a long time of waiting for the finished product. If a carrier has shortage of rolling stock, it is necessary to prepare and perform a tender procedure, then for a specified period the vehicles are assembled at the manufacturer, after which it is possible to transfer them to the ordering carrier. Only sporadically there are cases such that the ready rolling stock is at the manufacturer's and its immediate collection is possible. In addition, they usually only apply to individual vehicles. If a carrier does not have the problem of having enough rolling stock necessary to carry out the ordered transport work most often, due to the remarkably high purchase cost, new rolling stock is not ordered. In this case, when rolling stock purchased many years ago is used to service the connections, it may be inadequately adapted to the current transport needs.

On railway lines where passenger flows have decreased, already existing rolling stock with too large capacity can run, generating high operating costs. On the other hand, on lines where the number of transported passengers has increased, there is a possibility to use on its insufficient capacious rolling stock, generating difficulties for passengers. This may be a reason for stopping the further increase in the number of passengers.

Another problem is the arrangement of appropriate circuits for owned rolling stock. The empty spread of rolling stock should be limited or avoided if possible [6]. Linear programming is used to reduce the number of kilometers of rolling stock carrying out empty mileage [7].

Another problem in arranging the correct rolling stock cycles is the diversity of passenger flows due to the time of day. If the same rolling stock with a fixed capacity is still running on a given railway line, its overflow may occur during the morning and afternoon peak, and during the off-peak hours it will run only slightly full. Therefore, the number of different types of vehicles needed to service the planned connections should be precisely determined. In the morning and afternoon rush hours, the multiple units can be coupled together to obtain the larger capacity needed to travel the increased number of passengers. In turn, during the off-peak hours, the multiple units can be decoupled to reduce the cost of running the train [8]. These activities generate the need for additional rolling stock maneuvers and track occupation at the return station by rolling stock out of service during off-peak periods [9]. The benefit of adapting the rolling stock capacity to the current demand on a specific railway line is the carrier's minimized operating costs [10].

Various complex methods are used to set up the appropriate rolling stock circulation, such as the heuristic Benders distribution [11]. Thanks to this distribution, the lower limit of rolling stock utilization can be calculated in a short time [12]. However, the key issue that allows the proper circulation of rolling stock to be arranged is that the carrier has sufficient rolling stock of the right capacity.

Another problem is the dispatcher's daily assignment

of individual vehicles to a specific circuit. Vehicles assigned to a specific cycle can be done manually and using special software, which enables to shorten the time of performing this activity [13]. The use of appropriate software in addition to reducing the time needed to assign vehicles to circulation allows for a significant improvement in the provision of transport services, by better matching the capacity of rolling stock with passenger flows occurring at a given time [14]. In the case of rolling stock circulation planning over long distances, integrated algorithms based on graph theory can be used [15].

During planning circulation, it is necessary to consider exclusions the vehicles from use, both scheduled for inspections and random. Random factors excluding a vehicle from traffic may be both failures and participation in events such as accidents at level crossings or collisions with wild animals.

Vehicles running on the analyzed railway lines in 2018 are shown in **Tab. 2, 3**.

Based on the data contained in **Tab. 2**, considering the capacity of individual types of rolling stock and the number of connections made with these vehicles on each of the analyzed railway lines, the average capacity of rolling stock was calculated. This value, calculated for a specific railway line, shows the average number of seats in regional passenger trains running on it. The results of the calculated average number of seats for the analyzed railway lines are presented in **Tab. 4**. In addition, this table includes transport work done in regional passenger transport on these lines in 2018.

#### 4. Socio-economic factors affecting passenger flows

The size of passenger flows on a particular railway line depends on the spatial structure of the area through which an analyzed railway line runs. During the analysis, socio-economic factors were considered, such as:

- the number of people in cities and villages through which the railway line runs.
- the number of business entities registered in the communes at the railway line, divided into small, medium, and large entities (division expressed by the number of employees).
- number of commuters to work.
- the number of places in accommodation facilities (hotel, motels, etc.) located in communes at the railway line.
- number of bus and tram connections enabling access from the city center to the railway station [16].

These data are presented in **Tab. 5** for 2018. The data source are reports of the Central Statistical Office [17]. The last parameter, the availability of inhabitants to the line, was calculated based on data from the Central Statistical Office.

This parameter is affected by the distance of the station from the city center and the size of the population center in which the station is located [16]. To enable comparison of the analyzed railway lines having different lengths, the values of these factors were not used directly in the calculations, but their ratio to the length of the lines was used.

Table 2. Rolling stock used in regional passenger transport on the analyzed lines

| Line or section                              | Used rolling stock                                  |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Main lines</b>                            |                                                     |
| Wrocław Główny – Legnica                     | 31WE, 45WE, SA134 · 2, 36WEa, SA139                 |
| Bydgoszcz Główny – Toruń Główny              | EN76, EN57, ED72, EN71, EN96                        |
| Lublin – Rejowiec                            | EN57, SA134                                         |
| Zbąszynek – Rzepin                           | EN57, ED78                                          |
| Łódź Kaliska – Sieradz                       | E 4268 (FLIRT), EN57, EN57 · 2                      |
| Kraków Główny – Tarnów                       | EN64, EN79, EN57, EN78, EN78 · 2, EN64, EN77, EN63A |
| Warszawa Zachodnia – Grodzisk Mazowiecki     | EN57 · 2, 45WE, 19WE, 35WE                          |
| Opole Główny – Brzeg                         | EN57, EN63A, ED72Ac                                 |
| Rzeszów Główny – Przeworsk                   | EN64, EN76, EN71, EN57, EN62                        |
| Białystok – Sokółka                          | SA133, EN57, SA108                                  |
| Gdańsk Główny – Tczew                        | EN57, EN76, EN56 · 2, EN90, EN71, SA137 · 2         |
| Katowice – Gliwice                           | 27WEb, 35WE, EN57, EN75, EN76, 34WEa, 22WE, 22WEb   |
| Kielce – Skarżysko-Kamienna                  | EN63A, EN96, EN57 · 2, EN57, EN81, ED78             |
| Olsztyn Główny – Iława Główny                | EN57, ED72                                          |
| Poznań Główny – Zbąszyń                      | EN76 · 2, EN76, EN57, ED78                          |
| Szczecin Główny – Goleniów                   | SA103, ED78, EN63A, SA136, EN57                     |
| <b>Local Lines</b>                           |                                                     |
| Kłodzko Główny – Wałbrzych Główny            | SA134, SA135                                        |
| Grudziądz – Chełmża                          | MR/MRD, SA133, SA106, SA106+SA123, 628.4            |
| Zamość Wschód – Zwierzyniec                  | SA134                                               |
| Żary – Zielona Góra                          | SA105, SA133, SA108                                 |
| Łódź Kaliska – Kutno                         | E 4268 (FLIRT)                                      |
| Nowy Sącz – Muszyna                          | EN99, EN79, EN57                                    |
| Nasielsk – Sierpc                            | SA135, VT627                                        |
| Nysa – Kędzierzyn-Koźle                      | SA134, SA103, SA137                                 |
| Jasło – Zagórz                               | SA103, SA135, SA109                                 |
| Białystok – Czeremcha                        | SA133, SA108                                        |
| Chojnice – Kościerzyna                       | SA109                                               |
| Żywiec – Zwardoń                             | EN76, EN71, EN75, 36WE, 27WEb                       |
| Skarżysko-Kamienna – Ostrowiec Świętokrzyski | EN63A, EN96, EN57, EN81, ED78                       |
| Olsztyn Główny – Braniewo                    | SA106                                               |
| Leszno – Wolsztyn                            | SA108, Ol49 + 2 · 120A, SA134                       |
| Kołobrzeg – Goleniów                         | SA103, SA136                                        |

Table 3. Division of individual types of rolling stock

| Rolling stock type | Sign                                                                                                                                                    |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| New electric unit  | 22WE, 22WEb, 27WEb, 31WE, 34WEa, 35WE, 36WE, 36WEa, 45WE, E 4268 (FLIRT), EN56, EN62, EN63A, EN64, EN75, EN76, EN77, EN78, ED78, EN79, EN90, EN96, EN99 |
| Old electric unit  | EN57, EN71, ED72, ED72Ac                                                                                                                                |
| New railcar        | SA105, SA106, SA108, SA133, SA134, SA135, SA137, SA139                                                                                                  |
| Old railcar        | MR/MRD, 628.4, VT627                                                                                                                                    |
| Steam locomotive   | Ol49                                                                                                                                                    |

### 5. Determination of rolling stock capacity on the size of passenger flows

The analysis of the dependence of the rolling stock capacity on the size of passenger flows in regional transport was performed using correlation coefficients.

#### 5.1 Assumptions of the used method

The analysis did not consider the long-distance traffic, which has completely different specificity. In this traffic, it is important to connect large urban centers and provide connections in popular directions, where large streams of travelers occur, but the socio-economic factors of the area through which the railway line runs are not that important.

Correlation coefficients are often used to analyze rail transport systems. They were used to analyze delays on 4 selected railway lines in Hungary, where the causes of delays were examined, focusing on the impact of weather conditions [18]. Correlation coefficients have already been used to check the relationship between line capacity, length of line sections and the timetable arranged [19].

The simplest correlation coefficient is the Pearson correlation coefficient. This coefficient determines the impact between 2 variables. The obtained value of Pearson's correlation coefficient may be disturbed due to the relationship of a pair of variables with other analyzed variables. Therefore, the partial correlation coefficient was used for this analysis. This coefficient allows to determine the relationship between two variables excluding the influence of other analyzed variables [20].

Correlation matrix is used for calculation the partial correlation coefficient. This matrix contains all relationships between analyzed variables. The individual element of the correlation matrix is the value of the Pearson correlation coefficient for the variables  $i$  and  $j$ . The partial correlation coefficient is calculated using the formula

$$r_{ij.1...(i-1)(i+1)...(j-1)(j+1)...k} = - \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii} - C_{ij}}},$$

where  $C_{ij}$ ,  $C_{ii}$ ,  $C_{jj}$  – algebraic complements of the elements  $r_{ij}$ ,  $r_{ii}$ ,  $r_{jj}$  of matrix;  $k$  – number of analyzed variables.

Table 4. Average rolling stock capacity on individual railway lines

| Line or section                                 | Transport work done, trainkm | Average rolling stock capacity, seats |
|-------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| Main lines                                      |                              |                                       |
| Wrocław Główny – Legnica                        | 811200                       | 221.2                                 |
| Bydgoszcz Główny – Toruń Główny                 | 441558                       | 192.6                                 |
| Lublin – Rejowiec                               | 518210                       | 157.0                                 |
| Zbąszynek – Rzepin                              | 352050                       | 185.5                                 |
| Łódź Kaliska – Sieradz                          | 631534                       | 150.0                                 |
| Kraków Główny – Tarnów                          | 1009008                      | 194.6                                 |
| Warszawa Zachodnia – Grodzisk Mazowiecki        | 1349136                      | 381.1                                 |
| Opole Główny – Brzeg                            | 404800                       | 181.7                                 |
| Rzeszów Główny – Przeworsk                      | 398016                       | 169.9                                 |
| Białystok – Sokółka                             | 236544                       | 137.3                                 |
| Gdańsk Główny – Tczew                           | 277056                       | 229.0                                 |
| Katowice – Gliwice                              | 647892                       | 216.1                                 |
| Kielce – Skarżysko-Kamienna                     | 244080                       | 172.8                                 |
| Olsztyn Główny – Iława Główny                   | 489348                       | 206.0                                 |
| Poznań Główny – Zbąszyń                         | 808240                       | 248.7                                 |
| Szczecin Główny – Goleniów                      | 499472                       | 164.7                                 |
| Local lines                                     |                              |                                       |
| Kłodzko Główny – Wałbrzych Główny               | 179826                       | 73.5                                  |
| Grudziądz – Chełmża                             | 218044                       | 112.5                                 |
| Zamość Wschód – Zwierzyniec                     | 105920                       | 134.0                                 |
| Żary – Zielona Góra                             | 143736                       | 95.2                                  |
| Łódź Kaliska – Kutno                            | 480307                       | 120.0                                 |
| Nowy Sącz – Muszyna                             | 186150                       | 166.8                                 |
| Nasielsk – Sierpc                               | 321200                       | 60.7                                  |
| Nysa – Kędzierzyn-Koźle                         | 352050                       | 88.5                                  |
| Jasło – Zagórz                                  | 102120                       | 64.9                                  |
| Białystok – Czeremcha                           | 224840                       | 116.0                                 |
| Chojnice – Kości-<br>erzyna                     | 237102                       | 73.0                                  |
| Żywiec – Zwardoń                                | 282312                       | 235.3                                 |
| Skarżysko-Kamienna – Ostrowiec<br>Świętokrzyski | 167900                       | 148.6                                 |
| Olsztyn Główny – Braniewo                       | 290496                       | 60.0                                  |
| Leszno – Wolsztyn                               | 211140                       | 130.7                                 |
| Kołobrzeg – Goleniów                            | 542400                       | 105.5                                 |

The partial correlation coefficient allows to determine only the linear relationship between the examined variables. Therefore, after its calculation, in the case of obtain-

ing no relationship between variables, it is necessary to analyze scatter plots to check whether there is no non-linear relationship between the analyzed variables. Another problem associated with the use of partial correlation is the considerable complexity of calculations performed using this method.

## 5.2 The use of partial correlation coefficient

Because calculations of partial correlation coefficients are complex, STATISTICA software was used to determine the partial correlation coefficients in this analysis. During calculations, individual socio-economic factors affecting the size of passenger flows, presented in **Tab. 5**, were used as independent variables. In turn, the average rolling stock capacity was used as a dependent variable (**Tab. 6**, test 1). Then, the examined independent variables were expanded by the quotient of transport work done by the length of the line (**Tab. 6**, test 2). This quotient shows the number of regional passenger trains launched on individual railway lines during the year. The results of calculating the partial correlation coefficients of the average rolling stock capacity both for socio-economic factors affecting the size of passenger flows and after extending the independent variables by the number of regional passenger trains launched during the year are presented in **Tab. 6**. In this table, the correlation coefficient value with a significance level of 0.05 bilaterally has been bolded [21].

Calculations of partial correlation coefficients show that socio-economic factors affecting the size of passenger flows on a specific railway line do not have a significant impact on the average capacity of rolling stock running on this line in regional passenger transport. Most of these factors have no impact on rolling stock capacity at all.

An example of a factor that does not have impact for the average capacity of rolling stock running on a railway line is the availability of residents to this line, determined based on the size and location of population centers. **Fig. 2** presents the scatter chart of average rolling stock capacity and residents' availability to the railway line. From this graph, it can be noticed not only the lack of a linear relationship, which was studied using the partial correlation coefficient, but the lack of any relationship between these quantities.

The highest value of the partial correlation coefficient among the socio-economic factors affecting the size of passenger flows was achieved by the factor showing the average number of bus and tram connections in a day enabling access to the railway station from the city center. **Fig. 3** shows a scatter chart for these quantities.

In this chart, the relationship between these quantities is small, but clearly visible. This is because people having easy access from their places of residence to the railway station more often decide to use this mode of transport. In addition, the number of bus and tram connections is higher in densely populated and economically developed regions of Poland. There is a greater need for population movement, which causes an increase in passenger flows. In turn, regional rail carriers operating in densely populated areas have greater financial resources at their disposal, which allows the purchase of capacious rolling stock.

Table 5. Socio-economic factors affecting the size of passenger flows

| №           | Line or section                                    | Numb. of<br>people, pe. | Number of entities |                 |                   | Availability<br>inhabitants to<br>line, pe./km | Number of<br>accommodations<br>places, pe. | Number of<br>commuters,<br>pe. | Bus and tram<br>connections |
|-------------|----------------------------------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|-------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
|             |                                                    |                         | up to 9<br>people  | 10-49<br>people | from 50<br>people |                                                |                                            |                                |                             |
| Main lines  |                                                    |                         |                    |                 |                   |                                                |                                            |                                |                             |
| 1           | Wrocław Główny –<br>Legnica                        | 758013                  | 135152             | 3641            | 985               | 3591.72                                        | 13296                                      | 73076                          | 285.62                      |
| 2           | Bydgoszcz Główny –<br>Toruń Główny                 | 572163                  | 68354              | 2330            | 698               | 3516.38                                        | 8115                                       | 43327                          | 210.00                      |
| 3           | Lublin – Rejowiec                                  | 388645                  | 48982              | 1514            | 418               | 2735.39                                        | 4526                                       | 41053                          | 34.86                       |
| 4           | Zbąszynek – Rzepin                                 | 40853                   | 6528               | 227             | 54                | 356.75                                         | 2566                                       | 6295                           | 2.64                        |
| 5           | Łódź Kaliska - Sieradz                             | 863521                  | 107563             | 4303            | 925               | 10267.10                                       | 9521                                       | 57623                          | 74.15                       |
| 6           | Kraków Główny – Tar-<br>nów                        | 948204                  | 163658             | 6068            | 1421              | 5268.79                                        | 35440                                      | 123357                         | 80.00                       |
| 7           | Warszawa Zachodnia –<br>Grodzisk Mazowiecki        | 2025760                 | 442698             | 14809           | 3939              | 20361.57                                       | 34149                                      | 283173                         | 402.50                      |
| 8           | Opole Główny – Brzeg                               | 174910                  | 27909              | 882             | 237               | 2478.87                                        | 1839                                       | 24582                          | 71.63                       |
| 9           | Rzeszów Główny –<br>Przeworsk                      | 241271                  | 31858              | 1018            | 318               | 3633.26                                        | 4469                                       | 52132                          | 45.90                       |
| 10          | Białystok – Sokółka                                | 337044                  | 38361              | 1134            | 386               | 3542.62                                        | 3094                                       | 17521                          | 59.78                       |
| 11          | Gdańsk Główny –<br>Tczew                           | 564995                  | 85415              | 2824            | 670               | 8287.99                                        | 18557                                      | 49672                          | 178.00                      |
| 12          | Katowice – Gliwice                                 | 948112                  | 107774             | 4971            | 1281              | 20223.53                                       | 8960                                       | 174321                         | 327.50                      |
| 13          | Kielce –<br>Skarżysko-Kamienna                     | 254824                  | 36147              | 1317            | 372               | 2843.10                                        | 5726                                       | 29370                          | 40.27                       |
| 14          | Olsztyn Główny –<br>Iława Główny                   | 244163                  | 29237              | 997             | 291               | 1914.11                                        | 8099                                       | 21784                          | 84.23                       |
| 15          | Poznań Główny –<br>Zbąszyń                         | 584872                  | 121611             | 4568            | 977               | 2842.12                                        | 10617                                      | 98209                          | 197.87                      |
| 16          | Szczecin Główny –<br>Goleniów                      | 428136                  | 71782              | 2207            | 459               | 5199.20                                        | 7624                                       | 26800                          | 110.00                      |
| Local lines |                                                    |                         |                    |                 |                   |                                                |                                            |                                |                             |
| 17          | Kłodzko Główny –<br>Wałbrzych Główny               | 184290                  | 20654              | 577             | 141               | 1185.58                                        | 2601                                       | 12719                          | 8.33                        |
| 18          | Grudziądz – Chełmża                                | 111431                  | 9684               | 369             | 115               | 1954.70                                        | 1425                                       | 3813                           | 31.33                       |
| 19          | Zamość Wschód –<br>Zwierzyniec                     | 76677                   | 8541               | 279             | 90                | 1919.04                                        | 2544                                       | 7084                           | 23.89                       |
| 20          | Żary – Zielona Góra                                | 185775                  | 26129              | 897             | 208               | 1514.98                                        | 1534                                       | 21145                          | 28.10                       |
| 21          | Łódź Kaliska – Kutno                               | 828287                  | 102150             | 3985            | 903               | 10864.94                                       | 8965                                       | 53155                          | 86.56                       |
| 22          | Nowy Sącz – Muszyna                                | 104896                  | 13308              | 527             | 143               | 987.71                                         | 4755                                       | 11364                          | 69.13                       |
| 23          | Nasielsk – Sierpc                                  | 64274                   | 7012               | 270             | 65                | 456.27                                         | 611                                        | 3274                           | 2.86                        |
| 24          | Nysa –<br>Kędzierzyn-Koźle                         | 132923                  | 19273              | 654             | 159               | 1462.31                                        | 5057                                       | 9562                           | 25.46                       |
| 25          | Jasło – Zagórz                                     | 145984                  | 17548              | 667             | 221               | 1821.32                                        | 2831                                       | 32628                          | 26.91                       |
| 26          | Białystok – Czeremcha                              | 328781                  | 38718              | 1155            | 399               | 1837.33                                        | 2863                                       | 17894                          | 46.86                       |
| 27          | Chojnice – Kości-<br>erzyna                        | 80769                   | 7976               | 305             | 92                | 609.45                                         | 905                                        | 5758                           | 21.79                       |
| 28          | Żywiec – Zwardoń                                   | 60542                   | 7308               | 306             | 74                | 1032.82                                        | 1682                                       | 9718                           | 32.33                       |
| 29          | Skarżysko-Kamienna –<br>Ostrowiec<br>Świętokrzyski | 176108                  | 18966              | 639             | 195               | 2677.22                                        | 1379                                       | 13415                          | 11.00                       |
| 30          | Olsztyn Główny –<br>Braniewo                       | 214861                  | 28478              | 983             | 249               | 1258.51                                        | 6091                                       | 19930                          | 62.33                       |
| 31          | Leszno – Wolsztyn                                  | 88347                   | 15812              | 725             | 167               | 1125.74                                        | 3706                                       | 13128                          | 9.15                        |
| 32          | Kołobrzeg – Goleniów                               | 120852                  | 20622              | 627             | 160               | 872.65                                         | 23929                                      | 8174                           | 19.94                       |



