



# Вестник

Уральского  
государственного  
университета  
путей сообщения

Научный журнал

**Herald**  
**of the Ural State University**  
**of Railway Transport**

Scientific journal



Научный журнал  
Вестник Уральского государственного  
университета путей сообщения  
(Вестник УрГУПС)  
№ 2 (62), 2024 год

**Главный редактор**  
Дмитрий Станиславович Завалишчин  
**Зам. главного редактора**  
Василий Федорович Лапшин  
**Научный редактор**  
Василий Михайлович Сай

**Литературный и выпускающий редактор**  
Елена Семеновна Пупова  
**Техническое редактирование и верстка**  
Светлана Николаевна Наймушина

**Учредитель и издатель:**  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учрежде-  
ние высшего образования «Уральский  
государственный университет путей  
сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

**Адрес учредителя, издателя и редакции:**  
620034, Екатеринбург,  
ул. Колмогорова, 66

**Телефон редакции:** (343) 221-25-60.  
**Веб-сайт:** [www.usurt.ru/vestnik](http://www.usurt.ru/vestnik);  
**e-mail:** [vestnik@usurt.ru](mailto:vestnik@usurt.ru).

Вестник УрГУПС включен ВАКом  
в перечень периодических, научных  
и научно-технических изданий,  
выпускаемых в Российской Федерации,  
в которых рекомендуется публикация  
основных результатов диссертаций.

DOI:10.20291/2079-0392

Свидетельство о регистрации  
средства массовой информации  
Роскомнадзора ПИ № ФС77–38188  
от 30 ноября 2009 г.

Подписной индекс журнала  
в общероссийском каталоге  
«Пресса России» – 70070

Изготовлено в ИБК УрГУПС  
620034, Екатеринбург,  
ул. Колмогорова, 66.

Подписано в печать 28.06.2024  
Дата выхода в свет 11.07.2024  
Цена 540,71 руб.

Тираж 300 экз. 1-й з-д: 1–60.  
Формат 70×100/16. Заказ 32

Уральский государственный  
университет путей сообщения  
(ФГБОУ ВО УрГУПС), 2024 ©

Scientific journal «Herald of the  
Ural State University  
of Railway Transport»  
(Herald of the USURT)  
No. 2 (62), 2024

**Editor-in-chief**  
Dmitry S. Zavalishchin  
**Deputy Editor-in-Chief**  
Vasily F. Lapshin  
**Science editor**  
Vasily M. Say

**Script and copy editor**  
Elena S. Pupova

**Technical editing and make-up**  
Svetlana N. Naimushina

**Founder and publisher:**  
Federal state-funded educational  
institution of the higher education  
«Ural State University of Railway Transport»  
(USURT)

**Address of the founder, publisher and edition:**  
66 Kolmogorov Street,  
620034, Ekaterinburg

**Telephone:** +7 (343) 221-25-60.  
**Web-site:** [www.usurt.ru/vestnik](http://www.usurt.ru/vestnik);  
**e-mail:** [vestnik@usurt.ru](mailto:vestnik@usurt.ru).

DOI:10.20291/2079-0392

The Mass Media Registration Certificate  
by the Federal Service for Supervision  
of Communications, Information Technology,  
and Mass Media (Roskomnadzor)  
PI No. FS77-38188  
of November 30, 2009

Subscription reference number  
of the issue in the All Russia Catalogue  
«Pressa Rossii» – 70070

Manufactured in the publishing  
and library complex USURT  
66 Kolmogorov Street,  
620034, Ekaterinburg.

Passed for printing 28.06.2024  
Data of issue 11.07.2024  
The price 540,71 rub.

Circulation 300. The 1st pr.: 1–60.  
Format 70×100/16. Order 32

The Ural State University  
of Railway Transport  
(USURT), 2024 ©

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Владимир Викторович Цыганов**, д-р техн. наук, профессор, Институт проблем управления Российской академии наук, Москва, Россия

**Сергей Герман-Галкин**, д-р техн. наук, профессор, Морская академия, Институт судовой автоматики и электротехники, Щецин, Польша

**Дорел Гузун**, д-р техн. наук, профессор, Институт нанотехнологий и инженерии, Университет Арканзаса, Фейетвилл, США

**Александр Леонидович Казаков**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

**Вячеслав Семенович Шварцфельд**, д-р техн. наук, профессор, Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург, Россия

**Михаил Ростиславович Якимов**, д-р техн. наук, директор Института транспортного планирования Российской академии транспорта, Москва, Россия

**Василий Михайлович Сай**, д-р техн. наук, профессор, Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

## РЕДКОЛЛЕГИЯ

**Евгений Самуилович Ашпиз**, д-р техн. наук, профессор, РУТ, Москва

**Владимир Григорьевич Булаев**, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

**Александр Петрович Буйносов**, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

**Игорь Игоревич Гаврилин**, канд. биол. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург

**Дмитрий Станиславович Завалищин**, канд. физ.-мат. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург

**Сергей Николаевич Корнилов**, д-р техн. наук, профессор, МГТУ, Магнитогорск

**Валерий Максимович Курганов**, д-р техн. наук, профессор, ТвГУ, Тверь

**Василий Федорович Лапшин**, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

**Валерий Владимирович Сапожников**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург

**Галина Адольфовна Тимофеева**, д-р физ.-мат. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

**Константин Владимирович Щурин**, д-р техн. наук, профессор Технологического университета, Королев

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

**Vladimir Viktorovich Tsyganov**, DSc in Engineering, Professor, Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Sergey German-Galkin**, DSc in Engineering, Professor, Maritime University, Institute of Marine Electrical Engineering and Vessel Automation, Szczecin, Poland

**Dorel Guzun**, DSc in Engineering, Professor, Institute for Nanoscience and Engineering, University of Arkansas, Fayetteville, USA

**Alexander Leonidovich Kazakov**, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

**Vyacheslav Semyonovich Schwarzfeld**, DSc in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Mikhail Rostislavovich Yakimov**, DSc in Engineering, Director of Institute of Transport Planning of Russian Transport Academy, Moscow, Russia

**Vasilii Mikhailovich Say**, DSc in Engineering, Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

## EDITORIAL BOARD

**Evgeniy Samuilovich Ashpiz**, DSc in Engineering, Professor, RUT (MIIT), Moscow

**Vladimir Grigoryevich Bulaev**, DSc in Engineering, Professor, USURT, Ekaterinburg

**Alexander Petrovich Buynosov**, DSc in Engineering, Professor, USURT, Ekaterinburg

**Igor Igorevich Gavrilin**, PhD in Biology, Associate Professor, USURT, Ekaterinburg

**Dmitry Stanislavovich Zavalishin**, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, USURT, Ekaterinburg

**Sergey Nikolaevich Kornilov**, DSc in Engineering, Professor, MSTU, Magnitogorsk

**Valeriy Maksimovich Kurganov**, DSc in Engineering, Professor, TSU, Tver

**Vasilii Fedorovich Lapshin**, DSc in Engineering, Professor, USURT, Ekaterinburg

**Valeriy Vladimirovich Sapozhnikov**, DSc in Engineering, Professor, PSTU, St. Petersburg

**Galina Adolfovna Timofeeva**, DSc in Physics and Mathematics, Professor, USURT, Ekaterinburg

**Konstantin Vladimirovich Shchurin**, DSc in Engineering, Professor, Leonov University of Technology, Korolev

# Содержание

## Математические модели технологических процессов

- 4 Н. Ф. Сирина, А. Е. Колодин, П. С. Гончар. Математическая модель организации обслуживания и ремонта грузовых вагонов
- 15 В. Н. Коваленко. Способ минимизации числа состояний недоопределенного конечного автомата
- 23 Д. С. Завалищин. Задача управления мультиагентной транспортной системой