Table 6. Calculated values of partial correlation coefficient

| Factor                                                | Average rolling stock capacity, seats |              |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
|                                                       | test 1                                | test 2       |
| Number of people / line length, pe./km                | -0.036                                | -0.123       |
| Number of entities up to 9 pe. / line length, ent./km | -0.076                                | -0.189       |
| Number of entities 10-49 pe. / line length, ent./km   | 0.078                                 | 0.116        |
| Number of entities from 50 pe. / line length, ent./km | 0.029                                 | 0.109        |
| Availability inhabitants to line, pe./km              | -0.081                                | 0.022        |
| Number of accommodations places / line length, pe./km | 0.073                                 | 0.104        |
| Number of commuters / line length, pe./km             | 0.178                                 | -0.019       |
| Bus and tram connections                              | 0.286                                 | 0.303        |
| Number of running trains                              | -                                     | <b>0.481</b> |

However, the largest correlation exists between the average rolling stock capacity and the number of running trains during the year. The scatter chart for these quantities is shown in Fig. 4.

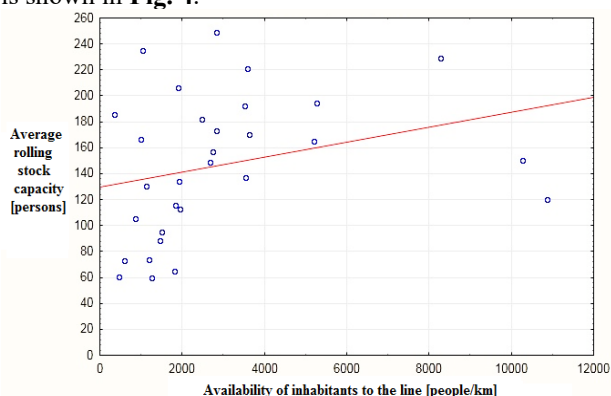


Fig. 2. Scatter chart of average rolling stock capacity and residents' availability to the railway line

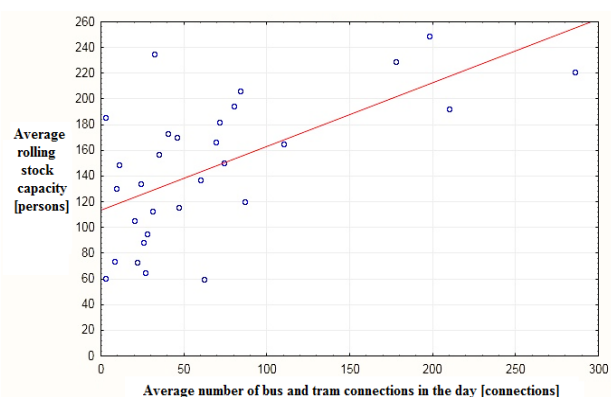


Fig. 3. Scatter chart of average rolling stock capacity and average number of bus and tram connections

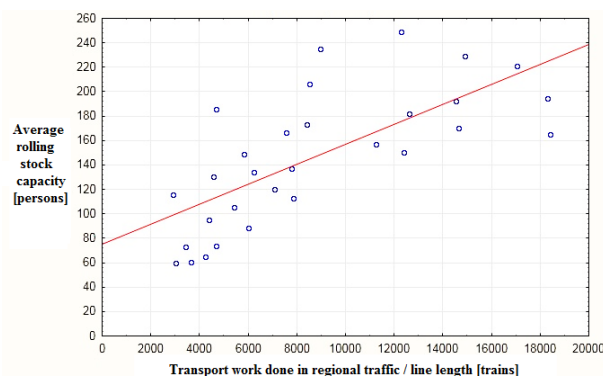


Fig. 4. Scatter chart of average rolling stock capacity and number of running trains during the year

This graph shows a clear linear relationship between these quantities. On railway lines with exceptionally large passenger flows, in addition to the fact that the number of running trains is large, the average capacity of rolling stock operating there is also higher than for lines with smaller passenger flows.

## 6. Conclusion

Earlier, no calculations were made of the impact of socio-economic factors in the area crossed by the railway line and the volume of transport on the rolling stock capacity on the given railway line. The calculations showed that the average number of seats in the rolling stock used for regional passenger transport on the analyzed railway lines does not depend on socio-economic factors affecting the size of passenger flows. There is no dependence of the rolling stock capacity on factors such as: the number of inhabitants in the area crossed by the railway line, the number of business entities, the availability of inhabitants to the railway line and the number of beds in accommodation facilities. The reason for the lack of this relationship may be the fact that the capacity of the rolling stock is not adapted to the passenger flows. Particularly in economically less developed areas (e.g., Podkarpackie and Podlaskie Voivodeships) due to the shortages of rolling stock at carriers, the number of seats on regional passenger trains may be insufficient.

Only a small relationship exists between the rolling stock capacity and the average number of bus and tram connections enabling access from the city center to the railway station. This is because people having easier access from their place of residence to the railway station more often decide to use rail transport. In addition, the number of bus and tram connections is generally higher in more economically developed regions of the country. In such regions (e.g., Silesian, Mazovian voivodeships), regional rail carriers have the financial means to purchase the appropriate rolling stock.

The largest relationship can be seen between the average rolling stock capacity and the number of running trains during the year. On railway lines, with many running trains, also the average capacity of rolling stock operating there is large. It is related, as in the case of the average number of bus and tram connections, to the fact that lines



with many trains are in more developed regions of Poland.

Based on the obtained results, it can be concluded that an adequate rolling stock capacity adapted to transport needs is ensured in more economically developed regions of Poland, mainly in the south and west of the country. However, in less developed economically areas, therefore in the eastern regions of Poland, the capacity of rolling stock operating in regional passenger transport on some lines is insufficient. Also, a larger number of running trains generate larger passenger transport. Passengers who have

a small number of rail connections at their disposal can choose another mode of transport more suited to their needs (often a car), while many trains encourage the use of rail transport services. This may be important in urban planning, as it increases the frequency of trains and increasing the number of passengers transported in this way. This, in turn, can help reduce traffic problems, such as peak traffic jams that occur in many cities, not just the major ones.

### References

1. Kamiński W., Śladowski A. Determination the influence of socio-economic factors on the volume of railway passenger transport in different regions of Poland // Transport Problems: XI International Conference. 2019, pp. 308–319.
2. Thorlacius P., Larsen J., Laumanns M. *An integrated rolling stock planning model for the Copenhagen suburban passenger railway* // Journal of Rail Transport Planning & Management. 2015, vol. 5, no. 4, pp. 240–262. <https://www.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2015.11.001>.
3. Massel A. *The evolution of the railway infrastructure in Poland in the years 1990-2014* // Logistics. 2014, no. 4, pp. 2182–2190. (in Polish).
4. Nationwide railway base Homepage. Available at: [www.bazakolejowa.pl](http://www.bazakolejowa.pl). (in Polish).
5. Bartczak K. *Rolling stock analysis in Poland* // Rail Transport Technique. 2015, no. 12, pp. 1780–1785. (in Polish).
6. Cadarso L., Marín Á. *Robust rolling stock in rapid transit networks* // Computers & Operations Research. 2011, vol. 38, no. 8, pp. 1131–1142. <https://www.doi.org/10.1016/j.cor.2010.10.029>.
7. Giacco G. L., D'Ariano A., Pacciarelli D. *Rolling Stock Rostering Optimization Under Maintenance Constraints* // Journal of Intelligent Transportation Systems. 2014, vol. 18, no. 1, pp. 95–105. <https://www.doi.org/10.1080/15472450.2013.801712>.
8. Alfieri A., Groot R., Kroon L., Schrijver A. *Efficient Circulation of Railway Rolling Stock* // Transportation Science. 2006, vol. 40, no. 3, pp. 378–391. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.1060.0155>.
9. Haahr J., Lusby R. M. *Integrating rolling stock scheduling with train unit shunting* // European Journal of Operational Research. 2017, vol. 259, no. 2, pp. 452–468. <https://www.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.053>.
10. Andrés J., Cadarso L., Marín Á. *Maintenance Scheduling in Rolling Stock Circulations in Rapid Transit Networks* // Transportation Research Procedia. 2015, vol. 10, pp. 524–533. <https://www.doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.006>.
11. Cadarso L., Marín Á. *Improving robustness of rolling stock circulations in rapid transit networks* // Computers & Operations Research. 2014, vol. 51, pp. 146–159. <https://www.doi.org/10.1016/j.cor.2014.05.007>.
12. Cacchiani V., Caprara A., Galli L., Kroon L., Maróti G., Toth P. *Railway Rolling Stock Planning: Robustness Against Large Disruptions* // Transportation Science. 2012, vol. 46, no. 2, pp. 217–232. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.1110.0388>.
13. Lai Y.-C., Fan D.-C., Huang K.-L. *Optimizing rolling stock assignment and maintenance plan for passenger railway operations* // Computers & Industrial Engineering. 2015, vol. 85, pp. 284–295. <https://www.doi.org/10.1016/j.cie.2015.03.016>.
14. Abbink E., van den Berg B., Kroon L., Salomon M. *Allocation of Railway Rolling Stock for Passenger Trains* // Transportation Science. 2004, vol. 38, no. 1, pp. 33–41. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.1030.0044>.
15. Borndörfer R., Reuther M., Schlechte T., Waas K., Weider S. *Integrated Optimization of Rolling Stock Rotations for Intercity Railways* // Transportation Science. 2016, vol. 50, no. 3, pp. 863–877. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.2015.0633>.
16. Kamiński W., Śladowski A. *Analysis of the Influence of Socio-Economic Factors on the Volume of Railway Passenger Transport in Łódź Region* // Reliability and Statistics in Transportation and Communication: Lecture Notes in Networks and Systems]. 2020. vol. 117, Cham: Springer International Publishing, pp. 233–243.
17. Statistics Poland. Available at: <https://stat.gov.pl/>.
18. Nagy E., Csiszár C. *Analysis of Delay Causes in Railway Passenger Transportation* // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. 2015. <https://www.doi.org/10.3311/PPtr.7539>.
19. Dicembre A., Ricci S. *Railway traffic on high density urban corridors: Capacity, signalling and timetable* // Journal of Rail Transport Planning & Management. 2011, vol. 1, no. 2, pp. 59–68. <https://www.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2011.11.001>.
20. Asuero A. G., Sayago A., González A. G. *The Correlation Coefficient: An Overview* // Critical Reviews in Analytical Chemistry. 2006, vol. 36, no. 1, pp. 41–59. <https://www.doi.org/10.1080/10408340500526766>.
21. Kończak G. *Testing the significance of partial and multiple correlation coefficients for multidimensional division tables* // Economic Studies. 2014, vol. 189, pp. 40–48. (in Polish).



ISSN 2222-9396 (Print)

УДК 622.684:658.58

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-25-31>

## МОНИТОРИНГ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ РЕМОНТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ БЕЛАЗ-7513 И БЕЛАЗ-75306 НА РАЗРЕЗЕ «ЧЕРНОГОРСКИЙ»

Хажиев В.А., Байкин В.С.\*, Хакимьянов В.А., Маслюков С.П.

Научно-исследовательский институт эффективности и безопасности горного производства,  
г. Челябинск, Россия

\* E-mail: [valentin\\_baikin@mail.ru](mailto:valentin_baikin@mail.ru)

**Аннотация.** На разрезе «Черногорский» в течение последних пятнадцати лет наблюдается устойчивый рост объемов добычи и производительности труда, что, в первую очередь, связано с увеличением численности парка горно-транспортного оборудования, его единичной мощности и уровня использования. Вместе с тем, изменение характеристик используемого оборудования зачастую сопровождается корректировкой только технологии его работы, без соответствующих организационных изменений. Данная ситуация приводит к снижению эффективности процесса эксплуатации горно-транспортного оборудования. В настоящем исследовании выполнен анализ опыта изменения организации технического обслуживания автосамосвалов БелАЗ-7513 и БелАЗ-75306 на разрезе «Черногорский» как результата мониторинга организации ремонтного обслуживания этих машин. Анализ реализации основных функций мониторинга: наблюдение, анализ, оценка и прогнозирование позволил установить, что одним из ключевых организационных факторов, негативно влияющих на качество проведения технического обслуживания карьерных автосамосвалов в условиях разреза «Черногорский», является низкая заинтересованность водителей в предоставлении своевременной и достоверной информации о техническом состоянии этих машин. Посредством изменения схемы взаимодействия между водителями и механиками службы ремонта было достигнуто снижение продолжительности проведения технического обслуживания на 5-12 % в зависимости от его видов, а также сокращение количества отказов на 7-20% в зависимости от модели БелАЗ. Месячный экономический эффект составил порядка 7 млн руб.

**Ключевые слова:** мониторинг, организация, техническое обслуживание, горно-транспортное оборудование, карьерный автосамосвал, взаимодействие, экономический эффект

© Хажиев В.А., Байкин В.С., Хакимьянов В.А., Маслюков С.П., 2020

Поступила: 11 февраля 2020; Принята к публикации: 02 сентября 2020; Опубликовано: 24 декабря 2020

### Для цитирования:

Хажиев В.А., Байкин В.С., Хакимьянов В.А., Маслюков С.П. Мониторинг и совершенствование организации ремонтного обслуживания карьерных автосамосвалов БелАЗ-7513 и БелАЗ-75306 на разрезе «Черногорский» // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2020. Т.10. №1. С.25-31. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-25-31>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



ISSN 2222-9396 (Print)

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-25-31>

## MONITORING AND IMPROVEMENT OF THE BELAZ-7513 AND BELAZ-75306 MINING DUMP TRUCKS REPAIR SERVICE ORGANIZATION AT THE OPEN PIT "CHERNOGORSKY"

Khazhiev V.A., Baikin V.S.\*, Khakimianov V.A., Maslyukov S.P.

Scientific Research Institute of Efficiency and Safety of Mining Production, Chelyabinsk, Russia

\* E-mail: [valentin\\_baikin@mail.ru](mailto:valentin_baikin@mail.ru)

**Abstract.** A steady growth in production volumes and labor productivity has been observed at the Chernogorsky open-pit of OOO SUEK-Khakassia over the past fifteen years. This is primarily due to an increase in the number of mining equipment, capacity and level of use. At the same time, changes in the characteristics of the equipment used are often accompanied by adjustments only to the technology of its operation, without corresponding organizational changes. This situation leads to a decrease in the efficiency of the operation of mining equipment. The present study analyzes the experience of changing the organization of maintenance of BelAZ-7513 and BelAZ-75306 dump trucks at the Chernogorsky open pit as a result of monitoring the organization of repair service for these machines. The analysis of the implementation of the main monitoring functions is carried out: observation, analysis, assessment and forecasting. The analysis made it possible to establish that one of the key organizational factors that negatively affect the quality of maintenance of dump trucks in the Chernogorsky open pit is the low interest of drivers in providing timely and reliable information about the technical condition of these machines. A change in the scheme of interaction between drivers and mechanics of the repair service is proposed. As a result, a 5-12% reduction in the duration of maintenance was achieved, depending on its types, as well as a reduction in the number of failures by 7-20%, depending on the BelAZ model. The monthly economic effect amounted to about 7 million rubles.

**Keywords:** monitoring, organization, maintenance, mining and transport equipment, mining dump truck, interaction, economic effect

© Khazhiev V.A., Baikin V.S., Khakimianov V.A., Maslyukov S.P., 2020

Received: February 11, 2020; Accepted: September 02, 2020; Published: December 24, 2020

### For citation:

Khazhiev V.A., Baikin V.S., Khakimianov V.A., Maslyukov S.P. Monitoring and improvement of the BelAZ-7513 and BelAZ -75306 mining dump truck repairs service organization at the open pit "Chernogorsky" // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2020, vol.10, no.1, pp.25-31. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-25-31>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Введение

Ремонтное обслуживание оборудования является неотъемлемой частью системы его эксплуатации. На отечественных горнодобывающих предприятиях (ГДП) на ремонтное обслуживание может затрачиваться до 40% финансовых ресурсов предприятия, в зависимости от эффективности данного процесса. Эффективность этого процесса во многом зависит от качества мониторинга организации процесса эксплуатации горно-транспортного оборудования [1–4].

Мониторинг необходим для обоснования и принятия управленческих решений, характеризующихся высокой результативностью и направленными на улучшение условий и режимов эксплуатации оборудования [5–7].

## 2. Реализация мониторинга организации процесса технического обслуживания карьерных автосамосвалов

С 2014 г. на разрезе «Черногорский» ООО «СУЭК-Хакасия» осуществляется деятельность по повышению качества мониторинга организации процесса эксплуатации. Одной из основных задач, в рамках данной деятельности, является поиск и устранение организационных факторов, обуславливающих снижение качества проводимого технического обслуживания автосамосвалов БелАЗ-7513 и БелАЗ-75306 [8–10].

Реализация функции наблюдения на основе фиксации и учёта осуществляемых в цехе по ремонтному обслуживанию технологического автотранспорта (ЦРТА) ремонтных воздействий, а также функции анализа формируемой в результате наблюдения базы данных, позволило установить следующее: к 2018 г. в ЦРТА сложилась ситуация, при которой около 20% технических обслуживаний (ТО) не приводит к возникновению отказов в период между ТО; 50% обслуживаний характеризуются 1-2 отказами; 24% – 3-5 отказами; 5% – более 5 отказами. Определено, что устранение одного отказа автосамосвала БелАЗ-7513 обходится разрезу «Черногорский» в среднем в 0.2 млн руб., а БелАЗ-75306 – 0.3 млн руб. При условии отсутствия качественного улучшения организации ремонтного обслуживания прогнозируется, что структура ТО будет изменяться в сторону увеличения количества отказов в периоды между ТО. Основная причина этого заключается в старении парка автосамосвалов.

Анализ организационных причин, негативно влияющих на возникновение отказов в периоды между ТО, позволил установить, что порядка 55% всех проводимых технических обслуживаний автосамосвалов БелАЗ сопровождаются попутным проведением ремонтов этих машин с учетом их фактического состояния. Кроме того, водители не заинтересованы в длительном простое автосамосвалов в зоне ремонта, так как это время оплачивается по минимальным расценкам, в соответствии с существующей системой оплаты труда. Это приводит к тому, что зачастую водители не предоставляют заблаговременно информацию об обнаруженных неисправностях машины во время её эксплуатации, поэтому большая часть неисправностей в

дальнейшем устраняется без необходимого уровня подготовки. Как следствие, увеличивается продолжительность ремонтного обслуживания и снижается его качество, а некоторые неисправности не устраняются. Анализ порядка 850 записей базы данных по проведённым ТО позволил установить, что обслуживания, сопровождающиеся неплановыми ремонтами, характеризуются увеличенным количеством отказов в цикле от ТО до ТО, по сравнению с обслуживаниями, в ходе которых неплановые ремонты не производились. Число отказов может увеличиваться от 1.3 до 1.4 раз, в зависимости от вида ТО (рис. 1) [11, 12].

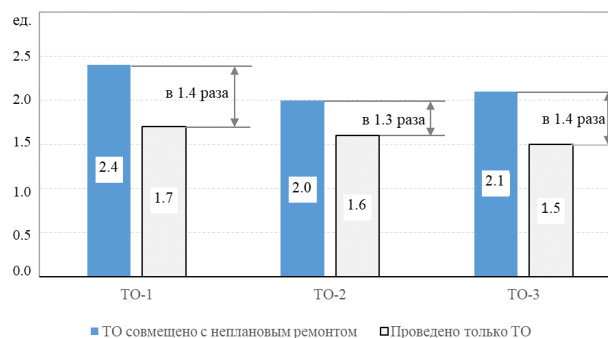


Рис. 1. Среднее число отказов в периоды между ТО  
Fig. 1. Average number of failures between maintenance

С целью обеспечения заблаговременного информирования механиков водителями автосамосвалов о техническом состоянии эксплуатируемого оборудования, были обоснованы и реализованы мероприятия, направленные на разработку формы оперативного учёта водителями автосамосвалов технического состояния этих машин. Установлена материальная ответственность водителей автосамосвалов за обеспечение своевременности и полноты предоставления форм учёта начальнику службы материального снабжения и механикам ЦРТА. На основании предложенных моделей взаимодействия между водителями горно-транспортного цеха (ГТЦ) разреза «Черногорский» и ЦРТА АО «Черногорский РМЗ» был проведён ряд рабочих совещаний с работниками обоих подразделений, в которых принимали участие начальники ГТЦ и ЦРТА, линейные руководители, механики, бригадиры слесарей и старшие водители. Целью данных совещаний была апробация и уточнение целесообразности предложенной модели взаимодействия между водителями и механиками. Схемы существующей и предлагаемой моделей организации проведения сопутствующих ремонтов в процессе выполнения ТО представлены на рис. 2.

## 3. Результаты исследования

В настоящее время на разрезе «Черногорский» осуществляется освоение предложенной модели организации проведения сопутствующих ремонтов во время ТО. Водители автосамосвалов БелАЗ за 5-6 дней до проведения ТО готовят чек-листы о техническом состоянии основных узлов и агрегатов автосамосвалов БелАЗ.

Существующая схема организации проведения технического обслуживания и сопутствующего ремонта автосамосвалов на разрезе «Черногорский»



Предлагаемая схема организации проведения технического обслуживания и сопутствующего ремонта автосамосвалов на разрезе «Черногорский»



Рис. 2. Схемы существующей и предлагаемой моделей организации проведения сопутствующих ремонтов в процессе выполнения ТО

Fig. 2. Existing and proposed models for organizing associated repairs during maintenance

На основании чек-листов механики ЦРТА производят технический осмотр оборудования, начальник службы материального снабжения подготавливает необходимые запчасти. Кроме того, осуществляется подготовка персонала и средств механизации к выполнению сопутствующих ТО ремонтов. Линейными руководителями ГТЦ разработана и осваивается учётная форма ведения всех ремонтных воздействий и наработок по основным узлам и агрегатам автосамосвалов. Предполагается что использование данной формы позволит осуществлять контроль качества проводимых ремонтов.

За период октябрь – ноябрь 2019 г., в сравнении с показателями января – июля 2019 г., было достигнуто снижение продолжительности проведения обслуживания на 5-12 %, в зависимости от вида ТО, а также сокращение количества отказов на 7-20 %, в зависимости от модели БелАЗ (рис. 3-5). Таких показателей удалось

достичь в результате своевременной подготовки проведения ремонтов, выполняемых в процессе ТО.

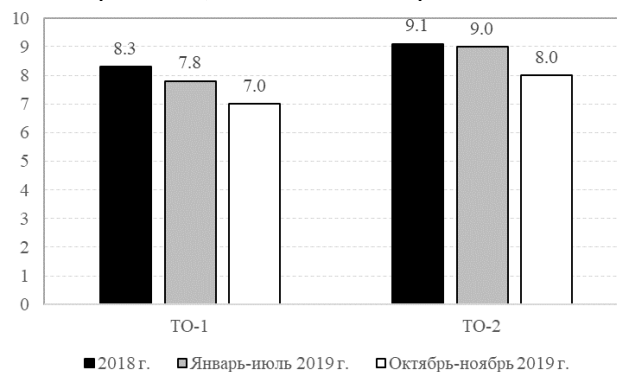


Рис. 3. Продолжительность технического обслуживания БелАЗ-7513

Fig. 3. Duration of BelAZ-7513 maintenance



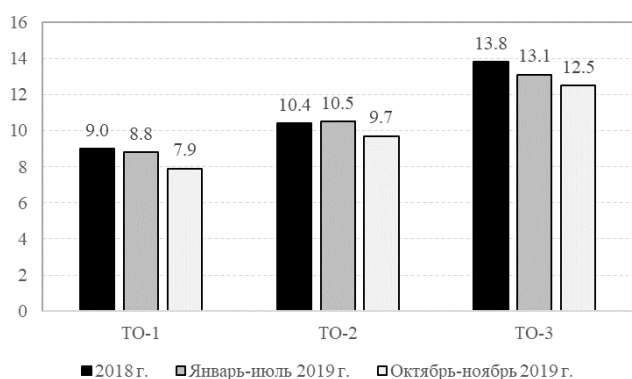


Рис. 4. Продолжительность технического обслуживания БелАЗ-75306

Fig. 4. Duration of BelAZ-75306 maintenance

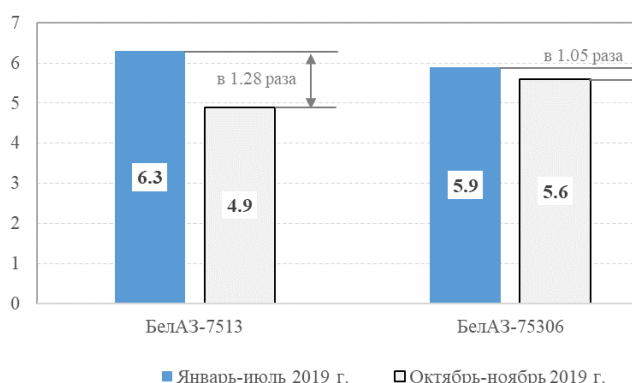


Рис. 5. Изменение числа отказов автосамосвалов БелАЗ

Fig. 5. Change in the number of failures of BelAZ dump trucks

Представленные результаты были получены в результате сокращения количества неплановых и неподготовленных ремонтов, обусловленных отсутствием оперативной информации о техническом состоянии автосамосвала непосредственно перед проведением ТО.

Для оценки эффективности предлагаемой модели организации проведения сопутствующих ремонтов в процессе выполнения ТО автосамосвалов БелАЗ был выполнен расчёт месячного и годового экономического эффекта. Расчёт месячного экономического эффекта производился с использованием следующей формулы

$$\mathcal{E}_{\text{мес.}} = (N_1^{7513} - N_2^{7513}) \cdot S_{7513} \cdot N_{7513} + (N_1^{75306} - N_2^{75306}) \cdot S_{75306} \cdot N_{75306},$$

где  $N_1^{7513}$ ,  $N_2^{7513}$  – среднее число отказов автосамосвалов БелАЗ-7513, соответственно, в январе – июле и в октябре – ноябре, ед.;  $N_1^{75306}$ ,  $N_2^{75306}$  – среднее число отказов автосамосвалов БелАЗ-75306, соответственно, в январе – июле и в октябре – ноябре, ед.;  $S_{7513}$ ,  $S_{75306}$  – средние затраты на устранение отказов, соответственно, для автосамосвалов БелАЗ-7513 и

БелАЗ-75306, млн руб./отказ;  $N_{7513}$ ,  $N_{75306}$  – численность рабочего парка автосамосвалов, соответственно, БелАЗ-7513 и БелАЗ-75306, авто.

Значения переменных, используемых в формуле расчёта месячного экономического эффекта, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для оценки экономического эффекта, 2019 год

Table 1. Input data for assessing the economic effect, 2019

| Модель автосамосвала                                      | Обозначение   | Величина |
|-----------------------------------------------------------|---------------|----------|
| Среднемесячное число отказов, январь – июль, ед./авто.    |               |          |
| БелАЗ-7513                                                | $N_1^{7513}$  | 6.3      |
| БелАЗ-75306                                               | $N_1^{75306}$ | 5.9      |
| Среднемесячное число отказов, октябрь – ноябрь, ед./авто. |               |          |
| БелАЗ-7513                                                | $N_2^{7513}$  | 4.9      |
| БелАЗ-75306                                               | $N_2^{75306}$ | 5.6      |
| Численность рабочего парка автосамосвалов, авто.          |               |          |
| БелАЗ-7513                                                | $N_{7513}$    | 15       |
| БелАЗ-75306                                               | $N_{75306}$   | 31       |
| Средние затраты на устранение отказов, млн руб./отказ     |               |          |
| БелАЗ-7513                                                | $S_{7513}$    | 0.2      |
| БелАЗ-75306                                               | $S_{75306}$   | 0.3      |

Расчётное значение месячного экономического эффекта составило 6.99 млн рублей, а годового – 83.88 млн рублей.

#### 4. Заключение

В статье изложен опыт реализации управленческих решений по улучшению условий и режимов эксплуатации горно-транспортного оборудования на основе осуществления мониторинга организации ремонтного обслуживания автосамосвалов БелАЗ-7513 и БелАЗ-75306 в условиях разреза «Черногорский» ООО «СУЭК-Хакасия». Основу представленных управленческих решений составляет разработанная модель организации проведения сопутствующих ремонтов в процессе выполнения ТО. Основное отличие предлагаемой модели организации ТО от существующей заключается в использовании механизма заблаговременной передачи механикам информации о техническом состоянии эксплуатируемого оборудования. Данную информацию готовят водители автосамосвалов в формате бумажных чек-листов.

Реализация предложенной модели организации ТО на разрезе «Черногорский» позволила существенно повысить качество выполнения технического обслуживания этих автосамосвалов. Расчётный месячный экономический эффект составляет около 7 млн руб. При условии сохранения достигнутых изменений в организации проведения ремонтов автосамосвалов, годовой экономический эффект составит около 84 млн руб.

В дальнейшем планируется отказаться от бумажных носителей для формирования чек-листов технического состояния парка автосамосвалов и разработать

программное обеспечение, позволяющее оперативно фиксировать технические параметры БелАЗ в бортовых компьютерах. Это позволит автоматизировать

процесс передачи информации, наладить её учёт и обеспечить долговременную сохранность.

### Список литературы

1. Беклемешев В.А., Вьюнов Е.М., Кравец А.Н., Хажиев В.А. О структуре функционала главного механика угледобывающего предприятия // Уголь. 2015. № 1. С. 58-60.
2. Байкин В.С. Развитие мониторинга системы эксплуатации горно-транспортного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. S64. С. 107-115.
3. ГОСТ 25866-83. Эксплуатация техники. Термины и определения (с Изменением №1) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-25866-83>.
4. Mehmeti X., Mehmeti B., Sejdiu R. The equipment maintenance management in manufacturing enterprises // IFAC-PapersOnLine. 2018. Т. 51. № 30. С. 800-802. <https://www.doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.192>.
5. Liu J. Q., Zhuo J., Lang Z.-Q., Qin S.J. Perspectives on data-driven operation monitoring and self-optimization of industrial processes // Acta Automatica Sinica. 2018. Т. 44. № 11. С. 1944-1956.
6. Ганеева Ж.Г. Определение понятия “мониторинг” в различных сферах его применения // Вестник Челябинского государственного университета. 2005. Т. 8. № 1. С. 30-33.
7. Язиков Е.Г. Ш. А.Ю. Геоэкологический мониторинг: Учебное пособие для вузов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2003. 336 с.
8. Шаповаленко Г.Н., Еремеев О.Н., Назаренко С.В., Кудря Е.В., Байкин В.С. Организация работы по снижению количества внезапных отказов автомобилей БелАЗ на разрезе «Черногорский» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. S62. С. 77-83.
9. Шаповаленко Г.Н., Зубарев С.Ф., Глухорев В.В., Байкин В.С. Повышение эффективности проведения технического обслуживания БелАЗ на разрезе «Черногорский» ООО «СУЭК-Хакассия» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. S45-2. С. 122-127.
10. Zayats A.I., Beklemishev V.A., Baykin V.S., Hazhiev V.A. The development of a monitoring system conditions and modes of operation, technology organization of repair and maintenance excavators on the cut “Chernogorskiy” // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2017. Т. 12. № 39. С. 201-208. <https://www.doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-39-201-208>.
11. Chen G., Qiu J., Pan T., Niu D., Pu D., Zhao Z., Haini H., Qin L. Research on Data Mining Technology of Company Operation Monitoring // 8th International Conference on Social Network, Communication and Education (SNCE 2018). Shenyang, China: Atlantis Press, 02.03.2017 - 04.03.2017. <https://www.doi.org/10.2991/sncc-18.2018.15>.
12. Ioan Cucu, Ciprian Cucu Modern Management Methods For Equipment Maintenance // Annales Universitatis Apulensis Series Oeconomica. 2009. Т. 2. № 11. С. 1-24.

### References

1. Beklemeshev V.A., V'yunov E.M., Kravets A.N., Khazhiev V.A. *About the functions of the chief mechanic at coal enterprise* // Ugol. 2015, no. 1, pp. 58–60. (In Russ.).
2. Baikin V.S. *Development of the monitoring system production mining and transport equipment* // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2018, S64, pp. 107–115. (In Russ.).
3. GOST 25866-83. Operation of equipment. Terms and definitions (with Amendment No. 1). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-25866-83>. (In Russ.).
4. Mehmeti X., Mehmeti B., Sejdiu R. *The equipment maintenance management in manufacturing enterprises* // IFAC-PapersOnLine. 2018, vol. 51, no. 30, pp. 800–802. <https://www.doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.192>.
5. Liu J. Q., Zhuo J., Lang Z.-Q., Qin S.J. *Perspectives on data-driven operation monitoring and self-optimization of industrial processes* // Acta Automatica Sinica. 2018, vol. 44, no. 11, pp. 1944–1956.
6. Ganeeva Zh.G. *Definition of the concept of “monitoring” in various fields of its application* // Bulletin of Chelyabinsk state university. 2005, vol. 8, no. 1, pp. 30–33. (In Russ.).
7. Yazikov Ye.G. S. A.Y. *Geocological monitoring: Textbook*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University. 2003. 336 p. (In Russ.).
8. Shapovalenko G.N., Eremeev O.N., Nazarenko S.V., Kudrya E.V., Baikin V.S. *Management of reduction in rate of random failures of BelAZ dump trucks in Chernogorsk open pit mine* // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2015, S62, pp. 77–83. (In Russ.).
9. Shapovalenko G.N., Zubarev S.F., Glukhorev V.V., Baikin V.S. *Enhancement of BelAZ maintenance efficiency in Chernogorsk open pit mine, SUEK-Khakassia* // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2015, S45-2, pp. 122–127. (In Russ.).