## Организация производства

- 29 Б. М. Гасанов, Н. В. Буланов. Исследование интенсивности теплообмена при кипении жидкости в стесненных условиях узких каналов
- 45 Д. В. Осипов, П. Ю. Иванов, К. Е. Пронин, И. А. Кудьяров. Экспериментальное исследование работы пневматических тормозов грузового подвижного состава при однотрубном и двухтрубном питании
- 56 А. В. Железняков, А. А. Кучеренко. Исследование технологии изготовления литых медных короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных тяговых двигателей

## Управление в технических системах

- 66 А. Н. Киреев, Ю. В. Ливцов, М. А. Киреева. Настройка функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры по боковому цилиндрическому отражателю при диагностировании деталей подвижного состава
- 74 А. А. Климов. О корректировке алгоритма расчета высоты сортировочной горки
- 86 Н. Э. Амиров, П. В. Шепелин, А. А. Булатов. Измерение избыточной энергии электрического торможения поездов в системе энергоснабжения постоянного тока РЖД

## Механика машин и роботов

- 93 А. Э. Павлюков, М. В. Жуйков. Оценка прочности каркаса кабины машиниста грузового локомотива при аварийных столкновениях

## Аспирантская тетрадь

- 102 А. А. Корсун. Математическое моделирование адаптивного торможения высокоскоростного поезда с дисковым тормозом
- 111 С. В. Трескин. Классификация способов фиксации тормозных чек в башмаках тормозной рычажной передачи грузовых вагонов

# Contents

## Mathematic models in technological processes

- 4 N. F. Sirina, A. E. Kolodin, P. S. Gonchar. Mathematical model of maintenance and repair processes for freight cars
- 15 V. N. Kovalenko. The method of minimization of the number of undetermined finite-state machine
- 23 D. S. Zavalishchin. Multi-agent transport system control problem

## Production organization

- 29 B. M. Gasanov, N. V. Bulanov. The study of the intensity of heat transfer when the liquid boils in confined spaces of narrow channels
- 45 D. V. Osipov, P. Yu. Ivanov, K. E. Pronin, I. A. Kudyarov. Experimental study of the operation of pneumatic brakes of freight rolling stock with single-tube and double-tube power supply
- 56 A. V. Zheleznyakov, A. A. Kucherenko. Research of manufacturing technology of cast copper short-circuited rotor windings of asynchronous traction motors

## Control in engineering systems

- 66 A. N. Kireev, Yu. V. Livtsov, M. A. Kireeva. Setting up the function of temporary adjustment of the ultrasonic equipment sensitivity by the lateral cylindrical reflector during rolling stock parts diagnosis
- 74 A. A. Klimov. On adjusting the algorithm of a marshalling yard height calculation
- 86 N. E. Amirov, P. V. Shepelin, A. A. Bulatov. Excess energy measurement for electric braking of trains in the JSC «Russian Railways» DC power supply system

## Mechanics of machines and robots

- 93 A. E. Pavlyukov, M. V. Zhuykov. Assessment of a strength of a driver's cabin frame in a freight locomotive during emergency collisions

## Research of young scientists

- 102 A. A. Korsun. Mathematical modeling of adaptive braking of a high-speed train with the disc type brake
- 111 S. V. Treskin. Classification of methods for fixing brake checks in the shoes of the brake lever transmission of freight cars

# Математические модели технологических процессов

УДК 656.2

Н. Ф. Сирина, А. Е. Колодин, П. С. Гончарь

## Математическая модель организации обслуживания и ремонта грузовых вагонов

UDK 656.2

N. F. Sirina, A. E. Kolodin, P. S. Gonchar

## Mathematical model of maintenance and repair processes for freight cars

### Аннотация

Стратегический бренд любой компании базируется на клиентоориентированности. От вагонной составляющей перевозочного процесса потребитель в каждый момент взаимоотношений ожидает удовлетворения потребностей в технически исправном подвижном составе. Своевременное качественное техническое обслуживание и ремонт грузовых вагонов гарантируют качество транспортных услуг. Исключение потерь в технологическом

процессе обслуживания подвижного состава значительно повышает конкурентоспособность железнодорожного транспорта и положительно сказывается на государственной экономической стабильности.

Оптимизация управляемости технологического комплекса технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов неизбежно повышает эффективность перевозочного процесса за счет системного подхода к организации работ, связанных

с сопровождением жизненного цикла подвижного состава. Применяемые для решения задач рациональной организации технологических процессов инструменты математического обеспечения, в том числе совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, позволяют значительно сузить поиск оптимального вывода и исключают излишние потери при актуализации технологии.

**Ключевые слова:** грузовой вагон, математическое

*Статья рекомендована к публикации В. В. Цыгановым, д-ром техн. наук, профессором, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук. E-mail: bbc@ipu.ru.*

**Нина Фридриховна Сирина**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Вагоны», проректор по учебной работе и связям с производством Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, Россия. E-mail: nsirina@usurt.ru. ORCID 0000-0001-9691-5181.

**Александр Евгеньевич Колодин**, главный инженер службы вагонного хозяйства Свердловской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД», Екатеринбург, Россия. E-mail: akolodin@mail.ru. ORCID 0000-0001-9985-5858.

**Петр Сергеевич Гончарь**, канд. пед. наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, Россия. E-mail: gonchar@usurt.ru. ORCID 0000-0002-2650-3429.

© Н. Ф. Сирина, А. Е. Колодин, П. С. Гончарь, 2024

*The article is recommended for publication by V. V. Tsyganov, DSc in Engineering, Professor, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. E-mail: bbc@ipu.ru.*

**Nina Fridrikhovna Sirina**, DSc in Engineering, Professor of Railway Cars Department, Vice-rector for academic affairs and production relations, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia. E-mail: nsirina@usurt.ru. ORCID 0000-0001-9691-5181.

**Alexander Evgenyevich Kolodin**, Chief Engineer of Carriage Service Division, Sverdlovsk Directorate of Infrastructure, JSC Russian Railways, Ekaterinburg, Russia. E-mail: akolodin@mail.ru. ORCID 0000-0001-9985-5858.

**Petr Sergeevich Gonchar**, PhD in Pedagogics, Associate Professor of Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia. E-mail: gonchar@usurt.ru. ORCID 0000-0002-2650-3429.

© N. F. Sirina, A. E. Kolodin, P. S. Gonchar, 2024

моделирование, графоаналитическая модель, марковская цепь, система уравнений Колмогорова, простой вагон, вероятность перехода

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-4-14

### Abstract

The strategic brand of any company is based on customer orientation. With regard to the carriage component of the transportation process, the consumer expects to meet the needs for technically sound rolling stock on constant basis. Timely high-quality maintenance and repair of freight

cars guarantee the quality of transport services. The elimination of losses in the technological process of rolling stock maintenance significantly increases the competitiveness of railway transport and has a positive effect on state economic stability.

The controllability optimization of the technological complex of freight cars maintenance and repair inevitably increases the efficiency of the transportation process due to a systematic approach to the organization of work related to the maintenance of the life cycle of rolling stock.

Mathematical support tools, including the complex of mathematical methods, models and algorithms applied to solve the problems of rational technological processes organization, and can significantly narrow the search for optimal output and eliminate unnecessary losses when updating technology.