10. Zayats A.I., Beklemishev V.A., Baykin V.S., Hazhiev V.A. The development of a monitoring system conditions and modes of operation, technology organization of repair and maintenance excavators on the cut "Chernogorskiy" // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2017, vol. 12, no. 39, pp. 201–208. <https://www.doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-39-201-208>. (In Russ.).
11. Chen G., Qiu J., Pan T., Niu D., Pu D., Zhao Z., Haini H., Qin L. Research on Data Mining Technology of Company Operation Monitoring // Proceedings of the 8th International Conference on Social Network, Communication and Education (SNCE 2018). 02.03.2017 - 04.03.2017, Paris, France: Atlantis Press. <https://www.doi.org/10.2991/snec-18.2018.15>.
12. Ioan Cucu, Ciprian Cucu *Modern Management Methods For Equipment Maintenance* // Annales Universitatis Apulensis Series Oeconomica. 2009, vol. 2, no. 11, pp. 1–24.



ISSN 2222-9396 (Print)

УДК 656.225

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-32-42>

## К РАСЧЁТУ КРЕПЛЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГРУЗА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ

Туранов Х.Т.<sup>1</sup>, Рузметов Я.О.<sup>2\*</sup>, Шихназаров Ж.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный университет имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан

<sup>2</sup>Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан

\* E-mail: [yadgor.ruzmetov@yandex.ru](mailto:yadgor.ruzmetov@yandex.ru)

**Аннотация.** Представлен сравнительный анализ действующей и уточнённой методик расчёта крепления груза на железнодорожных платформах. Показано, что в соответствии с существующей методикой расчёта, усилие во всех упругих креплениях груза имеет одно и то же значение, независимо от топологии креплений груза в пространстве. Приведены расчёты усилий в упругих элементах крепления по уточнённой методике. Результаты сравнительного анализа показали, что усилия во всех проволочных креплениях, в отличие от существующей методики, имеют различные значения. Отмечен основной недостаток уточнённой методики расчёта – прочность отдельных элементов креплений не обеспечена, поскольку усилия в них более чем два раза превышают допустимые значения.

**Ключевые слова:** железная дорога, железнодорожная платформа, проволочные крепления, продольные силы, усилия, методика расчёта

© Туранов Х.Т., Рузметов Я.О., Шихназаров Ж.А., 2020

Поступила: 11 апреля 2020; Принята к публикации: 16 мая 2020; Опубликовано: 24 декабря 2020

### Для цитирования:

Туранов Х.Т., Рузметов Я.О., Шихназаров Ж.А. К расчёту крепления твердотельного груза при воздействии продольных сил // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2020. Т.10. №1. С.32-42. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-32-42>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ISSN 2222-9396 (Print)

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-32-42>



## TO THE CALCULATION OF FASTENING A SOLID LOAD UNDER THE INFLUENCE OF LONGITUDINAL FORCES

Turanov Kh.T.<sup>1</sup>, Ruzmetov Iai.O.<sup>2\*</sup>, Shikhnazarov Zh.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

\* E-mail: [yadgor.ruzmetov@yandex.ru](mailto:yadgor.ruzmetov@yandex.ru)

**Abstract.** A comparative analysis of the current and updated methods for calculating the fastening of cargo on railway flatcar is presented. It is shown that, in accordance with the existing calculation method, the force in all elastic fasteners has the same value, regardless of the topology of the cargo fastenings. Calculations of forces in elastic fastening elements according to a refined method are presented. The results of a comparative analysis of the calculation results showed that the forces in all wire fastenings, in contrast to the existing method, have different meanings. The main drawback of the refined calculation method is noted – the strength of individual fastening elements is not ensured, since the forces in them are more than twice the permissible values.

**Keywords:** railway, flatcar, wire fastenings, longitudinal forces, calculation method

© Turanov Kh.T., Ruzmetov Iai.O., Shikhnazarov Zh.A., 2020

Received: April 11, 2020; Accepted: May 16, 2020; Published: December 24, 2020

### For citation:

Turanov Kh.T., Ruzmetov Iai.O., Shikhnazarov Zh.A. To the calculation of fastening a solid load under the influence of longitudinal forces // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2020, vol.10, no.1, pp.32-42. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-32-42>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## 1. Введение

Обеспечение надёжного крепления грузов на железнодорожном подвижном составе является общеизвестной проблемой [1–24]. Так, например, в [1] изучено соударение вагона о группу «стоящих» вагонов на путях сортировочного парка. В этот момент может происходить смещение груза относительно пола вагона в сторону удара на 30.5 мм. В [1] также замечено, что сильные маневровые соударения вагонов при их роспуске с сортировочной горки могут приводить не только к повреждениям груза, но также и креплений груза и элементов подвижного состава. Авторами [1] высказано мнение о том, что необходимо обеспечивать определённые распределения усилий между различными элементами крепления, например, проволочными растяжками и упорными брусками, имеющими различную жёсткость. Однако, это мнение до сих пор не нашло отражения в нормативно-техническом документе [12], содержащем описание действующей методики расчёта крепления груза на железнодорожной платформе.

Авторы в работе [25] отмечают, что в исследовании [2] (стр. 35–60, 100–128) особое внимание уделяется креплению различных грузов на железнодорожных вагонах, авто- и морском транспорте. В [2] имеются результаты расчётов крепления груза упорными брусками, которые крепятся к полу вагона гвоздями (стр. 64–77). Причём, в расчётах вертикального и горизонтального ускорений, величину статического коэффициента трения (то есть трения сцепления) между деревянным полом вагона и гвоздями принимают равной 0.3 [1] (стр. 75–77), что меньше рекомендуемого значения, равного 0.45 [14].

Кроме того, в [2] все аналитические формулы получены с использованием принципа Даламбера, согласно которому сила инерции является фиктивной [5, 14]. Сила инерции Даламбера не имеет объекта действия. По этой причине в теоретической механике [5, 14] данную силу включают в условие равновесия сил лишь для того, чтобы учесть ускорение движения тела. Однако, усилия в креплениях или плетях, расположенных перпендикулярно продольной оси вагона, в работе [2] считаются известными и определяющими ускорение, например, в вертикальном и поперечном направлениях. Затем величину этих ускорений сравнивают с рекомендуемыми значениями ускорения вагона, которые появляются при движении вагона.

В [5] с использованием понятия «сдвигающих» и «удерживающих» сил впервые представлен пример расчёта крепления штучного груза на платформе, когда груз удерживается от сдвига деревянными брусками, прибиваемыми гвоздями к полу вагона. Однако результаты исследований [5] также не нашли применения в действующей методике [12].

Использованные в нормативно-техническом документе [12] формулы расчёта крепления груза на железнодорожных платформах являются недостаточно корректными, поскольку усилия в креплениях получаются одинаковыми, независимо от их пространственного

расположения. Некорректность формул в [12], по которым проводят расчёт гибких элементов крепления груза, доказана в [13–17]. Отсюда становится очевидным актуальность технической проблемы расчёта крепления грузов, перевозимых на железнодорожных платформах. Решение данной проблемы, на наш взгляд, представляет практический интерес для транспортной науки.

Остальная часть статьи организована следующим образом: во втором разделе представлен пример расчёта усилий в гибких элементах крепления груза на железнодорожной платформе; третий раздел содержит расчёт усилия в проволочных креплениях груза с использованием существующей методики [12]; в четвёртом разделе представлена уточнённая методика [11] определения усилия в креплениях груза, а также пример расчёта с её использованием; в заключении показаны недостатки существующей методики и обосновывается перспективность использования предлагаемой уточнённой методики расчёта крепления груза на железнодорожных платформах.

## 2. Расчёт усилий в гибких элементах крепления груза на железнодорожной платформе

В разделе представлен пример расчётов усилий в гибких элементах крепления груза на железнодорожной платформе, выполненных в соответствии с методикой [22]. Схема размещения и крепления груза на платформе с использованием упругих и упорных средств крепления представлена на **рис.1**.

Исходные данные расчётного примера:

- $G$  – сила тяжести груза, 450 кН;
- $a_{ex} = 1.6 \cdot g$  – переносное ускорение вагона при движении в продольном направлении, м/с<sup>2</sup>;
- $k_{д.х} = a_{ex}/g = 1.6$  – коэффициент, учитывающий продольную динамику вагона [22];
- $f_{сц.}$  – коэффициент трения при сцеплении, принимается для пары «металл – дерево» равным 0.45 [13–15];
- $k_l = 0.6$  – коэффициент, учитывающий состояние пола вагона;
- $n_{кр.х} = 16$  – количество гвоздей, в соответствии со схемой **рис.1**, шт.;
- $n_{бр.х} = 6$  – количество упорных брусков, в соответствии со схемой **рис.1**, шт.;
- $[R_{кр}] = 1.08$  – допускаемое значение силы на один гвоздь, кН [12].

Вычисление продольных сил, воспринимаемых упругими и упорными элементами крепления, производится в соответствии с методикой, представленной в [5, 13–15, 22]. Вычисления производились с использованием программы MathCAD [26].

Переносная сила инерции в продольном направлении и сила трения при сцеплении определяются, соответственно, как [16, 17]

$$I_{ex} = k_{д.х} G, \quad (1)$$

$$F_{тр.сц.х} = f_{сц.} G. \quad (2)$$

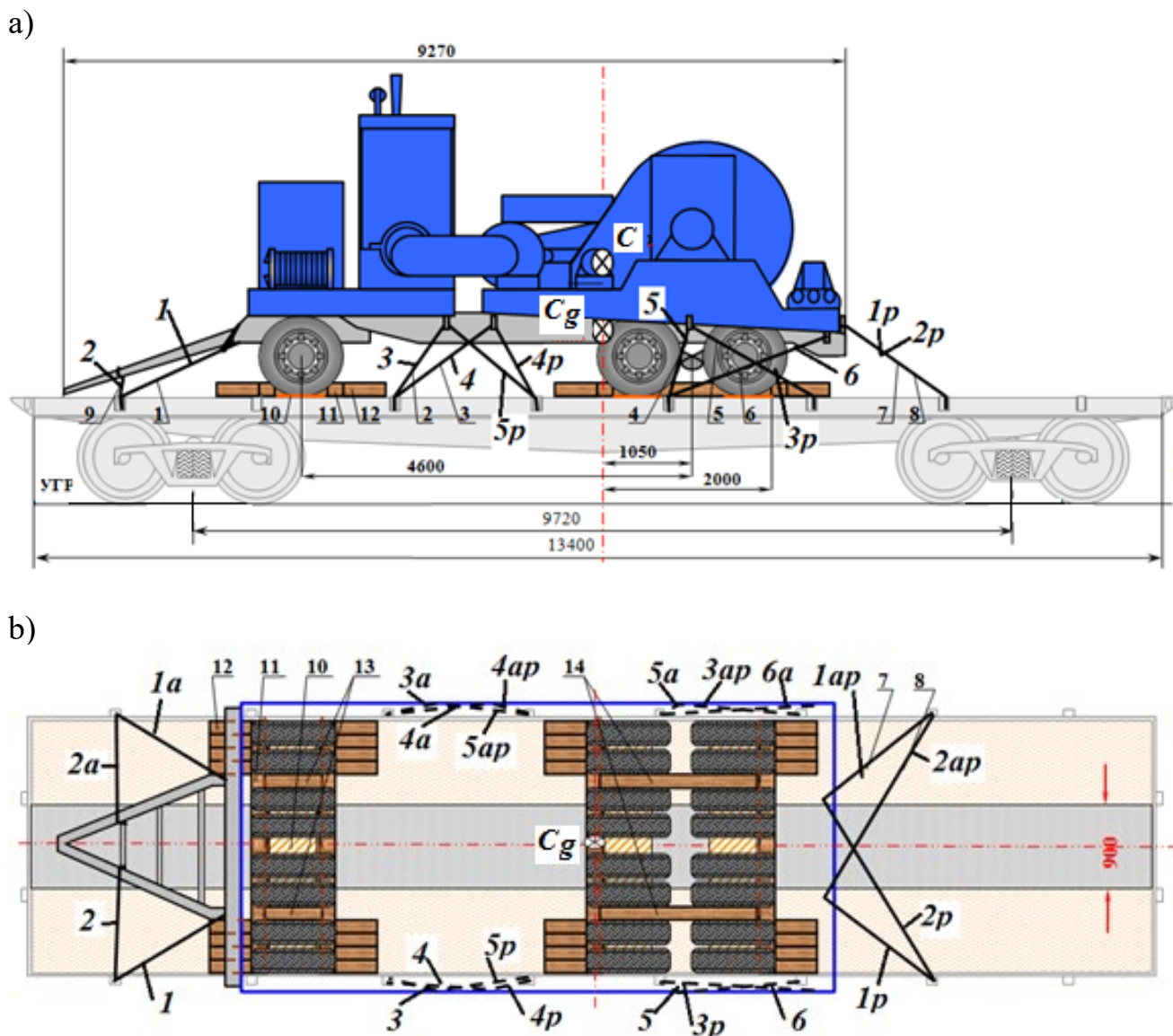


Рис. 1. Схема размещения и крепления груза на платформе с использованием упругих и упорных средств крепления: а) вид сбоку; б) вид сверху; 1 – 6, 1а – 6а; 1р – 6р, 1ар – 6ар – упругие элементы крепления различных направлений

Fig. 1. Scheme of placing and fastening cargo on the flatcar using elastic and solid fastening fixtures: a) side view; b) top view; 1 – 6, 1а – 6а; 1р – 6р, 1ар – 6ар – elastic fastening elements of different directions

Подставляя исходные данные в (1) и (2), получим [22]

$$I_{ex} = k_{dx} G = 1.6 \cdot 450 = 720 \text{ кН},$$

$$F_{тр.сц.х} = f_{сц} G = 0.45 \cdot 450 = 202.5 \text{ кН}.$$

Продольная сдвигающая сила  $F_{сд.х}$  (см. формулу (3.9) в [14]) рассчитывается как

$$F_{сд.х} = F_x = I_{ex} = 720 \text{ кН}.$$

Значение продольной силы, которая воспринимается упругими элементами крепления груза, рассчитывается по формуле (4.6) в [5] и/или (7.15) в [15]

$$\Delta F_x = F_{сд.х} - F_{тр.сц.х}. \quad (3)$$

С учетом исходных данных и результатов, полученных при расчётах по формулам (1) и (2), величина  $\Delta F_x$  будет равна

$$\Delta F_x = 720 - 202.5 = 517.5 \text{ кН}.$$

Расчёт усилий в упругих элементах крепления выполним по рекомендуемым формулам, представленным в [15]. Проекция упругих сил крепления на горизонтальную ось вагона рассчитывается по следующим формулам (7.18а) в [15]

$$R0_{kx} = R0 \cdot \sum_{i=1}^{i=n_{op.x}} \left( \frac{a_i}{l_i} + \frac{a_{ia}}{l_{ia}} \right), k = 1, \quad (4)$$

$$R0_{kx} = R0 \cdot \sum_{i=1}^{i=n_{op,x}} \left( \frac{a_{ip}}{l_{ip}} + \frac{a_{iap}}{l_{iap}} \right), k = 2. \quad (4a)$$

где  $R0$  – среднее значение усилий от скруток проволоочных креплений, которым подвергаются эти крепления при подготовке груза к отправке,  $R0 = 20$  кН;  $l_i, l_{ia}, l_{ip}$ ,

$l_{iap}$  – длины креплений различных направлений (см. рис. 1);  $a_i, a_{ia}, a_{ip}, a_{iap}$  – проекции креплений различных направлений на продольную ось вагона, м;  $k$  – число направлений,  $k = 2$ ;  $i$  – число упругих элементов крепления в каждом направлении,  $i = 6$ .

Численные значения геометрических параметров креплений (формулы 4 и 4a) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Длины упругих креплений и величины их проекций на горизонтальную (продольную) ось вагона [22]  
Table 1. Lengths of elastic fastening and the values of their projections on the horizontal (longitudinal) axis of the flatcar

| Направление $k$ | Параметр элемента крепления | Длина, м |       |       |       |       |        |
|-----------------|-----------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|--------|
| $k = 1$         | $a_i$                       | 1.19     | 0.041 | 0.52  | 1.095 | 0.232 | 1.861  |
|                 | $l_i$                       | 1.467    | 1.087 | 1.06  | 1.432 | 0.952 | 12.078 |
|                 | $a_{ia}$                    | 1.19     | 0.041 | 0.52  | 1.095 | 0.232 | 1.861  |
|                 | $l_{ia}$                    | 1.497    | 1.087 | 1.06  | 1.432 | 0.952 | 2.078  |
| $k = 2$         | $a_{ip}$                    | 1.19     | 1.286 | 1.382 | 0.52  | 0.903 | 0      |
|                 | $l_{ip}$                    | 1.786    | 2.515 | 1.662 | 1.06  | 1.292 | 0      |
|                 | $a_{iap}$                   | 1.286    | 1.286 | 1.382 | 0.52  | 0.903 | 0      |
|                 | $l_{iap}$                   | 1.851    | 2.515 | 1.662 | 1.06  | 1.292 | 0      |

Подставив в формулы (4 и 4a) данные из табл. 1, с учетом симметричного размещения груза относительно продольной оси вагона, получим, кН

$$R0_{1x} = 20 \cdot 2 \cdot \left( \frac{1.19}{1.467} + \frac{0.041}{1.087} + \frac{0.52}{1.06} + \frac{1.095}{1.432} + \frac{0.232}{0.952} + \frac{1.861}{2.078} \right) = 40 \cdot (0.811 + 0.038 + 0.49 + 0.769 + 0.244 + 0.896) = 40 \cdot 3.24 = 129.73,$$

$$R0_{2x} = 20 \cdot 2 \cdot \left( \frac{1.19}{1.786} + \frac{1.286}{2.515} + \frac{1.382}{1.662} + \frac{0.52}{1.06} + \frac{0.903}{1.292} \right) = 40 \cdot (0.666 + 0.511 + 0.8315 + 0.4906 + 0.699) = 40 \cdot 3.213 = 128.523.$$

Разность между проекциями сил разных направлений на продольную ось вагона, кН

$$FR0_{x0} = R0_{1x} - R0_{2x} = 129.73 - 128.523 = 1.207.$$

Проекции упругих сил крепления на вертикальную ось вагона рассчитываются по следующим формулам 7.19a в [15]

$$R0_{kz} = R0 \cdot \sum_{i=1}^{i=n_{op,x}} \left( \frac{h_i}{l_i} + \frac{h_{ia}}{l_{ia}} \right), k = 1, \quad (5)$$

$$R0_{kz} = R0 \cdot \sum_{i=1}^{i=n_{op,x}} \left( \frac{h_{ip}}{l_{ip}} + \frac{h_{iap}}{l_{iap}} \right), k = 2, \quad (5a)$$

где  $h_i, h_{ia}, h_{ip}, h_{iap}$  – проекции креплений различных направлений на вертикальную ось вагона, м (табл. 2).

Таблица 2. Величины проекций упругих креплений на вертикальную ось вагона  
Table 2. Values of projections of elastic fastening on the vertical axis of the flatcar

| Направление $k$ | Параметр элемента крепления | Длина, м |       |       |       |       |       |
|-----------------|-----------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $k = 1$         | $h_i$                       | 0.605    | 0.302 | 0.907 | 0.907 | 0.907 | 0.907 |
|                 | $h_{ia}$                    | 0.605    | 0.302 | 0.907 | 0.907 | 0.907 | 0.907 |
| $k = 2$         | $h_{ip}$                    | 1.008    | 1.008 | 0.907 | 0.907 | 0.907 | 0     |
|                 | $h_{iap}$                   | 1.008    | 1.008 | 0.907 | 0.907 | 0.907 | 0     |

Подставив в формулы (5 и 5a) данные из табл. 2, с учетом симметричного размещения груза относительно продольной оси вагона, получаем следующие значения проекции упругих сил от предварительных скруток проволоки крепления на вертикальную ось, кН

$$R0_{1z} = 20 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0.605}{1.467} + \frac{0.302}{1.087} + \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.907}{1.432} + \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.907}{2.078} \right) = 40 \cdot (0.412 + 0.278 + 0.858 + 0.633 + 0.952 + 0.432) = 40 \cdot 3.569 = 142.76,$$

$$R0_{2z} = 20 \cdot 2 \cdot \left( \frac{1.008}{1.786} + \frac{1.008}{2.515} + \frac{0.907}{1.662} + \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.907}{1.292} \right) = 40 \cdot (0.565 + 0.401 + 0.546 + 0.856 + 0.702) = 40 \cdot 3.06 = 122.374.$$

Вычисление силы трения сцепления от усилия предварительных скруток проволоки крепления  $R0$  на вертикальную ось производится по формуле (7.11) в [15]

$$FR0_{ц, kz} = f_{ц.} \cdot R0_{iz}, k = 1, 2. \quad (6)$$

С учетом рассчитанных значений  $R0_{1z}$  и  $R0_{2z}$  получаем следующие значения силы трения сцепления от предварительных скруток проволоки крепления, кН

$$FR0_{сц.1z} = 0.45 \cdot 142.76 = 64.241,$$

$$FR0_{сц.2z} = 0.45 \cdot 122.374 = 55.068.$$

Тогда сумма сил трения сцепления от предварительных скруток проволоки крепления будет равна, кН

$$\Delta FR0_{сц.1z} = FR0_{сц.1z} + FR0_{сц.2z} =$$

$$= 64.241 + 55.068 = 119.309.$$

В результате расчётов установлено, что проекции элементов крепления груза на вертикальную ось значительно влияют на величину силы трения по продольной оси вагона. Причиной тому является увеличение величины удерживающей силы.

Удерживающую силу вдоль вагона от усилия предварительных скруток проволоки крепления рассчитаем по предлагаемой нами формуле

$$FR0_{сц.уд.х0} = F_{тр.сц.х} + FR0_{х0} + FR0_{тр.сц.х0}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) данные, полученные в результате расчётов по формулам (1), (4), (4а) и (6), получим, кН

$$FR0_{сц.уд.х0} = 202.5 + 1.207 + 119.309 = 323.016.$$

Реакция упорных брусков рассчитывается по формулам (4.5) в [15] и/или (46) в [12]

$$R_{бр.х} = k_1 n_{кр.х} n_{бр.х} [R_{кр}]. \quad (8)$$

Подставляя исходные данные в (8), получим реакции упорных брусков с учётом принятого в расчётах количеством гвоздей, кН

$$R_{бр.х} = 0.6 \cdot 16 \cdot 6 \cdot 1.08 = 62.208.$$

Сумма всех «удерживающих» сил вдоль продольной оси вагона с учётом реакции упорных брусков рассчитывается по формуле

$$FR0_{сц.уд.х} = FR0_{тр.сц.х} + R_{бр.х}. \quad (9)$$

Удерживающую силу вычислим по формулам (7) и (8), подставив результаты расчётов в (9), кН

$$FR0_{сц.уд.х} = 202.5 + 62.208 = 264.708.$$

Продольная сила, воспринимаемая элементами крепления груза, определится как разность между сдвигающей и удерживающей силами (формула (7.15) в [15])

$$\Delta FR0_{бр.сц.х} = F_{сд.х} - FR0_{сц.уд.х} \quad (10)$$

Подставляя результаты расчётов по формулам (1) и (9), в формулу (10), получим, кН

$$\Delta FR0_{бр.сц.х} = 720 - 264.798 = 455.292.$$

Как видно, сдвигающая сила по величине превышает удерживающую. Это является причиной возможного сдвига груза вдоль вагона, который сопровождается выдёргиванием гвоздей упорных брусков.

### 3. Расчёт усилий в проволочных креплениях груза в соответствии с существующей методикой

Усилия в проволочных креплениях груза при воздействии продольных сил определим по формуле (39)

в [12], которую для удобства расчёта представим в следующем виде

$$R_{kx} = \frac{\Delta F_{бр.сц.х}}{a}, \quad k = \overline{1, 2}, \quad a \in \{b1, b2\}, \quad (11)$$

где  $\Delta F_{бр.сц.х}$  – продольная сила, воспринимаемая упругими и упорными элементами крепления (см. формулу (10)), где  $\Delta F_{бр.сц.х} = 455.292$  кН), кН;  $b1, b2$  – безразмерные числа, которые определяются с учётом заданных значений физико-геометрических параметров проволочных креплений по формулам

$$b1 = \left( f_{сц} \times \frac{h_i}{l_i} + \frac{a_i}{l_i} \right) + \left( f_{сц} \times \frac{h_{ip}}{l_{ip}} + \frac{a_{ip}}{l_{ip}} \right), \quad i = \overline{1, 6}, \quad (12)$$

$$b2 = \left( f_{сц} \times \frac{h_{ia}}{l_{ia}} + \frac{a_{ia}}{l_{ia}} \right) + \left( f_{сц} \times \frac{h_{iap}}{l_{iap}} + \frac{a_{iap}}{l_{iap}} \right), \quad i = \overline{1, 6}, \quad (13)$$

где  $h_i, a_i$  и  $l_i$ ;  $h_{ip}, a_{ip}$  и  $l_{ip}$ ;  $h_{ia}, a_{ia}$  и  $l_{ia}$ ;  $h_{iap}, a_{iap}$  и  $l_{iap}$  – рассчитанные по данным схемы (рис. 1) значения проекции упругих элементов крепления различных направлений, соответственно, на вертикальную и продольную ось вагона, а также длины этих креплений, м. Для рассматриваемого расчётного примера значения этих переменных приведены в табл. 1, 2.

Здесь необходимо отметить, что вывод формулы (39) в [12] общеизвестен и представлен в [13] (см. С. 133-134).

Подставляя данные табл. 1, 2 в формулы (12) и (13), с учетом того, что коэффициент трения сцепления

$$f_{сц} = 0.45, \text{ получаем}$$

$$b1 = \left[ \begin{aligned} & \left( 0.45 \times \frac{0.605}{1.467} + \frac{1.19}{1.467} \right) + \left( 0.45 \times \frac{0.605}{1.786} + \frac{1.19}{1.786} \right) + \\ & + \left( 0.45 \times \frac{0.302}{1.087} + \frac{0.041}{1.087} \right) + \left( 0.45 \times \frac{0.302}{2.515} + \frac{0.041}{2.515} \right) + \\ & + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.52}{1.06} \right) + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.662} + \frac{0.52}{1.662} \right) + \\ & + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.432} + \frac{1.095}{1.432} \right) + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{1.095}{1.06} \right) + \\ & + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.232}{0.952} \right) + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.292} + \frac{0.232}{1.292} \right) + \\ & + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{2.078} + \frac{1.861}{2.078} \right) \end{aligned} \right] = 8.61,$$

$$b2 = \left[ \begin{aligned} & \left( 0.45 \times \frac{0.605}{1.467} + \frac{1.19}{1.467} \right) + \left( 0.45 \times \frac{1.008}{1.851} + \frac{1.286}{1.851} \right) + \\ & + \left( 0.45 \times \frac{0.302}{1.087} + \frac{1.286}{1.087} \right) + \left( 0.45 \times \frac{1.008}{2.515} + \frac{1.286}{2.515} \right) + \\ & + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{1.382}{1.06} \right) + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.662} + \frac{1.382}{1.662} \right) + \\ & + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.432} + \frac{0.52}{1.432} \right) + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.52}{1.06} \right) + \\ & + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.903}{0.952} \right) + \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.292} + \frac{0.903}{1.292} \right) \end{aligned} \right] = 9.985.$$



С учетом полученных значений безразмерных чисел  $b_1$ ,  $b_2$  и величины продольных сил  $\Delta F_{\text{бр.ц.х}} = 455.292$  кН, а также учитывая несимметричность расположения элементов крепления разных направлений относительно продольной оси вагона, по формуле (11) получим, кН

$$R_{1x} = \frac{455.292}{8.61} = 52.879, R_{2x} = \frac{455.292}{9.985} = 45.598.$$

В результате представленных расчётов по существующей методике становится очевидным, что усилия во всех проволоочных креплениях груза при воздействии продольных сил, независимо от различного расположения геометрических параметров креплений в пространстве, имеют примерно одинаковое значение. Например, одного направления  $R_{1x} = 52.9$ , а другого –  $R_{2x} = 45.6$  кН. Это не соответствует действительности, поскольку различным по длине упругим элементам крепления должны соответствовать различные значения усилия в них.

Кроме того, рассчитанная по существующей методике сумма усилий во всех упругих креплениях значительно больше допустимого (24.8 кН). Это может привести к неверному выводу о том, что прочность креплений с диаметром 6 мм и количеством нитей 8 шт. недостаточна. Однако, учитывая, что при подготовке груза к отправке они подвергались предварительной закрутке усилиями  $R_i = 20$  кН, прочность всех упругих элементов креплений на самом деле обеспечивается. Таким образом, можно сделать вывод о некорректности использования существующей методики расчёта крепления груза [12] для обеспечения безопасности перевозочного процесса.

#### 4. Определение усилия в креплениях груза по уточнённой методике

Усилия в проволоочных креплениях при воздействии продольных сил находим согласно формуле (1) [1] или [11] как

$$R_{ix} = Z_{kx} \times \frac{n_i}{l_i} \times \frac{a_i}{l_i}, k = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 6}, \quad (14)$$

$$R_{ipx} = Z_{kx} \times \frac{n_{ip}}{l_{ip}} \times \frac{a_{ip}}{l_{ip}}, k = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 6}, \quad (14a)$$

где  $Z_{kx}$  – физический параметр, определяемый по формуле [11]

$$Z_{kx} = \frac{\Delta F_{\text{бр.ц.х}}}{C0_{\text{ц.кx}}}, k = \overline{1, 2}, \quad (15)$$

где  $\Delta F_{\text{бр.ц.х}}$  – продольная сила, действующая на упругие и упорные элементы крепления (см. формулу

(10));  $c0_{\text{ц.кx}}$  – параметры упругих элементов крепления, определяемые по формуле (2) [1] и [11].

Параметры упругих элементов крепления  $c0_{\text{ц.кx}}$ , расположенных вдоль вагона, при коэффициенте трения сцепления  $f_{\text{ц.}}$  равным 0.45, рассчитываются по формулам, полученных нами из формулы (2) [11]

$$c0_{\text{ц.1x}} = \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_i}{l_i} \times \left( f_{\text{ц.}} \times \frac{h_i}{l_i} + \frac{a_i}{l_i} \right) \times \frac{a_i}{l_i} + \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_{ia}}{l_{ia}} \times \left( f_{\text{ц.}} \times \frac{h_{ia}}{l_{ia}} + \frac{a_{ia}}{l_{ia}} \right) \times \frac{a_{ia}}{l_{ia}}, \quad (16)$$

$$c0_{\text{ц.2x}} = \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_i}{l_i} \times \left( f_{\text{ц.}} \times \frac{h_{ip}}{l_{ip}} + \frac{a_{ip}}{l_{ip}} \right) \times \frac{a_{ip}}{l_{ip}} + \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_{ip}}{l_{ip}} \times \left( f_{\text{ц.}} \times \frac{h_{iap}}{l_{iap}} + \frac{a_{iap}}{l_{iap}} \right) \times \frac{a_{iap}}{l_{iap}}, \quad (17)$$

где  $n_i$  – число нитей в проволоочных креплениях,  $n_i = 8$  штук.

Отметим, что в данном расчётном примере геометрические параметры креплений имеют значения, приведённые в табл. 1, 2.

Подставляя исходные данные из табл. 1 и табл. 2 в формулы (16) и (17), получаем, 1/м

$$c0_{\text{ц.1x}} = \left( \begin{aligned} & \frac{8}{1.467} \left( 0.45 \times \frac{0.605}{1.467} + \frac{1.19}{1.467} \right) \frac{1.19}{1.467} + \\ & + \frac{8}{1.786} \left( 0.45 \times \frac{0.605}{1.786} + \frac{1.19}{1.786} \right) \frac{1.19}{1.786} + \\ & + \frac{8}{1.087} \left( 0.45 \times \frac{0.302}{1.087} + \frac{0.041}{1.087} \right) \frac{0.041}{1.087} + \\ & + \frac{8}{2.515} \left( 0.45 \times \frac{0.302}{2.515} + \frac{0.041}{2.515} \right) \frac{0.041}{2.515} + \\ & + \frac{8}{1.06} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.52}{1.06} \right) \frac{0.52}{1.06} + \\ & + \frac{8}{1.662} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.662} + \frac{0.52}{1.662} \right) \frac{0.52}{1.662} + \\ & + \frac{8}{1.432} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.432} + \frac{1.095}{1.432} \right) \frac{1.095}{1.432} + \\ & + \frac{8}{1.06} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{1.095}{1.06} \right) \frac{1.095}{1.06} + \\ & + \frac{8}{0.952} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.232}{0.952} \right) \frac{0.232}{0.952} + \\ & + \frac{8}{1.292} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.292} + \frac{0.232}{1.292} \right) \frac{0.232}{1.292} + \\ & + \frac{8}{2.078} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{2.078} + \frac{1.861}{2.078} \right) \frac{1.861}{2.078} \end{aligned} \right) = 34.64,$$



$$c0_{\text{сш.2x}} = \left( \begin{aligned} & \frac{8}{1.467} \left( 0.45 \times \frac{0.605}{1.467} + \frac{1.19}{1.467} \right) \frac{1.19}{1.467} + \\ & + \frac{8}{1.851} \left( 0.45 \times \frac{1.008}{1.851} + \frac{1.286}{1.851} \right) \frac{1.286}{1.851} + \\ & + \frac{8}{1.087} \left( 0.45 \times \frac{0.302}{1.087} + \frac{1.286}{1.087} \right) \frac{1.286}{1.087} + \\ & + \frac{8}{2.515} \left( 0.45 \times \frac{1.008}{2.515} + \frac{1.286}{2.515} \right) \frac{1.286}{2.515} + \\ & + \frac{8}{1.06} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{1.382}{1.06} \right) \frac{1.382}{1.06} + \\ & + \frac{8}{1.662} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.662} + \frac{1.382}{1.662} \right) \frac{1.382}{1.662} + \\ & + \frac{8}{1.432} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.432} + \frac{0.52}{1.432} \right) \frac{0.52}{1.432} + \\ & + \frac{8}{1.06} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.52}{1.06} \right) \frac{0.52}{1.06} + \\ & + \frac{8}{0.952} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.903}{0.952} \right) \frac{0.903}{0.952} + \\ & + \frac{8}{1.292} \left( 0.45 \times \frac{0.907}{1.292} + \frac{0.903}{1.292} \right) \frac{0.903}{1.292} \end{aligned} \right) = 31.714.$$

Подставляя полученные значения  $c0_{\text{сш.кx}}$  в формулу (15), получим, кН·м

$$Z_{1x} = \frac{455.292}{34.64} = 13.144; Z_{2x} = \frac{455.292}{31.714} = 14.356.$$

Результаты расчёта усилий в элементах креплений груза по формулам (14) и (14а) с учетом значений данных, полученных по формулам (15) – (17), сведены в табл. 3.

Анализ результатов расчётов усилий в упругих элементах крепления по формулам (1) и (2) [1] и [11] позволяет сделать вывод о том, что усилия во всех проволочных креплениях (растяжках), в отличие от существующей методики расчёта (см. формулу (11)), имеют различные значения, что соответствует действительности. Кроме того, усилия во всех проволочных креплениях с диаметром 6 мм и количеством нитей 8 шт. оказались меньше, чем допустимые (24.8 кН). Исключение составляет вторая пара проволочных креплений (табл. 3). Это говорит о том, что прочность второй пары проволочных креплений не обеспечена, в результате чего произойдёт их разрушения в процессе перевозки груза.

Таким образом, показано, что существующая и уточнённая методики не позволяют с достаточной точностью определять расчётные значения усилий в упругих элементах крепления груза в вагоне. Учитывая недостатки этих методик, предлагается новая методика расчётов по размещению и креплению грузов на вагоне, представленная в [14, 15].

Таблица 3. Результаты расчёта усилий в проволочных креплениях при воздействии продольных сил находим  
Table 3. The results of calculating the forces in elastic fastenings under the action of longitudinal forces

| Направление $k$ | Обозначение усилия | Величины усилия в $i$ -х элементах крепления, кН |       |       |       |       |       |
|-----------------|--------------------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                    | $i=1$                                            | $i=2$ | $i=3$ | $i=4$ | $i=5$ | $i=6$ |
| $k = 1$         | $R_{ix}$           | 19.34                                            | 60.6  | 10.61 | 5.81  | 13.14 | 2.76  |
|                 | $R_{ipx}$          | 18.7                                             | 20.74 | 4.32  | 10.61 | 7.15  | 0     |
| $k = 2$         | $R_{iax}$          | 19.61                                            | 61.32 | 10.74 | 5.88  | 13.3  | 2.8   |
|                 | $R_{iapx}$         | 17.61                                            | 20.98 | 4.37  | 10.74 | 7.23  | 0     |

## 5. Заключение

В статье представлена последовательность расчёта продольных сил, воспринимаемых проволочными креплениями груза, размещённого на железнодорожной платформе, в соответствии с существующей [1, 5, 12] и уточнённой [11, 14, 15] методиками.