**Keywords:** freight car, mathematic modeling, graphical-analytic model, Markov chain, Kolmogorov's system of equations, detention of car, transition probability

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-4-14

## 1. Введение

Грузовые вагоны в процессе эксплуатации расходуют технический ресурс и могут переходить из работоспособного состояния, пригодного к перевозке груза, в неработоспособное, требующее восстановления готовности под погрузку.

Оценка жизненного цикла грузового вагона [1, 2] в отсутствие моделей (аналитических, имитационных) организации технического обслуживания и ремонта (ТОиР) не позволяет комплексно оценивать последствия внеплановых ремонтов. Разнохарактерные факторы ТОиР грузовых вагонов, такие как причина отказа подвижной единицы, простой вагона в ожидании ремонта, вид ремонта (с заменой запасной части или ремонтом узла, с выкаткой из-под вагона и последующей подкаткой под этот же вагон), условия оплаты выполненных работ, транспортные расходы и пр., не могут служить ее предикторами. Из-за этого не представляется возможным получить точные прогнозные оценки жизненного цикла грузового вагона.

Актуальными остаются задачи организации технического обслуживания и ремонта в существующих условиях при помощи статистических методов с привлечением теории массового обслуживания, а также методов сетевого

планирования управления, основанных на теории графов. Модель организации ТОиР представляется как содержание парка грузовых вагонов в общих границах жизненного цикла [3, 4].

Математическое описание переходов из одного состояния вагона в другое позволяет не только оценить ситуацию в текущий момент, но и просчитать варианты возможных последствий при изменении входных данных. В качестве первого этапа решения задачи предлагается построение графоаналитической модели, позволяющей оценить изменения технического состояния подвижного состава в процессе эксплуатации. Следующий этап – создание модели жизненного цикла вагона в виде марковской цепи с непрерывным временем перехода в предположении о квазистационарном характере всех процессов.

Для численной конкретизации параметров модели использовались усредненные статистические данные о количестве вагонов в РЖД за 2023 г. Общее число вагонов  $N$  определено в соответствии с Результатами номерной переписи грузовых вагонов железнодорожных администраций 2023 г. (приложение № 59 к Протоколу 79-го заседания Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества). Определение среднего количества

вагонов, одновременно участвующих в выделенных элементарных процессах  $n_i$ , основано на статистических справках о среднесуточном наличии неисправных вагонов (по предприятиям) и о простоях, зафиксированных при возврате вагонов в исправный парк. При частичном определении переходных количеств вагонов использовались статистические справки об отцепленных вагонах, направленных в разные виды ремонта и возвращенных в эксплуатацию после ремонта. Вероятности состояний  $p_i$  безразмерны, средние сроки существования состояний  $t_{срi}$  выражены в сутках, а интенсивности переходов марковской цепи  $\lambda_{ij}$  оказалось удобнее выразить в единицах, обратных годам.

## 2. Концептуальная модель жизненного цикла вагона

В период от выпуска нового грузового вагона с предприятия-изготовителя до утилизации он многократно подвергается диагностическим процедурам, внеплановым ремонтам без отцепки от поезда или с отцепкой, регулярным плановым ремонтам, а также, возможно, нетиповым «прочим» ремонтам. Даже при исключении из инвентарного парка вагоны некоторых дефицитных типов могут быть возвращены в него после восстановительного ремонта и номинального продления разрешенного срока для продолжения эксплуатации.

Находясь в числе нерабочего парка, вагон не всегда проходит то обслуживание или ремонт, которые были назначены предварительным решением. Его технический статус в виде назначенного ремонта может быть изменен при проведении подготовительных работ, а именно дефектации или диагностических обследований, после которых вступают в действие процедурные регламенты, соответствующие новому статусу, по объему ремонта, проводятся переговоры с собственником о месте проведения требуемых работ, способах замены запасных частей и т. д. Возможные изменения статуса вагона

показаны на рис. 1 в виде ориентированного графа, где вершины соответствуют возможному техническому статусу (виду технического обслуживания и ремонта) вагона, а дуги – возможным изменениям статуса. Пунктирные дуги соответствуют относительно редким (до 10 % случаев реализаций исходного состояния) переходам.

Главная особенность схемы – отсутствие большинства переходов, «облегчающих» статус неисправного вагона: вместо предварительно назначенного внепланового ремонта по регламенту ТР-1 (в минимальном объеме за 1,5 ч) может быть назначен ремонт в объеме ТР-2, или плановый (связанный со сроком эксплуатации вагона или исполненным пробегом) ремонт в депо, или капитальный ремонт, но не наоборот. В исправный парк вагон возвращается только после проведения соответствующих регламентных ремонтных работ либо после «прочих» ремонтных работ. На рис. 1 не показано кратковременное присвоение статуса «прочие ремонт», через который происходит взаимное изменение других статусов технического состояния вагона.

## 3. Простейшая модель ТОиР

Так как число вагонов в эксплуатируемом РЖД парке велико, но практически неизменно, а каждый вагон в течение одного года (часто неоднократно) требует ремонтных работ, все переходы, показанные на рис. 1, наблюдаются в статистически значимых количествах, что позволяет поставить задачу о построении марковской цепи (с непрерывным временем перехода между состояниями) со свойствами, в наибольшей степени соответствующими существующей модели ТОиР. В перспективе будет разработан инструмент для прогноза системных эффектов в ТОиР, заметных при внесении локальных изменений в полученную марковскую цепь.

Для построения модели из рассмотренного исключаются процессы технического обслуживания вагонов без

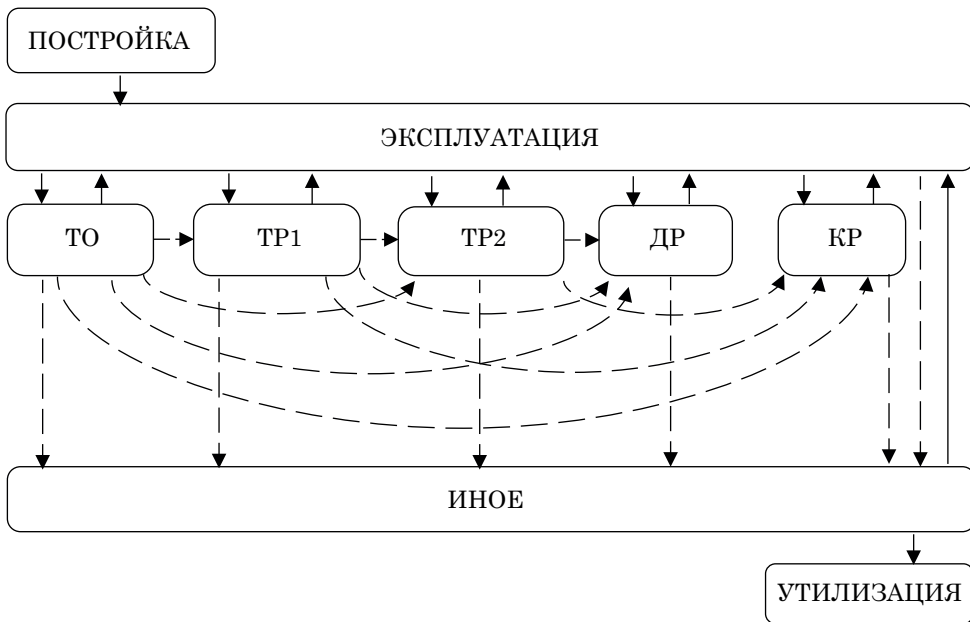


Рис. 1. Концептуальная модель жизненного цикла грузового вагона:

ПОСТРОЙКА – новый вагон с постройки, вводимый в парк; ЭКСПЛУАТАЦИЯ – исправное работоспособное техническое состояние (вагон готов к перевозке груза); ТО – неисправное работоспособное техническое состояние (вагон готов к перевозке груза, имеет неисправность, устраняемую при техническом обслуживании на ПТО без отцепки от состава) и (или) непосредственное выполнение этих работ; ТР1 – неработоспособное, восстанавливаемое при ТР1 техническое состояние (вагон к перевозке не годен, требует текущего отцепочного ремонта в минимальном объеме ТР1) и (или) непосредственное выполнение этих работ;

ТР2 – неработоспособное, восстанавливаемое при ТР2 техническое состояние (вагон к перевозке не годен, требует текущего отцепочного ремонта в объеме ТР2) и (или) непосредственное выполнение этих работ; ДР – вагон требует планового ремонта в депо и (или) непосредственное выполнение этих работ; КР – вагон требует планового капитального ремонта и (или) непосредственное выполнение этих работ; ИНОЕ – прочие неисправности и (или) непосредственное выполнение нетиповых ремонтных работ (отцепленный под исключение из парка вагон, подчиняющийся хозяйственным решениям собственника);

УТИЛИЗАЦИЯ – окончание жизненного цикла вагона

разгрузки и отцепки от состава, которые производятся с задержкой поезда в пределах часа, так как вероятность обнаружить случайно выбранный вагон в таком состоянии чрезвычайно мала (возможно, этот процесс может быть отдельно рассмотрен с помощью аппарата теории очередей). Также из рассмотрения фактически исключается незначительное статусное состояние постройки вагона и его утилизации: для нахождения нетривиального финального распределения вероятностей состояний марковской цепи, совпадающих

со стационарным, принципиальна регулярность этой цепи; далее везде будем считать, что утилизируемый вагон заменяется на новый. Для построения модели использованы статистические данные за 2023 г. о количестве вагонов в эксплуатируемом парке РЖД, о среднесуточном числе отцепленных вагонов (по видам типовых ремонтов), о количестве отцепленных и включенных в эксплуатацию вагонов с фиксацией их простоя.

Модель организации ТОиР как марковская цепь из двух состояний



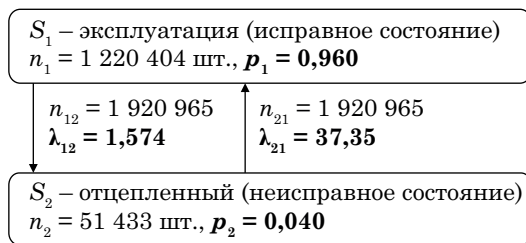


Рис. 2. Простейшая модель функционирования системы ТОиР грузового вагона

показана на рис. 2. Статистические данные позволяют определить число вагонов, причастных (в среднем) к обоим процессам, и вероятности обоих состояний; переходные количества событий соответствуют полному числу отцепок в ремонт за год. Для нахождения интенсивностей использованы отношения переходных количеств вагонов (т. е. в обоих случаях количеств отцепок) к количеству вагонов в генерирующем (исходном) состоянии, а обратное отношение интерпретируется как среднее время в исправном состоянии или соответственно как средний простой вагона в отцепленном состоянии.

*Характеристики модели:*

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -1,574 & 1,574 \\ 37,35 & -37,35 \end{pmatrix};$$

$$P = \begin{pmatrix} 0,960 \\ 0,040 \end{pmatrix}; t_{cp}(\text{сут}) = \begin{pmatrix} 231 \\ 9,7 \end{pmatrix}.$$

*Промежуточные выводы*

1. Использованный способ определения интенсивностей автоматически приводит к справедливости всех уравнений системы уравнений Колмогорова при замене величин теми выражениями, с помощью которых они определены:

$$\begin{cases} \lambda_{11}p_1 + \lambda_{21}p_2 = 0 \\ \lambda_{12}p_1 + \lambda_{22}p_2 = 0 \sim \\ p_1 + p_2 = 1 \end{cases}$$

$$\sim \begin{cases} \left( -\frac{n_{12}}{n_1} \right) \cdot \frac{n_1}{N} + \frac{n_{21}}{n_2} \cdot \frac{n_2}{N} = 0 \\ \frac{n_{12}}{n_1} \cdot \frac{n_1}{N} + \left( -\frac{n_{21}}{n_2} \right) \cdot \frac{n_2}{N} = 0 \\ \frac{N - n_2}{N} + \frac{n_2}{N} = 1. \end{cases}$$

2. Сама система уравнений Колмогорова в применении к решаемой задаче не обладает большим эвристическим потенциалом из-за однородности и вырожденности основной части, но здесь и в дальнейшем продуктивно использована для проверки результатов как по справедливости каждого отдельного уравнения, так и по совокупному воспроизведению (с машинной точностью) вероятностей всех состояний исходя из значений матрицы интенсивностей.

3. Среднее время простоя, определенное по отношению количества простаивающих вагонов к количеству отцепленных (и потом введенных в эксплуатацию) за год вагонов  $t_{2cp} = 97$  сут, неплохо соответствует средним простоям вагонов, зафиксированным при их вводе в эксплуатацию:  $t_{TP1} = 1,51$  сут,  $t_{TP2} = 5,54$  сут,  $t_{ДР} = 11,4$  сут,  $t_{КР} = 13,7$  сут. С учетом числа вагонов, проходящих разные виды ремонта, зафиксированный при вводе в эксплуатацию с типовых внеплановых и плановых ремонтов средний простой составляет  $t_p = 6,0$  сут, что тоже позволяет считать (с учетом простоты модели при фактическом многообразии описываемых процессов) совпадение свойств модели со статистическими данными о ТОиР достойным.

#### 4. Раздельный учет внеплановых, плановых и иных процессов

Развитие модели ТОиР заключается в рассмотрении различных процессов, проиллюстрированных на рис. 3. Определение среднего количества вагонов, одновременно занятых в этих процессах, и вероятностей соответствующих состояний возможно непосредственно по статистическим данным. Также

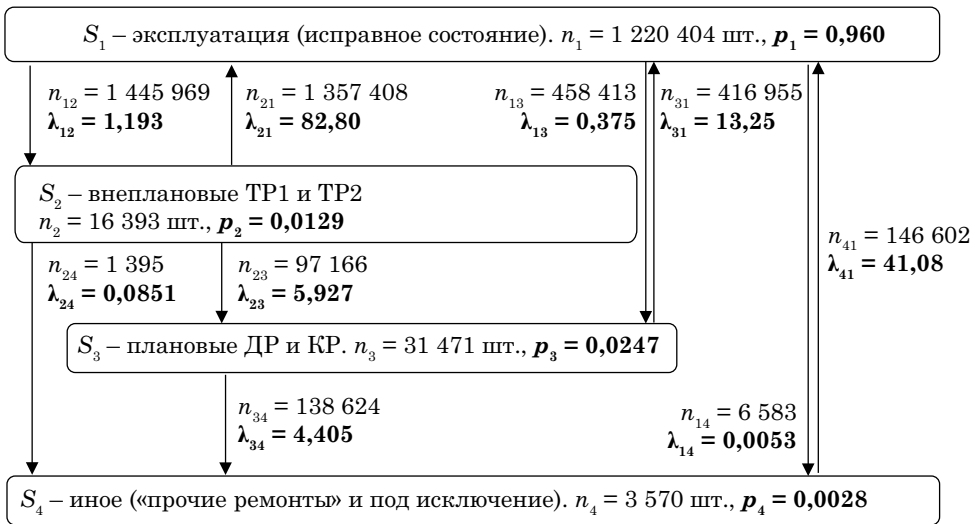


Рис. 3. Модель системы ТОиР с разделным учетом внеплановых и плановых ремонтов

большую пользу приносят статистические данные о предварительных решениях, т. е. о назначениях в каждый вид ремонта, принимаемых при выводе вагона из эксплуатации, и о количестве вагонов, введенных в эксплуатацию после ремонтов каждого вида, что позволяет надежно определить переходные количества вагонов за год и вероятности этих переходов. Проблемным местом оказывается только разделение потока вагонов, направленных во внеплановые ремонты ТР1 и ТР2, но не прошедших эти процедуры, а определенных в плановые ремонты ДР или КР или в «прочие» ремонты, а иногда «под исключение» в связи с обнаружением достаточных для этого условий уже после отцепления, например, на этапе диагностики (дефектации) в вагоноремонтном предприятии. Суммарное число таких вагонов за год и суммарную вероятность этого исхода можно определить по разнице между количеством направленных в текущие ремонты и количеством введенных из текущих ремонтов в эксплуатацию вагонов, но, для того чтобы установить, как это количество распределилось между дальнейшими состояниями, понадобилось дополнительное предположение.