Показано, что в соответствии с существующей методикой, расчётные усилия во всех упругих креплениях груза при воздействии продольных сил имеют одинаковое значение. Это связано с тем, что существующая методика не учитывает различия в расположении креплений в пространстве и, соответственно, разницу геометрических параметров этих креплений. Поскольку различным по длине упругим элементам крепления должны соответствовать разные значения уси-

лия в них, методика расчёта продольных сил, действующих на проволочные крепления груза на железнодорожной платформе, должна учитывать это условие.

Представлен расчёт усилий в проволочных креплениях груза по уточнённой методике, позволяющей учесть разницу усилий в зависимости от параметров креплений. Отмечен недостаток уточнённой методики, заключающийся в том, что в расчётное усилие в одной из пар проволочных креплений более чем в два раза превышает допустимое значение ( $61/24.8 \approx 2.5$ ). Это говорит о том, что уточнённая методика также не позволяет получить расчётные значения усилий в гибких креплениях, соответствующие фактическим.

Учитывая недостатки рассмотренных в статье методик расчёта усилий в упругих элементах крепления, в перспективе должна быть применена новая методика расчёта по размещению и креплению грузов на вагоне.

## Список литературы

1. Зылев В.Б. Вычислительные методы в нелинейной механике конструкций. М.: Инженер, 1999. 144 с.
2. Andersson N., Andersson P., Bylander R., Sökjer-Petersen S., Zether B. Equipment for Rational Securing of Cargo on Railway Wagons / VINNOVA - Swedish Agency for Innovation Systems. Stockholm, 2004. 233 с. URL: [https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20040906\\_091708\\_35258\\_Report\\_jvgRASLA.pdf](https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20040906_091708_35258_Report_jvgRASLA.pdf)
3. Johansson M. A. P. Equipment for Efficient Cargo Securing and Ferry Fastening of Vehicles / Swedish Association of Road Haulage Companies. Borlänge, Sweden, 2004. 31 с. URL: <https://nvfnorden.org/wp-content/uploads/2020/10/2004-Equipment-for-Efficient-Cargo-Securing-and-Ferry-Fastening-of-Vehicles.pdf>.
4. Driver's Handbook Cargo Securement: A Guide to the North American Cargo Securement Standard [Электронный ресурс]. URL: [https://www.fmcsa.dot.gov/sites/fmcsa.dot.gov/files/docs/Drivers\\_Handbook\\_Cargo\\_Securement\\_508CLN.pdf](https://www.fmcsa.dot.gov/sites/fmcsa.dot.gov/files/docs/Drivers_Handbook_Cargo_Securement_508CLN.pdf).
5. Комаров К.Л., Яшин А.Ф. Теоретическая механика в задачах железнодорожного транспорта. Новосибирск: Наука, 2004. 295 с.
6. European Best Practice Guidelines on Cargo Securing for Road Transport [Электронный ресурс]. URL: [https://www.freight-train.co.uk/downloads/Cargo\\_Securing\\_Guidelines.pdf](https://www.freight-train.co.uk/downloads/Cargo_Securing_Guidelines.pdf).
7. Priddy J. D., Jones R. A. Experimental Determination of the Effect of Cargo Variations on Roll Stability // SAE Technical Paper Series. SAE International, 2005/11/01. <https://www.doi.org/10.4271/2005-01-3516>.
8. Safety of loads on vehicles: Code of practice. 3-е изд. London: Department for Transport, 2002. 123 с.
9. Balsom M., Wilson F. R., Hildebrand E. Impact of Wind Forces on Heavy Truck Stability // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2006. Т. 1969. № 1. С. 115-120. <https://www.doi.org/10.1177/0361198106196900116>.
10. Asia Industrial Gases Association. Vertical cylinder handling and transportation [Электронный ресурс]. URL: [http://www.asiaiga.org/uploaded\\_docs/AIGA%20038\\_06%20Vertical%20cylinder%20handling%20and%20transportation\\_reformatted%20Jan%2012.pdf](http://www.asiaiga.org/uploaded_docs/AIGA%20038_06%20Vertical%20cylinder%20handling%20and%20transportation_reformatted%20Jan%2012.pdf).
11. Организация сотрудничества железных дорог. (ОСЖД) Технические условия размещения и крепления грузов: Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) [Электронный ресурс]. URL: [https://www.bmzm.ru/doc/tech\\_usl\\_gr.pdf](https://www.bmzm.ru/doc/tech_usl_gr.pdf).
12. Организация сотрудничества железных дорог. (ОСЖД) Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах: Приложение 14 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) [Электронный ресурс]. URL: <https://xn--b1addackhp8agm.xn--p1ai/smgs.pdf>.
13. Туранов Х.Т., Бондаренко А.Н., Власова Н.В. Крепления грузов в вагонах: Учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2006. 321 с.
14. Туранов Х.Т. Теоретическая механика в специальных задачах грузовых перевозок. Новосибирск, Екатеринбург: Наука; Изд-во УрГУПС, 2012. 447 с.
15. Туранов Х.Т. Взаимодействие открытого подвижного состава и твердотельного груза. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2011. 374 с.
16. Turanov Kh. Analytical investigation of cargo motion lengthwise the wagon under the action of plane force system // Global Journal of Research in Engineering (GJRE-A). 2013. Т. 13. № 10. С. 7-16.
17. Turanov Kh. Mathematical Modeling of Cargo Motion Crosswise the Wagon under the Action of Plane Force System // Science and Technology. 2015. Т. 5. № 1. С. 5-14.
18. Vorobyov V., Manakov A., Repina I. Economic assessment of the control of human-factor impact on faults of technical facilities in railway-transport technological processes // MATEC Web of Conferences. 2018. Т. 239. С. 8011. <https://www.doi.org/10.1051/mateconf/201823908011>.
19. Туранов Х.Т., Рuzметов Я.О., Якушев А.В. О деформируемом состоянии механической системы «груз – вагон – крепление» // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 3. С. 455-468.
20. Pinykh A., Manakov A., Abramov A., Kolarzh S. Quality assurance and control system for railway track tamping // MATEC Web of Conferences. 2018. Т. 216. № 1. С. 3004. <https://www.doi.org/10.1051/mateconf/201821603004>.
21. Turanov K., Ruzmetov Y., Vlasova N. Calculating cargo securing elements on a railway platform under the impact of a spatial force system // E3S Web of Conferences. 2019. Т. 135. № 5. С. 2006. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/201913502006>.
22. Turanov K., Ruzmetov Y. The problem of fastening cargo on railway rolling stock // E3S Web of Conferences. 2020. Т. 157. № 3. С. 1008. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701008>.
23. Turanov K., Ruzmetov Y. On the shift of cargo on a railway platform under the influence of transverse forces // E3S Web of Conferences. 2020. Т. 157. № 3. С. 1012. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701012>.

24. Ruzmetov Y., Molchanova O., Shikhazarov J. Calculation of solid-state cargo fastener under the influence of longitudinal forces // E3S Web of Conferences. 2020. T. 157. № 3. C. 1016. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701016>.
25. Turanov K., Ruzmetov Y., Shikhazarov J. Incorrectness of the method of calculating cargo fastening on railway platforms // E3S Web of Conferences. 2020. T. 164. № 20. C. 3040. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202016403040>.
26. Кирьянов Д. В. Самоучитель Mathcad 13. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 513 с.

### References

1. Zylev V.B. *Calculation methods in nonlinear structural mechanics*. Moscow: Engineer. 1999. 144 p. (In Russ.).
2. Andersson N., Andersson P., Bylander R., Sökjær-Petersen S., Zether B. Equipment for Rational Securing of Cargo on Railway Wagons. Available at: [https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20040906\\_091708\\_35258\\_Report\\_jvgRASLA.pdf](https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20040906_091708_35258_Report_jvgRASLA.pdf).
3. Johansson M. A. P. Equipment for Efficient Cargo Securing and Ferry Fastening of Vehicles : NVF-rapporter]. Available at: <https://nvfnorden.org/wp-content/uploads/2020/10/2004-Equipment-for-Efficient-Cargo-Securing-and-Ferry-Fastening-of-Vehicles.pdf>.
4. European Best Practice Guidelines on Cargo Securing for Road Transport. Available at: [https://www.freight-train.co.uk/downloads/Cargo\\_Securing\\_Guidelines.pdf](https://www.freight-train.co.uk/downloads/Cargo_Securing_Guidelines.pdf).
5. Komarov K.L., Jashin A.F. *Theoretical mechanics in problems of railway transport*. Novosibirsk: Nauka. 2004. 295 p. (In Russ.).
6. Driver's Handbook Cargo Securement: A Guide to the North American Cargo Securement Standard. Available at: [https://www.fmcsa.dot.gov/sites/fmcsa.dot.gov/files/docs/Drivers\\_Handbook\\_Cargo\\_Securement\\_508CLN.pdf](https://www.fmcsa.dot.gov/sites/fmcsa.dot.gov/files/docs/Drivers_Handbook_Cargo_Securement_508CLN.pdf).
7. Priddy J. D., Jones R. A. Experimental Determination of the Effect of Cargo Variations on Roll Stability. 2005, : SAE International.
8. Balsom M., Wilson F. R., Hildebrand E. *Impact of Wind Forces on Heavy Truck Stability* // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2006, vol. 1969, no. 1, pp. 115–120. <https://www.doi.org/10.1177/0361198106196900116>.
9. Vertical cylinder handling and transportation. Available at: [http://www.asiaiga.org/uploaded\\_docs/AIGA%20038\\_06%20Vertical%20cylinder%20handling%20and%20transportation\\_reformatted%20Jan%2012.pdf](http://www.asiaiga.org/uploaded_docs/AIGA%20038_06%20Vertical%20cylinder%20handling%20and%20transportation_reformatted%20Jan%2012.pdf).
10. *Safety of loads on vehicles: Code of practice*. London: Department for Transport. 2002. 123 p.
11. Technical conditions for stowing and fastening cargo: Appendix 3 to the Agreement on International Goods Transport by Rail (SMGS). Available at: [https://www.bmzm.ru/doc/tech\\_usl\\_gr.pdf](https://www.bmzm.ru/doc/tech_usl_gr.pdf). (In Russ.).
12. Rules for stowing and fastening cargo in wagons and containers: Appendix 14 to the Agreement on International Goods Transport by Rail (SMGS). Available at: <https://xn--b1addackhp8agm.xn--p1ai/smg.pdf>. (In Russ.).
13. Turanov Kh.T., Bondarenko A.N., Vlasova N.V. *Fastening cargoes in wagons*. Yekaterinburg: USURT. 2006. 321 p. (In Russ.).
14. Turanov Kh.T. *Theoretical mechanics in special tasks on cargo transportation*. Novosibirsk, Yekaterinburg: Nauka; USURT. 2012. 447 p. (In Russ.).
15. Turanov Kh.T. *Interaction of open top rolling stock with solid-state freight*. Moscow: UMTs ZhDT. 2011. 374 p. (In Russ.).
16. Turanov Kh. *Analytical investigation of cargo motion lengthwise the wagon under the action of plane force system* // Global Journal of Research in Engineering (GJRE-A). 2013, vol. 13, no. 10, pp. 7–16.
17. Turanov Kh. *Mathematical Modeling of Cargo Motion Crosswise the Wagon under the Action of Plane Force System* // Science and Technology. 2015, vol. 5, no. 1, pp. 5–14.
18. Vorobyov V., Manakov A., Repina I. *Economic assessment of the control of human-factor impact on faults of technical facilities in railway-transport technological processes* // MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 239, p. 8011. <https://www.doi.org/10.1051/mateconf/201823908011>.
19. Ilinykh A., Manakov A., Abramov A., Kolarzh S. *Quality assurance and control system for railway track tamping* // MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 216, no. 1, p. 3004. <https://www.doi.org/10.1051/mateconf/201821603004>.
20. Turanov Kh.T., Ruzmetov Ya.O., Yakushev A.V. *On deformable state of the “cargo-wagon-fastening” mechanical system* // Proceedings of Petersburg Transport University. 2019, vol. 16, no. 3, pp. 455–468. (In Russ.).

21. Turanov K., Ruzmetov Y., Vlasova N. *Calculating cargo securing elements on a railway platform under the impact of a spatial force system* // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 135, no. 5, p. 2006. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/201913502006>.
22. Turanov K., Ruzmetov Y. *The problem of fastening cargo on railway rolling stock* // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 157, no. 3, p. 1008. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701008>.
23. Turanov K., Ruzmetov Y. *On the shift of cargo on a railway platform under the influence of transverse forces* // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 157, no. 3, p. 1012. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701012>.
24. Ruzmetov Y., Molchanova O., Shihnazarov J. *Calculation of solid-state cargo fastener under the influence of longitudinal forces* // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 157, no. 3, p. 1016. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701016>.
25. Turanov K., Ruzmetov Y., Shikhnazarov J. *Incorrectness of the method of calculating cargo fastening on railway platforms* // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 164, no. 20, p. 3040. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202016403040>.
26. Kir'janov D.V. *Tutorial Mathcad 13*. Saint Petersburg: BHV-Petersburg. 2006. 513 p. (In Russ.).



ISSN 2222-9396 (Print)

УДК [691.327.33:004.94]:656.21

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-43-52>

## СТРУКТУРНО-ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ ЛЁГКИХ БЕТОНОВ ДЛЯ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЗДАНИЙ

Адилходжаев А.И.\*, Шаумаров С.С.

Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика  
Узбекистан

\* E-mail: [anvar\\_1950@mail.ru](mailto:anvar_1950@mail.ru)

**Аннотация.** В статье приведены результаты анализа механизма формирования структуры ячеистых бетонов во взаимосвязи с их физико-механическими параметрами. Для установления данной взаимосвязи был применён метод фрактальной размерности структуры ячеистых бетонов на основе структурно-имитационного моделирования. Разработан подход к оценке свойств ячеистого бетона на основании анализа его изображения. Практическая значимость исследования состоит в разработке расчётного программного комплекса по определению фрактальной размерности ячеистого бетона.

**Ключевые слова:** железнодорожные здания, структурно-имитационное моделирование, фрактальная размерность, ячеистый бетон, пористость, физико-механические свойства

© Адилходжаев А.И., Шаумаров С.С., 2020

Поступила: 31 июля 2020; Принята к публикации: 17 декабря 2020; Опубликовано: 24 декабря 2020

### Для цитирования:

Адилходжаев А.И., Шаумаров С.С. Структурно-имитационное моделирование макроструктуры лёгких бетонов для наружных ограждающих конструкций железнодорожных зданий // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2020. Т.10. №1. С.43-52. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-43-52>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).





ISSN 2222-9396 (Print)

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-43-52>

## STRUCTURAL-SIMULATION MODELING OF MACHINE STRUCTURE OF LIGHT CONCRETE FOR EXTERNAL PROTECTING CONSTRUCTIONS OF RAILWAY BUILDINGS

Adilhodzaev A.I.\*, Shaumarov S.S.

Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

\* E-mail: [anvar\\_1950@mail.ru](mailto:anvar_1950@mail.ru)

**Abstract.** The article analyzes the macrostructure of cellular concrete, which characterizes the connection with their strength and heat engineering properties. In this connection, it is necessary to determine the fractal dimension of the structure of cellular concrete to clarify the connection with its porous structure based on structural-simulation modeling. An approach has been developed to assess the properties of cellular concrete based on the analysis of its image. Practical significance consists in the development of a design software package for determining the fractal dimension of cellular concrete.

**Keywords:** railway buildings, structural-simulation modeling, fractal dimension, cellular concrete, porosity, physical and mechanical properties

© Adilhodzaev A.I., Shaumarov S.S., 2020

Received: July 31, 2020; Accepted: December 17, 2020; Published: December 24, 2020

### For citation:

Adilhodzaev A.I., Shaumarov S.S. Structural and simulation modeling of machine structure of light concrete for external protecting constructions of railway buildings // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2020. 2020, vol.10, no.1, pp.43-52. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-43-52>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Введение

В настоящее время актуальной проблемой при возведении энергоэффективных зданий на железнодорожном транспорте является разработка экономичных по составу материалов, которые применяются для наружных ограждающих конструкций с требуемыми прочностными и теплозащитными свойствами. Решение данных задач осуществляется по следующим направлениям:

- совершенствование методов теплотехнического расчёта ограждающих конструкций;
- развитие новых технологий получения материалов со средней плотностью ниже 500 кг/м<sup>3</sup>;
- разработка современных автоматизированных методов математического моделирования структуры ячеистых бетонов на макроуровне;
- установление взаимосвязи между средней плотностью ячеистого бетона и его структурными особенностями.

Результаты проведённых в Ташкентском государственном транспортном университете исследований показали [1–3], что механизм формирования пористой структуры ячеистых бетонов с требуемым комплексом физико-механических и теплотехнических параметров описывается постулатами структурно-имитационного моделирования.

В данном случае использование концепции фракталов позволяет детально проследить эволюцию получения ячеистого бетона с заданным комплексом свойств. Это обусловлено тем, что теория фракталов позволяет трактовать понятие «структура» на основе количественной оценки структур, определяющих конечные свойства строительных материалов. Особую важность такая количественная оценка имеет как для учёта рецептурных и технологических факторов, так и особенностей сложно организуемых структур, присутствующих в ячеистом бетоне [4–6].

До настоящего времени исследование структуры пористых материалов связывали с плотностью и размерами пор. Такой подход не позволяет в полной мере установить чёткую взаимосвязь между структурой и свойствами ячеистых бетонов. Исходя из концепции разработки эффективных теплоизоляционных материалов, в качестве метода оценки параметров структуры пористого материала целесообразно использовать теоретические предпосылки фрактальной геометрии, которая позволяет производить анализ формирующейся структуры материала с ранжированием пор по размеру.

## 2. Краткий обзор исследований в области создания материалов с заранее заданными свойствами на основе использования положений теории фрактальной размерности

На сегодняшний день выполнен комплекс научных исследований [7–15], направленных на создание материалов с заранее заданными свойствами, с использованием в качестве научного инструмента теории фрактальной размерности. Основным направлением работ

является использование различных добавок для оптимизации поровой структуры ячеистых бетонов и совершенствования технологии их производства. Так, например, С.Ф. Кореньковой, И.В. Якушиным, В.Г. Заминой [16] проведены исследования по установлению связи между фрактальной структурой шламов и их реологическими свойствами. Данный метод позволяет авторам смоделировать поверхность частиц выбранного шлама на основе заданного гранулометрического состава и получить их фрактальное изображение.

В работах А.Н. Бобрышева, В.Т. Ерофеева и Д.Е. Жарина [17] рассматриваются вопросы оценки показателей фрактальности модельных систем и структуры разнообразных строительных материалов. Приводится трактовка физической сущности показателей фрактальной размерности систем и образования фрактально-кластерных структур композитов в процессах структурообразования, фазовых переходов, разделения фаз и так далее.