Рассмотрены различные способы разделения указанного потока – от полного направления всех перебракованных вагонов в плановые ремонты до полного направления в иные процессы – без принципиальной разницы в общих итогах. Наиболее разумным представляется сохранение в этом перераспределении пропорции, характерной для первичного направления вагонов в плановый или в «прочие» ремонты. После этого по отношению переходных количеств вагонов к средним количествам, одновременно занятым в процессах, были определены все интенсивности переходов. Результат успешно прошел проверку на соответствие системе уравнений Колмогорова по отдельным уравнениям и воспроизводству всех нужных вероятностей.

*Характеристики модели:*

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -1,574 & 1,193 & 0,375 & 0,0053 \\ 82,80 & -88,82 & 5,927 & 0,0851 \\ 13,25 & 0 & -17,65 & 4,405 \\ 41,08 & 0 & 0 & -41,08 \end{pmatrix};$$

$$P = \begin{pmatrix} 0,960 \\ 0,00129 \\ 0,0247 \\ 0,0028 \end{pmatrix}; t_{cp}(\text{сут}) = \begin{pmatrix} 231 \\ 4,04 \\ 20,7 \\ 8,89 \end{pmatrix}.$$

*Промежуточные выводы.* Среднее время (простой вагонов), связанное с прохождением процедур внеплановых ремонтов ТР1 и ТР2, чрезвычайно хорошо совпало со статистическими данными о таких простоях, зафиксированными при вводе вагонов в эксплуатацию после указанных процедур, и это можно считать достижением. Однако плановые ремонты ДР и КР, согласно тем же статистическим данным, сопровождаются средними простоями в размере 12,0 сут, что меньше расчетных значений. Для систем массового обслуживания часто характерны лучшие показатели работы по сравнению с расчетными [5], а возможно, что в статистике простоев при введении вагона в эксплуатацию после плановых ремонтов имеются искажающие дефекты или «ошибка выжившего» в связи с исключением из этой статистики тех вагонов, которые перебраковываются в «прочие» ремонты.

находящихся в этих процессах вагонов  $n_3 - n_6$ . Вагоны, одновременно находящиеся в процессе (независимо от того, сменяются ли они), представляют суммарный простой за некоторый срок наблюдения, численно равный их количеству, если простой и срок наблюдения выражены в одинаковых единицах времени. Переходные количества вагонов за год надежно определяются прямо по статистическим данным, что в итоге позволяет находить интенсивности всех переходов по отношению переходных количеств вагонов к их количествам, одновременно находящимся в соответствующих исходных состояниях. Результат, прошедший проверку на соответствие системе уравнений Колмогорова по отдельным уравнениям и воспроизведению всех нужных вероятностей, представлен на рис. 4.

**5. Состояния непосредственного ремонта**

На основании статистических данных о суммарных простоях вагонов, зафиксированных при непосредственных ремонтах разного вида, оценивается среднее количество одновременно

*Характеристики модели:*

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -1,574 & 1,574 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2,995 & -38,318 & 825 & 18,18 & 6,331 & 1,974 \\ 7140 & 0 & -7140 & 0 & 0 & 0 \\ 1399 & 0 & 0 & -1399 & 0 & 0 \\ 895,1 & 0 & 0 & 0 & -895,1 & 0 \\ 469,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & -469,9 \end{pmatrix};$$



Рис. 4. Модель системы ТОиР грузового вагона с выделением состояний непосредственного проведения работ

$$P = \begin{pmatrix} 0,960 \\ 0,0394 \\ 0,00005 \\ 0,00051 \\ 0,00027 \\ 0,00017 \end{pmatrix}; t_{cp}(\text{сут}) = \begin{pmatrix} 231 \\ 9,5 \\ 0,05 \\ 0,26 \\ 0,41 \\ 0,78 \end{pmatrix}.$$

*Промежуточные выводы*

1. Среднее время непосредственно проводимых с вагоном работ невелико по сравнению с полным простоем, связанным в основном с транспортировкой вагона в ремонтное предприятие и ожиданием в очереди на обслуживание.

2. Среднее время проведения плановых ремонтных работ сравнимо с продолжительностью рабочего дня, что должно негативно сказываться на равномерности этих процессов.

3. Внеплановый текущий ремонт имеет чрезвычайно малую продолжи-

тельность (работы по ТР1 занимают около 1,5 ч) даже по сравнению с простоями в других процессах и характеризуется небольшой вероятностью состояния.

**6. Комбинированная модель**

При рассмотрении плановых ремонтов блоки, связанные с ДР и КР, используются в модели с выделенными плановыми ремонтами, с корректировкой количества вагонов, находящихся в этом состоянии  $n_3$  (рис. 5).

*Характеристики модели:*

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -1,574 & 1,193 & 0,375 & 0,0053 & 0 & 0 \\ 82,80 & -88,82 & 5,927 & 0,0851 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -17,96 & 4,49 & 10,27 & 3,204 \\ 41,08 & 0 & 0 & -41,08 & 0 & 0 \\ 895,1 & 0 & 0 & 0 & -895,1 & 0 \\ 469,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & -469,9 \end{pmatrix};$$

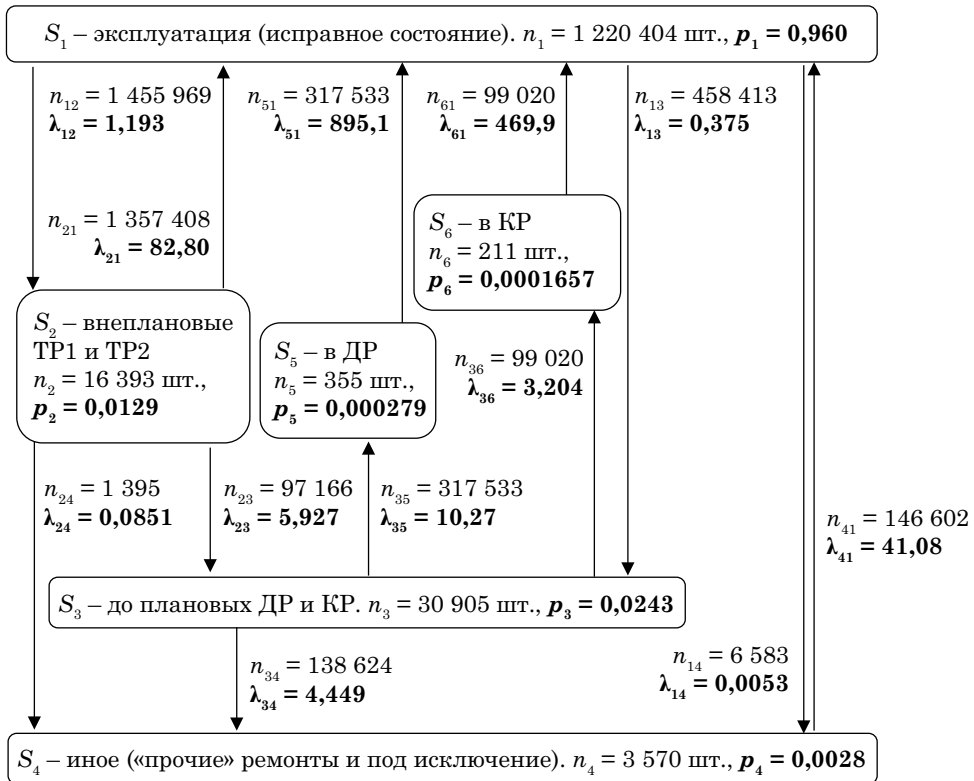


Рис. 5. Комбинированная модель системы ТООР грузового вагона

$$P = \begin{pmatrix} 0,960 \\ 0,00129 \\ 0,0243 \\ 0,0028 \\ 0,00028 \\ 0,00017 \end{pmatrix}; t_{\text{cp}}(\text{сут}) = \begin{pmatrix} 231 \\ 4,04 \\ 20,3 \\ 8,89 \\ 0,41 \\ 0,78 \end{pmatrix}.$$

*Промежуточные выводы.* Оценка среднего простоя вагона, связанного с плановыми ремонтами, после учета тех вагонов, которые находятся непосредственно на ремонтных позициях, практически не изменилась и (с учетом количества вагонов, прошедших эти ремонты за 2023 г.) составляет 20,8 сут для вагонов, возвращающихся в эксплуатацию.

### Выводы

Математическое описание жизненного цикла грузового подвижного состава с использованием формального определения марковского процесса [6] позволило визуализировать процессы перехода вагона из одного состояния в другое. В силу того что процесс технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов обладает специфическим марковским свойством, его можно задать частными характеристиками – переходными вероятностями из одного состояния в другое. Путем изменения этих значений либо путем изменения конфигурации в комбинированной модели системы ТОиР грузового вагона появляется возможность решить последующие задачи различной степени сложности и обеспечивается многообразие применяемых технологических процессов с множеством элементов модели – и отдельных составных частей, и различных вариантов функциональных и структурных связей, а также зависимостей между ними. Именно вариативность связей и качество заданных параметров позволяют получить оптимально сбалансированную модель [7, 8].

В работах по организации и управлению ТОР подвижного состава делается акцент на реализации математических методов. Широкое применение статистических методов с привлечением математического аппарата теории массового обслуживания, теории случайных процессов, в том числе по расположению вагоноремонтных мощностей на полигоне российских железных дорог, отражены в работах В. В. Цыганова, Н. Ф. Сириной, М. М. Болотина, П. А. Устича, Г. В. Райкова [9–13]. В настоящее время инструменты планирования остаются статическими [14, 15], не учитывающими динамическую информацию в процессе жизненного цикла подвижного состава. Средства планирования в основном представляют собой выдержки из нормативно-технической документации по организации технического обслуживания и ремонта грузового вагона [16–18].

Графоаналитический подход визуализации технического состояния грузового вагона позволяет оценивать эффективность реализации производственных возможностей предприятий вагонного комплекса при организации технического обслуживания и ремонта вагонов, дает возможность рационально планировать и формировать процессную схему сопровождения технического состояния подвижного состава на всем протяжении жизненного цикла. Использование математических методов при разработке модели организации ТОиР позволяет оценивать возможную оптимизацию затрат на эксплуатацию грузовых вагонов, в том числе за счет рациональной территориальной организации предприятий вагонного комплекса с учетом загруженности производственных мощностей структурных подразделений на полигоне сети железных дорог Российской Федерации, а также управлять ресурсами предприятий в различных заданных горизонтах планирования. ■

**Литература**

1. О регламенте определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта : распоряжение ОАО «Российские железные дороги» от 17.03.2008 г. № 509р. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902110528> (дата обращения: 20.10.2023).
2. Шикина Д. И. Оптимизация нормативного срока службы и системы технического обслуживания и ремонта вагона с учетом качества его ремонтов (на примере полувагона) : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2012.
3. Берж К. Теория графов и ее применения. Москва : Иностранная литература, 1962. 319 с.
4. Сай В. М., Громов И. Д., Чернушевич Т. К. Оценка рисков взаимодействия в организационных сетевых структурах // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 9–13. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-9-13.
5. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. Москва : Наука, 1988. 208 с.
6. Пирогова И. Н., Скачков П. П. Математические модели. Екатеринбург : УрГУПС, 2009. 44 с.
7. Гурский Е. П. Совершенствование технического обслуживания грузовых вагонов на основе вероятностного анализа их отказов // Механика. Исследования и инновации. 2014. № 10. С. 48–54. ISSN 2519-8742.
8. Белов И. В. Математические методы в планировании на железнодорожном транспорте. Москва : Транспорт, 1972. 248 с.
9. Сирина Н. Ф., Цыганов В. В. Адаптивные механизмы оценки и классификации дальновидных систем // Проблемы управления. 2006. № 6. С. 93–95. ISSN 2782-2427.
10. Болотин М. М., Осинский Л. Л. Автоматизация производственных процессов при изготовлении и ремонте вагонов. Москва : Транспорт, 1989. 206 с.
11. Устич П. А., Иванов А. А., Митюхин В. Б. Концепция интеллектуального управления // Мир транспорта. 2008. Т. 6. № 3 (23). С. 4–11. ISSN 1992-3252.
12. Управление транспортом на основе математического управления / П. А. Устич, А. А. Иванов, В. Г. Мышков, П. И. Садчиков // Железнодорожный транспорт. 2008. № 7. С. 39–42. ISSN 0044-4448.
13. Райков Г. В., Мартынюк Н. Г., Телишевская В. Я. Концепция автоматизированной системы управления вагонным хозяйством. Москва : ЦНИИТЭИ, 2003. 86 с.
14. Буткин М. Г. Комплексная оценка технического состояния грузовых вагонов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2000. 214 с.
15. Козлов П. А., Осокин О. В., Тушин Н. А. Организационные подходы и модели оптимизации // Мир транспорта. 2011. Т. 9. № 5 (38). С. 18–23. ISSN 1992-3252.
16. Мамаев Э. А. Моделирование региональных транспортных систем в условиях конкуренции : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2006. 348 с.
17. Михалевич В. С., Трубин В. А., Шор Н. З. Оптимизационные задачи производственно-транспортного планирования. Москва : Наука, 1986. 260 с.
18. Персиянов В. А., Скалов К. Ю., Усков Н. С. Моделирование транспортных систем. Москва : Транспорт, 1972. 208 с.

**References**

1. On the regulations for determining the cost of the life cycle and the limit price of rolling stock and complex technical systems of railway transport : the Order of JSC «RZD» dated 17.03.2008 No. 509r. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902110528> (access date: 20.10.2023). (In Russian).
2. Shikina D. I. Optimization of the standard service life and the car maintenance and repair system, taking into account the quality of its repairs (using the example of a gondola car) : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2012. (In Russian).
3. Berge C. The theory of graphs and its application. Moscow : Foreign literature, 1962. 319 p. (In Russian).