В.Д. Глуховским, П.В. Кривенко и Старчуком В.Н. [18] были выполнены исследования, направленные на управление процессом получения бетонов с заранее заданными свойствами при помощи модифицирующих добавок, регулирующих такие показатели среды, как pH, ионная сила, образовательная способность компонентов и др.

Как показывает анализ представленных выше работ, для успешного использования рассмотренных методов управления структурообразованием лёгких бетонов, с одной стороны, необходим единый подход к исследованию и проектированию материалов различного химического состава как системы, имеющей несколько уровней структурной организации. С другой стороны, оптимизация поровой структуры ячеистых бетонов в результате введения различных добавок и совершенствования технологических решений его производства, является весьма трудоёмким процессом. Реализация этого процесса путём проведения множества экспериментов связана со значительными затратами. Более того, даже эксперимент, основанный на разработанных технологических приёмах, не гарантирует получения требуемых значений основных характеристик ячеистого бетона [19].

Наиболее целесообразным, на наш взгляд, является применение подхода, основанного на математическом моделировании структуры ячеистого бетона с заданными свойствами. При построении математической модели предлагается использовать постулаты теории фрактальной размерности.

## 3. Постановка задачи

В соответствии с методологией формирования фрактальных объектов, были выполнены численные расчёты по определению фрактальной размерности пор с целью установления связи последней с пористой структурой бетона. Для этого была построена физическая модель ячеистого бетона (рис. 1) с гексагональной упаковкой.

Данная физическая модель предполагает формиро-

вание пространственного каркаса, заполненного порами определенного размера [1, 19]. При этом плотное формирование пор достигается в результате самопроизвольной перестройки решётки. Капиллярные поры образуют гексагональную, кубическую или ромбическую решётку межпорового материала.

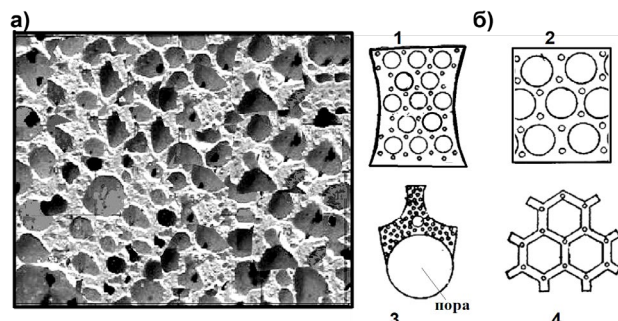


Рис. 1. Физическая модель пористой структуры ячеистого бетона: а) микроснимок ячеистого бетона гексагональной упаковки с бинарной решёткой первого порядка; б) схематический рисунок гексагональной упаковки с бинарной решёткой второго порядка (1,2), 3 – пространственная решётка со сферическими порами, 4 – трансформация пор в многогранные

Fig. 1. Physical model of the porous structure of cellular concrete: a) micrograph of cellular concrete of hexagonal packing with a first-order binary lattice; b) a schematic drawing of a hexagonal packing with a binary lattice of the second order (1,2), 3 – a spatial lattice with spherical pores, 4 – transformation of pores into polyhedral

#### 4. Структурно-имитационное моделирование для определения фрактальной размерности ячеистого бетона

Математическая модель представленной в разделе 2 физической организации пористой структуры ячеистого бетона строилась на основании правил распределения плотности пор по их радиусам сечений для гексагональной (рис. 1) упаковки так, чтобы пористость решётки при толщине перегородок 20-60 мкм изменялась в диапазоне от 10% до 90%.

Далее, для определения фрактальной размерности и дальнейшего установления связи фрактальной размерности с формирующейся пористостью ячеистого бетона был разработан метод, основанный на анализе изображений образца ячеистого бетона, полученного с помощью оптического микроскопа «Neophot-21» (рис.2).

В данном разделе представлен расчёт фрактальной размерности по данным сформированных массивов с координатами границ и центров квадратов сетки. Для наглядного представления объектов на изображениях, подвергнутом машинному анализу, на рис. 3 приведена микрофотография фрагмента структуры ячеистого бетона.

Поскольку технология получения изображения не является однозначной, то изображению свойственны помехи (шумы), искажающие истинную картину

структуры образца. Поэтому в целях фильтрации подобного рода помех в программный комплекс обработки изображений включена процедура квантования – осреднение по градациям уровней яркости в заданных диапазонах. Данная процедура позволяет привести изображение к некоторым средним стандартным условиям.

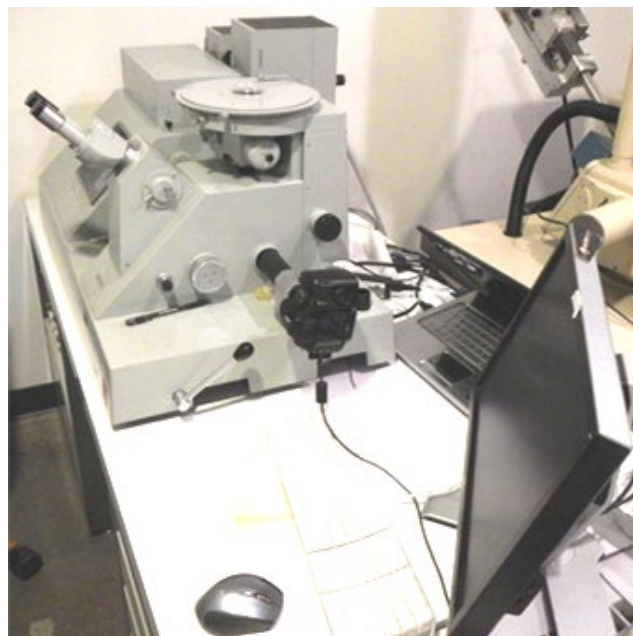


Рис. 2. Общий вид установки на основе микроскопа «Neophot-21» для оптического отображения пористости ячеистого бетона

Fig. 2. Laboratory setup based on the "Neophot-21" microscope for optical imaging of the porosity of cellular concrete

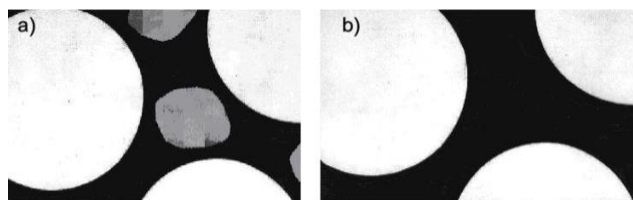


Рис. 3. Микрофотография ячеистого бетона: а) светлый цвет – воздушные пузырьки; черный цвет – матрица; серый цвет – наполнитель; б) то же изображение в бинарном виде (квантованное на два уровня)

Fig. 3. Micrograph of cellular concrete: a) light color – air bubbles; black color – matrix; gray – filler; b) the same image in binary form (quantized into two levels)

В сущности, количество уровней может быть произвольным, но обязательным является задание последнего уровня как бинарного. Это условие является необходимым, так как нас интересуют два объекта: материал и поры. На языке обработки изображений – это две градации, в нашем случае – черный и белый цвет.



На рис. 4б приведены результаты квантования изображения, представленного на рис. 1 и рис. 4а.

Оказалось, что фильтрация, приводящая изображение к некоторым средним условиям съёмки, выполняет чрезвычайно важную функцию, связанную с характеристикой структуры образца в целом (рис. 4б). Видно, что на последних изображениях рис. 4б проявляется геометрия формирования структуры образца в целом, носящая анизотропный характер, определяемый ориентацией макроструктуры в преимущественном направлении. При этом, с увеличением уровня квантования, указанная особенность макроструктуры проявляется в большей степени. Сказанное поясняет рис. 5, где показано увеличенное изображение бинарного уровня (рис. 4б, 8) с преимущественным направлением

сформированной макроструктуры в целом (направление указано стрелкой). Для данного образца, полученного по определенной технологии, основное направление сформированной макроструктуры находится под углом  $18^\circ$  к горизонтальной линии.

Как будет показано ниже, предложенный подход оценки физико-механических параметров проектируемого материала на основании анализа изображений позволяет с учётом различных значений прочности как в «тонких», так и в «толстых» структурах, формирующихся вокруг газо-воздушных пузырьков прослойки, производить анализ формирующегося прочного композита с требуемыми параметрами. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

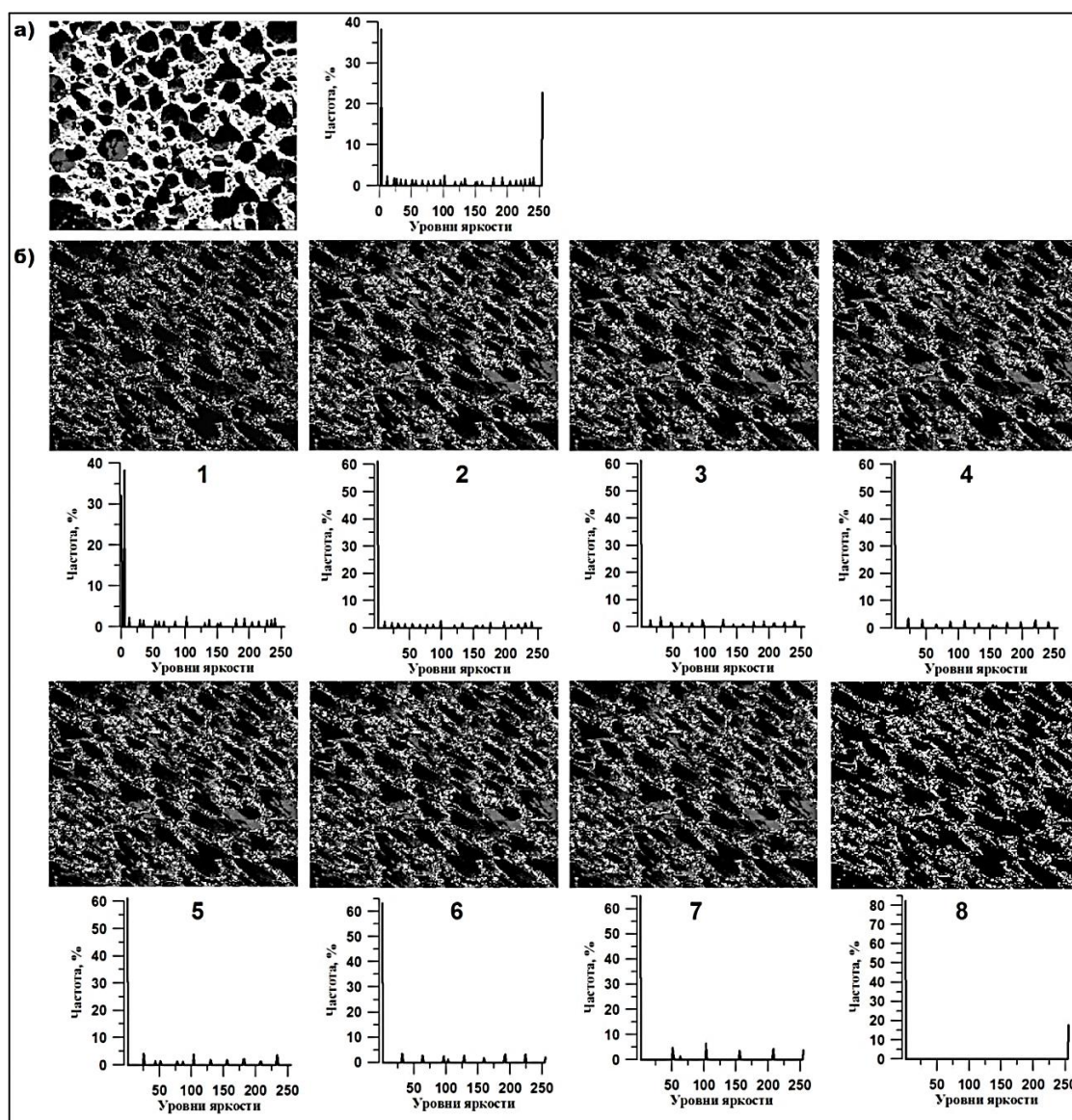


Рис. 4. Результаты обработки изображения структуры ячеистого бетона: а) исходное изображение ячеистого бетона и его гистограмма; б) квантованные изображения от первого до восьмого уровней и соответствующие гистограммы

Fig. 4. The results of processing the image of the cellular concrete structure: a) the original image of cellular concrete and its histogram; b) quantized images from 1st to 8th levels and corresponding histograms

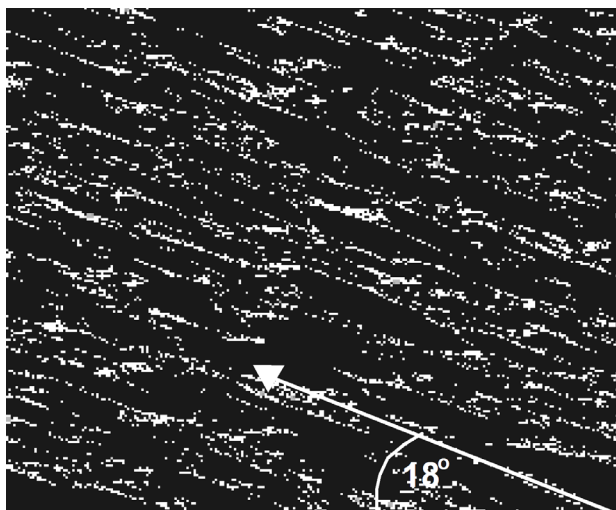


Рис. 5. Анизотропный характер сформированной макроструктуры ячеистого бетона

Fig. 5. Anisotropic nature of the formed cellular concrete macrostructure

Согласно [20, 21], прочностные показатели материала, при прочих равных факторах, определяются изотропностью его структуры относительно приложенной к нему нагрузки. В нашем случае, анизотропия макроструктуры уменьшает среднюю прочность ячеистого бетона при направленном действии волны нагрузки. Особенности напряженного состояния, возникающего в образце ячеистого бетона на наклонной площадке, представлены на рис. 6а.

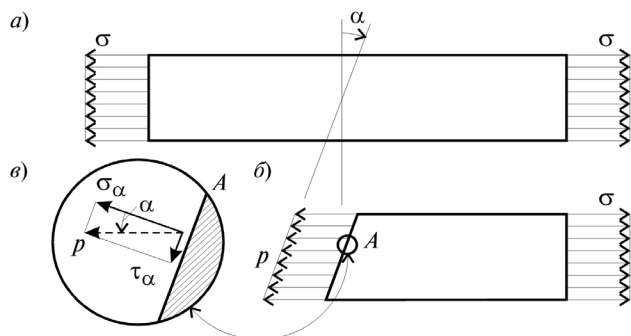


Рис. 6. Напряжения в наклонной площадке образца, находящейся под углом  $\alpha$  к плоскости нормального сечения

Fig. 6. Stresses in an inclined sample area, located at an angle  $\alpha$  to the plane of normal section

Обозначим через  $\vec{P}$  полное напряжение в окрестности некоторой точки выделенной области образца, возникающее в результате приложенной внешней нагрузки

$$\vec{P} = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta \vec{R}}{\Delta F} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta \vec{R}$  – внутренняя сила сцепления;  $\Delta F$  – элемент площади.

Из условия равновесия образца, записанного для отсеченной части стержня (рис. 6в), выражение для напряжения  $\vec{P}$  запишется в виде

$$\vec{P} \cdot F_\alpha = \sigma F, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение – проекция вектора  $\vec{P}$  на нормаль к площадке  $\Delta F$ ;  $F$  – площадь поперечного сечения стержня;  $F_\alpha$  – площадь наклонного сечения.

Величина  $F_\alpha$  определяется по следующей формуле [20, 21]

$$F_\alpha = \frac{F}{\cos \alpha}. \quad (3)$$

Отсюда

$$\vec{P} = \sigma \cos \alpha. \quad (4)$$

Раскладывая напряжение  $\vec{P}$  по нормали и касательной к наклонной площадке (рис. 6б), получим

$$\sigma_\alpha = p \cos \alpha = \sigma \cos^2 \alpha, \quad (5)$$

$$\tau_\alpha = p \sin \alpha = \frac{1}{2} \sigma \sin^2 \alpha. \quad (6)$$

Полученные выражения показывают, что для одной и той же точки тела величины напряжений, возникающих в сечениях, проходящих через эту точку, зависят от ориентации этой площадки [20, 21], то есть от угла  $\alpha$ . В нашем случае  $\alpha = 18^\circ$ , тогда, как нетрудно видеть, прочность исследуемого образца в направлении сформированной макроструктуры уменьшится примерно в 0.1 раза.

При наличии линейной зависимости между напряжениями и деформациями (в соответствии с законом Гука), в качестве коэффициента пропорциональности выступает модуль упругости (модуль Юнга)  $E = \sigma / \varepsilon$  ( $\varepsilon$  – относительное удлинение), который вместе с величиной модуля сдвига  $G = \tau / \alpha$ , коэффициентом Пуассона  $\nu = |\varepsilon'| / \varepsilon|$  ( $\varepsilon'$  – абсолютное значение относительного поперечного сжатия) и объемным модулем сжатия  $K = \sigma / \Delta$  ( $\Delta$  – относительное объемное сжатие) определяют, в общем, прочностные характеристики материала.

В случае изотропной структуры, соответствующие модули упругости одинаковы по всем направлениям. При этом они связаны друг с другом следующими соотношениями [20]

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (7)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}. \quad (8)$$

В данном случае, модуль упругости  $E$  и модуль сдвига  $G$  являются независимыми величинами, и упругие свойства изотропного материала определяются двумя упругими постоянными параметрами.

В случае же анизотропного материала, параметры



$E$ ,  $G$  и  $\nu$  принимают различные значения в разных направлениях и величины их могут изменяться в широких пределах.

Заметим, что прочностные свойства материалов, в зависимости от их степени анизотропности, достаточно хорошо изучены применительно к материалам волокнистой структуры. Известно, что у таких материалов с характерной анизотропностью, прочность и другие свойства различаются в зависимости от направления волокон [22].

Таким образом, граница «материал – поры», имеющая преимущественную ориентацию (анизотропия структуры), является слабым звеном в прочностных свойствах ячеистого бетона как строительного материала, независимо от его средних прочностных номиналов, удовлетворяющих действующим стандартам [23].