4. Say V. M., Gromov I. D., Chernushevich T. K. Risk assessment of interaction in network organizational structures. *Transport of the Urals*. 2016. No. 3 (50). Pp. 9–13. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-9-13. (In Russian).
5. Ventsel E. S. Operations research: tasks, principles, methodology. Moscow : Science, 1988. 208 p. (In Russian).
6. Pirogova I. N., Skachkov P. P. Mathematical models. Ekaterinburg : USURT, 2009. 44 p. (In Russian).
7. Gurskiy E. P. Improving the maintenance of freight cars based on the probabilistic analysis of their failures. *Mechanics. Investigations and Innovations*. 2014. No. 10. Pp. 48–54. ISSN 2519-8742. (In Russian).
8. Belov I. V. Mathematical methods in railway transport planning. Moscow : Transport, 1972. 248 p. (In Russian).
9. Sirina N. F., Tsyganov V. V. Adaptive mechanisms for evaluating and classifying forward-looking systems. *Control Sciences*. 2006. No. 6. Pp. 93–95. ISSN 2782-2427. (In Russian).
10. Bolotin M. M., Osinovskiy L. L. Automation of production processes in the manufacture and repair of cars. Moscow : Transport, 1989. 206 p. (In Russian).
11. Ustich P. A., Ivanov A. A., Mityukhin V. B. Concept of intellectual management. *World of Transport and Transportation*. 2008. Vol. 6. No. 3 (23). Pp. 4–11. ISSN 1992-3252. (In Russian).
12. Ustich P. A., Ivanov A. A., Myshkov V. G., Sadchikov P. I. Transport management based on mathematical management. *Railway Transport*. 2008. No. 7. Pp. 39–42. ISSN 0044-4448. (In Russian).
13. Raykov G. V., Martynyuk N. G., Telishevskaya V. Ya. The concept of automated cars equipment management system. Moscow : Central Research Institute of Information and Technical and Economic Research, 2003. 86 p. (In Russian).
14. Butkin M. G. Comprehensive assessment of the technical condition of freight cars : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2000. 214 p. (In Russian).
15. Kozlov P. A., Osokin O. V., Tushin N. A. Organizational approach and optimization models. *World of Transport and Transportation*. 2011. Vol. 9. No. 5 (38). Pp. 18–23. ISSN 1992-3252. (In Russian).
16. Mamaev E. A. Modeling of regional transport systems in a competitive environment : DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2006. 348 p. (In Russian).
17. Mikhalevich V. S., Trubin V. A., Shor N. Z. Optimization tasks of production and transport planning. Moscow : Science, 1986. 260 p. (In Russian).
18. Persianov V. A., Skalov K. Yu., Uskov N. S. Modeling of transport systems. Moscow : Transport, 1972. 208 p. (In Russian).

*Статья сдана в редакцию 3 июня 2024 года*

В. Н. Коваленко

## Способ минимизации числа состояний недоопределенного конечного автомата

V. N. Kovalenko

## The method of minimization of the number of undetermined finite-state machine

### Аннотация

Минимизация числа внутренних состояний конечного автомата связана с сокращением числа элементов памяти и числа элементов логического преобразователя, что позволяет повысить надежность работы конечного автомата. Эта задача решается на этапе абстрактного синтеза конечного автомата.

В статье представлен способ минимизации конечного автомата с использованием подмножества простых множеств совместимых состояний (МСС) множества максимально совместимых МСС множества  $W_{co}$ . Подмножество простых МСС сокращается с помощью предложенных правил. На следующем этапе при построении минимальной правильной группировки используются индексы и взаимные индексы покрытия и замыкания для выбора минимального замкнутого покрытия исходного автомата. На основе полученных множеств совместимых состояний правильной группировки строится совмещенная таблица переходов и выходов, задающая конечный автомат, эквивалентный исходному.

**Ключевые слова:** кортеж, множество, цепь, покрытие, замыкание, совместимые состояния, максимальные множества совместимых состояний, минимизация, индексы покрытия и замыкания, таблицы переходов и выходов, минимальная правильная группировка

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-15-22

### Abstract

Minimization of the number of inner states of the finite-state machine is related to the decrease of the number of memory elements and the number of logic converter elements which helps increase the safety of the finite-state machine work. This problem is solved at the stage of the abstract synthesis of the finite-state machine.

The article presents the method of minimization of the finite-state machine with the use of the subset of simple sets of compatible states (SCS) sets of most compatible SCS sets  $W_{co}$ . The subset of simple SCS is reduced due to suggested rules. While constructing the minimal proper grouping, the indexes and the mutual indexes of coverage and closure for the choice of the minimal closed coverage of the original machine are used at the next stage. A combined table of transitions and outputs which sets the finite machine equivalised to the original one is constructed on the basis of the received sets of compatible states of the proper grouping.

**Keywords:** cortege, set, chain, coverage, closure, compatible states, maximal sets of compatible states, minimization, coverage and closure indexes, tables of transitions and outputs, minimal proper grouping

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-15-22

Статья рекомендована к публикации Д. С. Завалишиным, канд. физ.-мат. наук, доцентом, Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: zavalishin@usurt.ru.

Владимир Николаевич Коваленко, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, Россия. E-mail: VKovalenko@usurt.ru. ORCID 0000-0002-3915-8708.

© В. Н. Коваленко, 2024

The article is recommended for publication by D. S. Zavalishchin, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Ural State University of Railway Transport. E-mail: zavalishin@usurt.ru.

Vladimir Nikolaevich Kovalenko, PhD in Engineering, Associate Professor of Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia. E-mail: VKovalenko@usurt.ru. ORCID 0000-0002-3915-8708.

© V. N. Kovalenko, 2024



## Введение

Известно, что конечные автоматы (КА) на уровне абстрактной теории задаются математической моделью абстрактного автомата, который определяется как шестикомпонентный кортеж (вектор), где  $s_i \in S$  – множество внутренних состояний;  $x_i \in X$  – входной алфавит;  $z_i \in Z$  – выходной алфавит;  $\delta: S \times X \rightarrow S$ , или  $\lambda(s_i, x_f)$ , – функция переходов;  $\lambda: S \times X \rightarrow Z$ , или  $\lambda(s_i, x_f)$ , – функция выходов;  $S_1$  – начальное состояние.

Суть минимизации конечного автомата – объединить состояния из некоторого множества совместимых состояний в одно состояние, что позволит уменьшить число элементов памяти, а следовательно, упростить процессы кодирования КА, которое производится на этапе структурного синтеза, и его реализации. Особенный интерес к минимизации внутреннего состояния (ВС) автомата возникает на следующем этапе структурного синтеза, на этапе кодирования ВС КА, для придания конечному автомату противогазочных и помехоустойчивых свойств, которые, как правило, связаны с введением дополнительных состояний в КА.

Для задания конечного автомата на уровне абстрактного синтеза используется несколько способов, наиболее распространенные из них – табличный (в виде таблиц переходов и таблиц выходов) и графический (в виде определенного графа) [1].

Цели решения задачи минимизации числа внутренних состояний КА и особенно интерес к ее математической постановке очевидны не только для нахождения минимального замкнутого покрытия, но и, например, для технической диагностики при построении минимальных тестов.

Один из наиболее сложных этапов синтеза конечного автомата – процесс минимизации, в общем случае представляющий собой комбинаторную задачу, значительный вклад в решение которой внесли М. Пол, С. Ангер, Е. Пийль,

В. Лазарев и ряд других отечественных и зарубежных ученых [2–6].

Вместе с тем, как отмечается в работе [4], несмотря на инвариантность методов решения этого этапа минимизации, простого алгоритмизируемого способа пока не разработано.