Для вычисления фрактальной размерности в исследовании используется алгоритм Пеано и метод «Box Counting» [24]. Согласно этому методу, вычисления фрактальной размерности  $D$  (рис.7) производится по формуле

$$D = \frac{\ln N}{\ln \left( \frac{1}{\delta} \right)}, \quad (9)$$

где  $\delta$  – квадратная ячейка сетки размером  $\delta \times \delta$ , покрывающей бинарное изображение (рис. 7);  $N$  – число квадратных ячеек, в которые попали точки (с координатами  $x_i, y_j, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, k$ ) изображения, принадлежащие границе «материал – поры». Значение  $N$  определялось с использованием алгоритма, представленного на рис. 8 [19, 24].

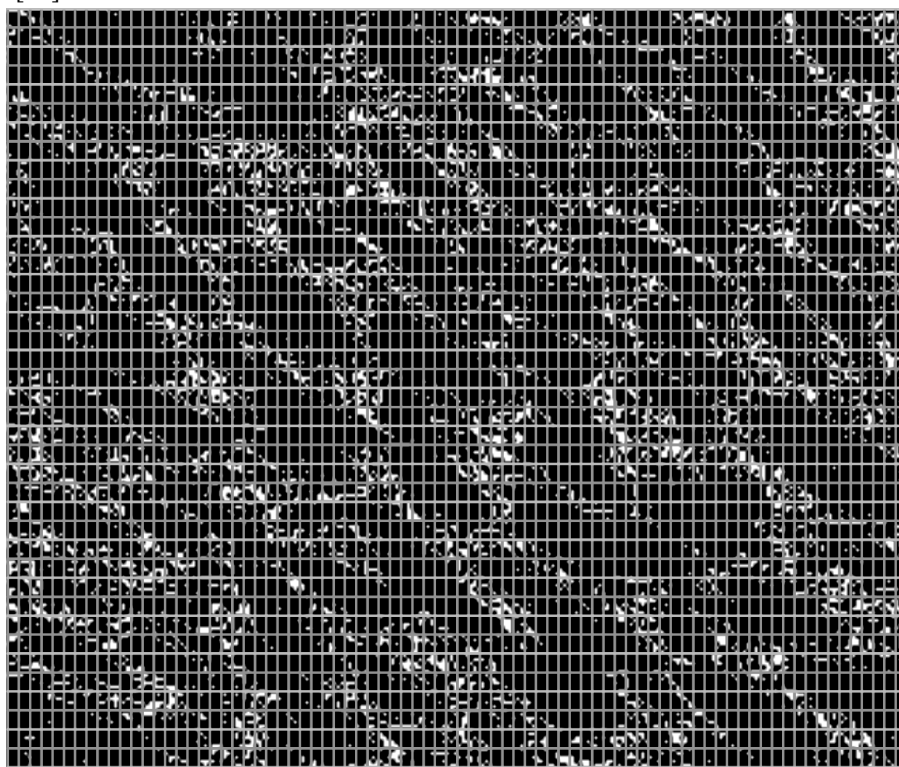


Рис. 7. Бинарное изображение макроструктуры ячеистого бетона, покрытое сеткой с квадратными ячейкам, внутри которых, согласно алгоритму «Box Counting», вычислялось количество попавших в  $i$ -ый квадрат граничных (материал – поры) точек

Fig. 7. Binary image of cellular concrete macrostructure, covered with a grid with square cells, inside which, according to the "Box Counting" algorithm, the number of boundary points (material - pores) that fell into the  $i$ -th square was calculated

Проведённый численный эксперимент в рамках программной реализации (рис. 8) включает в себя модули, обеспечивающие ввод и формирование матрицы изображения структуры ячеистого бетона в памяти компьютера. Здесь же выполняются процедуры обработки изображения, включающие квантование исходного изображения на заданное число уровней в целях распознавание границ «материал – поры» и вычисление фрактальной размерности структуры ячеистого бе-

тона данной пористости. Эта часть программного комплекса обеспечивает первичную реализацию численного эксперимента. Вторая часть программного комплекса выполняет численные эксперименты с модельными образцами ячеистого бетона различной пористости, а также исследования, связанные с формированием её связи с фрактальной размерностью и, в конечном счёте, с прочностными и теплотехническими свойствами.

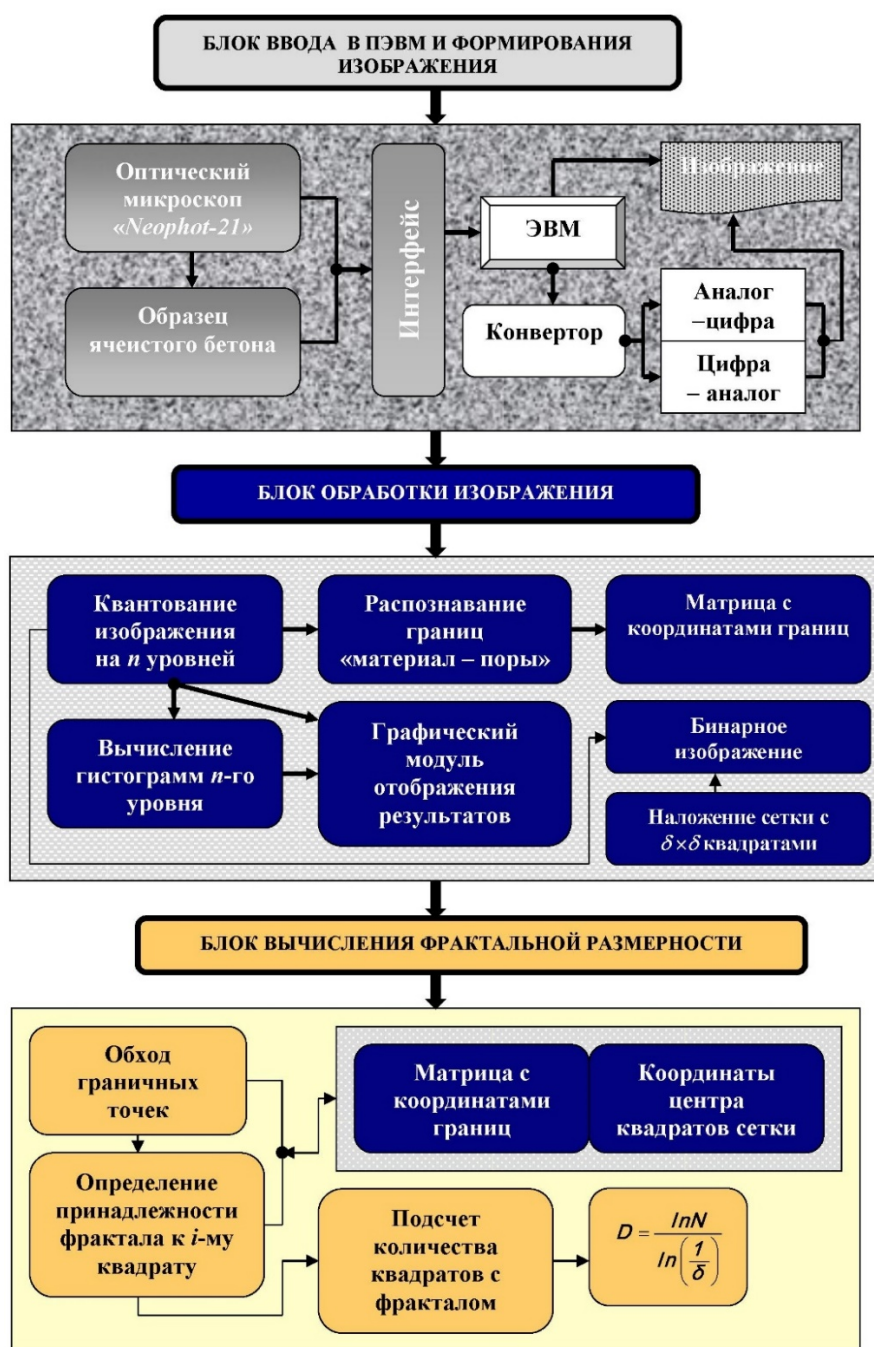


Рис. 8. Последовательность действий по вычислению фрактальной размерности структуры ячеистого бетона по его изображению

Fig. 8. The sequence of calculating the fractal dimension of the structure of aerated concrete from its image

## 5. Заключение

На основании предложенной методики имитационного моделирования произведена количественная оценка фрактальной размерности, описывающая механические, теплотехнические свойства пористых материалов, коррелирующая с такими важнейшими параметрами, как объёмная масса, прочность, пористость, теплопроводность. В результате получены отклики системы «матрица – компоненты – поры» на вариации

геометрии структуры и выполнен их анализ. На основе рационального сочетания вероятностного и детерминированного описания исследуемых структур ячеистого бетона получена связь структуры со свойствами композиционного материала.

Установлено, что, анизотропия макроструктуры ячеистых бетонов уменьшает среднюю прочность ячеистого бетона в зависимости от угла наклона вектора преимущественной организации структуры к горизонтальной оси.

## Список литературы

1. Адилходжаев А.И., Шаумаров С.С., Мухаммадиев Н.Р. Аналитическое и экспериментальное исследование структурной организации теплоизоляционно-конструктивных строительных материалов для железнодорожных зданий и сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 2. С. 220-229.
2. Shaumarov S.S., Adilhodzhaev A.I. On Some Aspects of The Development of Methodological Foundations of Use in the Exterior Walling of Energy-Efficient Building Materials With A Predetermined Set of Properties // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2019. Т. 6. № 3. С. 33-37.
3. Ji X., Chan S.Y.N., Feng N. Fractal model for simulating the space-filling process of cement hydrates and fractal dimensions of pore structure of cement-based materials // Cement and Concrete Research. 1997. Т. 27. № 11. С. 1691-1699. [https://www.doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00157-9](https://www.doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00157-9).
4. Рыбьев И.А. Закономерности в структурно-механических свойствах асфальтового бетона // Труды ВЗИСИ. 1957. № 1. С. 3-18.
5. Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A. Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging // NDT & E International. 2016. Т. 77. С. 11-18. <https://www.doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.09.004>.
6. Peng J., Wu Z., Zhao G. Fractal analysis of fracture in concrete // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1997. Т. 27. № 2. С. 135-140. [https://www.doi.org/10.1016/S0167-8442\(97\)00015-3](https://www.doi.org/10.1016/S0167-8442(97)00015-3).
7. Konkol J. A Fractal Model of Cracking of Cement Matrix Composites // Buildings. 2020. Т. 10. № 3. С. 52. <https://www.doi.org/10.3390/buildings10030052>.
8. Wang S., Guo Z. Random heterogeneous microstructure construction of composites via fractal geometry // Applied Mathematics and Mechanics. 2019. Т. 40. № 10. С. 1413-1428. <https://www.doi.org/10.1007/s10483-019-2522-5>.
9. Baglivo C., Congedo P. M. Design method of high performance precast external walls for warm climate by multi-objective optimization analysis // Energy. 2015. Т. 90. С. 1645-1661. <https://www.doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.132>.
10. Gao Y., Feng P., Jiang J. Analytical and numerical modeling of elastic moduli for cement based composites with solid mass fractal model // Construction and Building Materials. 2018. Т. 172. С. 330-339. <https://www.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.267>.
11. Хархардин А.Н. Теория прочности и структуры твёрдых пористых тел // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. № 4. С. 42-53.
12. Yang X., Wang F. Random-fractal-method-based generation of meso-model for concrete aggregates // Powder Technology. 2015. Т. 284. С. 63-77. <https://www.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.045>.
13. Song W., Wang D., Yao J., Li Y., Sun H., Yang Y., Zhang L. Multiscale image-based fractal characteristic of shale pore structure with implication to accurate prediction of gas permeability // Fuel. 2019. Т. 241. С. 522-532. <https://www.doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.062>.
14. Ebrahimi S., Tavakoli M.B., Setoudeh F. Iris Recognition System Based on Fractal Dimensions Using Improved Box Counting // Journal of Information Science and Engineering. 2019. Т. 35. С. 275-290.
15. Prigarin S. M., Hahn K., Winkler G. Comparative analysis of two numerical methods to measure Hausdorff dimension of the fractional Brownian motion // Numerical Analysis and Applications. 2008. Т. 1. № 2. С. 163-178. <https://www.doi.org/10.1134/S1995423908020079>.
16. Коренькова С.Ф., Якушин И.В., Зими́на В.Г. Фрактальное моделирование свойств шламовых отходов // Башкирский химический журнал. 2007. Т. 14. № 4. С. 114-119.
17. Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Жарин Д.Е. Основы формирования структуры композиционных материалов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. 112 с.
18. Глуховский В.Д., Кривенко П.В., Старчук В. Н. и др. Шлакощелочные бетоны на мелкозернистых заполнителях. Киев: Вища школа, 1981. 223 с.
19. Adilkhodzhaev A. I., Shaumarov S. S., Shchipacheva E. V., Begmatov N. I. Methodological approach to estimation of the structure of load bearing insulation materials of buildings and constructions of railway transport // Vestnik of the Railway Research Institute. 2019. Т. 78. № 3. С. 162-168. <https://www.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-162-168>.
20. Фри́дман Я.Б. Механические свойства металлов. М.: Оборонгиз, 1952. 557 с.
21. Бе́ляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1976. 608 с.
22. Ко́пьев И.М. О. А.С. Разрушение металлов, армированных волокнами. М.: Наука, 1977. 240 с.
23. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона: ГОСТ 24452-80. М.: Стандартинформ, 2005. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-24452-80>. 14 с.
24. Falconer K. J. The Geometry of Fractal Sets. New York, Melbourne: Cambridge University Press, 2010. 162 с. <https://www.doi.org/10.1017/CBO9780511623738>.



# References

1. Adylkhodzhaev A.I., Shaumarov S.S., Mukhammadiyev N.R. *Analytical and experimental study of the structural organization of heat-insulating construction materials for railway buildings and structures* // Proceedings of Petersburg Transport University. 2019, vol. 16, no. 2, pp. 220–229. (In Russ.).
2. Shaumarov S.S. Adilkhodzhaev A.I. *On Some Aspects of The Development of Methodological Foundations of Use in the Exterior Walling of Energy-Efficient Building Materials With A Predetermined Set of Properties* // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2019, vol. 6, no. 3, pp. 33–37.
3. Ji X., Chan S.Y.N., Feng N. *Fractal model for simulating the space-filling process of cement hydrates and fractal dimensions of pore structure of cement-based materials* // Cement and Concrete Research. 1997, vol. 27, no. 11, pp. 1691–1699. [https://www.doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00157-9](https://www.doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00157-9).
4. Rybyev I.A. *Patterns in the structural-mechanical properties of asphalt concrete* // VZISI materials. 1957, no. 1, pp. 3–18. (In Russ.).
5. Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A. *Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging* // NDT & E International. 2016, vol. 77, pp. 11–18. <https://www.doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.09.004>.
6. Peng J., Wu Z., Zhao G. *Fractal analysis of fracture in concrete* // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1997, vol. 27, no. 2, pp. 135–140. [https://www.doi.org/10.1016/S0167-8442\(97\)00015-3](https://www.doi.org/10.1016/S0167-8442(97)00015-3).
7. Konkol J. *A Fractal Model of Cracking of Cement Matrix Composites* // Buildings. 2020, vol. 10, no. 3, p. 52. <https://www.doi.org/10.3390/buildings10030052>.
8. Wang S., Guo Z. *Random heterogeneous microstructure construction of composites via fractal geometry* // Applied Mathematics and Mechanics. 2019, vol. 40, no. 10, pp. 1413–1428. <https://www.doi.org/10.1007/s10483-019-2522-5>.
9. Baglivo C., Congedo P. M. *Design method of high performance precast external walls for warm climate by multi-objective optimization analysis* // Energy. 2015, vol. 90, pp. 1645–1661. <https://www.doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.132>.
10. Gao Y., Feng P., Jiang J. *Analytical and numerical modeling of elastic moduli for cement based composites with solid mass fractal model* // Construction and Building Materials. 2018, vol. 172, pp. 330–339. <https://www.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.267>.
11. Harhardin A.N. *Theory of strength and structure of solid porous bodies* // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2003, no. 4, pp. 42–53. (In Russ.).
12. Yang X., Wang F. *Random-fractal-method-based generation of meso-model for concrete aggregates* // Powder Technology. 2015, vol. 284, pp. 63–77. <https://www.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.045>.
13. Song W., Wang D., Yao J., Li Y., Sun H., Yang Y., Zhang L. *Multiscale image-based fractal characteristic of shale pore structure with implication to accurate prediction of gas permeability* // Fuel. 2019, vol. 241, pp. 522–532. <https://www.doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.062>.
14. Ebrahimi S., Tavakoli M.B., Setoudeh F. *Iris Recognition System Based on Fractal Dimensions Using Improved Box Counting* // Journal of Information Science and Engineering. 2019, vol. 35, pp. 275–290.
15. Prigarin S. M., Hahn K., Winkler G. *Comparative analysis of two numerical methods to measure Hausdorff dimension of the fractional Brownian motion* // Numerical Analysis and Applications. 2008, vol. 1, no. 2, pp. 163–178. <https://www.doi.org/10.1134/S1995423908020079>.
16. Korenkova S.F., Yakushin I.V., Zimina V.G. *Fractal modelling of slime waste products properties* // Bashkir chemistry journal. 2007, vol. 14, no. 4, pp. 114–119. (In Russ.).
17. Bobrysheva A.N., Yerofoyeva V.T., Zharina D.Ye. *Fundamentals of the formation of the structure of composite materials*. Saransk: Izd. Mordovskogo Uiversiteta. 2012. 112 p.
18. Glukhovskiy V.D., Krivenko P.V., Starchuk V.N. et al. *Slag-alkaline concretes on fine-grained aggregates*. Kiyev: Vishcha shkola. 1981. 223 p.
19. Adilkhodzhaev A. I., Shaumarov S. S., Shchipacheva E. V., Begmatov N. I. *Methodological approach to estimation of the structure of load bearing insulation materials of buildings and constructions of railway transport* // Vestnik of the Railway Research Institute. 2019, vol. 78, no. 3, pp. 162–168. <https://www.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-162-168>. (In Russ.).
20. Fridman Ja.B. *Mechanical properties of metals*. Moscow: Oborongiz. 1952. 557 p. (In Russ.).
21. Belyaev N.M. *Strength of materials*. Moscow: Nauka. 1976. 608 p. (In Russ.).
22. Kop'jov I.M., Ovchinskij A.S. *Destruction of fiber-reinforced metals*. Moscow: Nauka. 1977. 240 p. (In Russ.).
23. State Standart. *Concretes. Methods of prismatic compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination*, 2005, GOST 24452-80. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-24452-80>.
24. Falconer K. J. *The Geometry of Fractal Sets*. New York, Melbourne: Cambridge University Press. 2010. 162 p. <https://www.doi.org/10.1017/CBO9780511623738>.