### Способ минимизации числа внутренних состояний конечного автомата, заданного недоопределенной таблицей переходов и выходов

После выполнения первого этапа абстрактного синтеза и получения математической модели в виде таблиц переходов (ТП) и выходов (ТВ), либо в виде графа переходов и выходов, либо в виде регулярного выражения встает вопрос о минимизации ее внутренних состояний. В таком случае, как предлагается в данной статье, математическая модель задается в виде ТП и ТВ, и анализируется ее работоспособность, например, с помощью графа переходов и выходов.

Для реализации процесса минимизации определяются внутренние состояния  $s_i$  и  $s_j$ , которые могут быть объединены в одно ВС. При этом необходимо, чтобы соблюдались следующие условия: два состояния  $S_i$  и  $S_j$  будут совместимы, если для всех состояний входов  $x_f \in X$  выходные состояния определены и равны, т. е.  $\lambda(s_i, x_f) = \lambda(s_j, x_f)$ ; или одно выходное состояние определено, а другое не определено; или порождаемые ими ВС  $s_n$  и  $s_m$  тоже явно совместимы – в этом случае функции переходов равны, т. е.  $\delta(s_i, x_f) = \delta(s_j, x_f)$ . Поэтому бинарное отношение совместимости на множестве внутренних состояний  $S$  является рефлексивным и симметричным.

Алгоритм определения совместимых пар состояний конечного автомата рассмотрен в книге В. Лазарева и Е. Пийль [4] с помощью так называемой треугольной таблицы. А, например, в работе [7] анализируется алгоритм определения пар совместимых состояний КА, который не использует треугольной таблицы.

Для дальнейшего изложения введем ряд понятий, используемых в теории автоматов.

Классом (множеством) совместимости  $a$  называется множество ВС КА  $a \subseteq S$  ( $S$  – множество состояний автомата), в котором бинарному отношению совместимости удовлетворяют все пары состояний этого множества.

Множество, которое не является подмножеством любого другого множества совместимых состояний данного КА, называют максимальным множеством совместимых состояний (МСС).

Основой для большинства известных подходов к решению задачи минимизации числа внутренних состояний частичных (недоопределенных) конечных автоматов является метод, предложенный в работе [2]. В нем процесс определения минимального автомата включает в себя три этапа:

1) вычисляются все максимальные МСС;

2) находится минимальная правильная группировка (ПГ);

3) по полученной ПГ в виде таблицы переходов и таблицы выходов синтезируется минимизированная математическая модель, что служит основой для следующего этапа кодирования.

В работе [3], а также в ряде работ других авторов рассмотрен первый этап минимизации числа ВС конечного автомата. Он предусматривает нахождение максимальных МСС и определение полного множества МСС  $W_{co}$  или минимизированного множества  $W_c$ , которые используются для получения минимальной ПГ. Самый трудоемкий этап в минимизации конечного автомата – процесс построения минимальной (минимизированной) ПГ по найденному множеству  $W_{co} (W_c)$ .

Несмотря на то что предложено много вариантов решения этого этапа, простого алгоритмизируемого метода до сих пор не создано [4]. В работе [5] доказано, что для поиска минимальной ПГ достаточно рассматривать лишь одно подмножество множества  $W_{co}$  – подмножество простых МСС. Простым МСС

называется такое, которое не исключается никаким другим МСС.

Логические условия, которые используются при определении простых МСС, приведены далее. Введем обозначения для изложения этих логических условий:

$O_a$ , т. е. множество МСС  $a$ , назовем образующим, если выполняются логические условия

$$O_a = \{(s_i, s_j) \mid s_i = \delta(x_f, s_k), \\ s_j = \delta(x_f, s_m), x_f \in X, s_k, s_m \in a\};$$

$r(O_a)$  – мощность множества  $O_a$ , т. е. число его элементов.

Таким образом, для множеств совместимых состояний, которые вошли в множество  $W_{co} (W_c)$ , определяются образующие и производится их минимизация по следующим логическим условиям.

Условие 1. Множество  $b$  можно исключить из  $W_{co} (W_c)$  при выполнении таких логических условий:  $b \subset a$  и обе МСС не имеют образующих, если МСС  $a, b \in W_{co} (W_c)$ .

Условие 2. Множество  $b$  можно исключить из  $W_{co} (W_c)$ , если выполняются логические условия  $b \subset a$  и  $r(O_a) = r(O_b)$ , при этом  $O_a = O_b$ , если МСС  $a, b \in W_{co} (W_c)$ .

Условие 3. Множество  $b$  можно исключить из  $W_{co} (W_c)$  при выполнении следующих логических условий:  $b \subset a$  и  $\exists O_{b_i} \subset a, O_{b_i} = O_a, O_b = \{O_{b_1}, \dots, O_{b_j}, \dots, O_{b_k}\}$ ,  $r(O_a) \leq r(O_b)$ , если МСС  $a, b \in W_{co} (W_c)$ .

Затем строятся цепи для МСС, входящих в  $W_{co} (W_c)$ , с целью дальнейшей оптимизации множества  $W_{co} (W_c)$ .

Для этого предлагается ввести следующие обозначения:

$r(C_a)$  – число множеств в цепи  $C_a$ ;

$S(C_a)$  – множество состояний исходного  $s_i \in S$  автомата, каждое из которых входит хотя бы в одно МСС цепи  $C_a$ .

Условие 4. Множество  $b$  можно исключить из  $W_{co} (W_c)$  при выполнении следующих условий:  $b \subset a$  и  $r(O_a) \leq r(O_b)$ , если МСС  $a, b \in W_{co} (W_c)$ .

Условие 5. Множество  $b$  можно исключить из  $W_{co} (W_c)$  при выполнении следующих условий:  $S(C_b) \subseteq S(C_a)$  и  $r(O_a) \leq r(O_b)$ , если МСС  $a, b \in W_{co} (W_c)$ .

Обозначим через  $S(C_b/C_a)$  разность множеств  $C_b \setminus C_a = \{s_i \mid s_i \in C_b, s_i \notin C_a\}$  состояний исходного автомата, которые присутствуют только в цепи  $C_b$ , но не присутствуют в цепи  $C_a$ , а через  $r[S(C_b/C_a)]$  обозначим число таких состояний.

Условие 6. Множество  $b$  можно исключить из  $W_{co}$  ( $W_c$ ) при выполнении следующих условий:  $S(C_a) \subset S(C_b)$  и  $r[S(C_b/C_a)] \leq r(C_b) - r(C_a)$ , если МСС  $a, b \in W_{co}$  ( $W_c$ ).

Так, для асинхронного конечного автомата (АКА), заданного в табл. 1, минимизация по логическим условиям 1–4 и 6 позволяет уменьшить мощность множества  $W_{co}$  ( $W_c$ ) соответственно до 120(19), 68(17), 56(17), 27(16), 23(14), и 19(12) МСС.

При сокращении множества по правилам 1–5 из [5] было получено множество  $W_{co}^*$ , включающее 27 МСС.

Соответственно обозначим  $W_{con}$  и  $W_{cn}$  подмножество простых МСС множества  $W_{co}$  ( $W_c$ ). А уже на основе полученного подмножества простых МСС  $W_{con}$  ( $W_{cn}$ ) определим минимальную (минимизированную) ПГ.

После сокращения мощности множества  $W_{co}$  ( $W_c$ ) с использованием логических условий 1–6 полученное подмножество простых МСС будет включать 19 МСС, которые приведены в табл. 2.

Далее переходим к следующему этапу процедуры минимизации, т. е. к выбору МСС из сокращенного множества простых МСС, для формирования множества минимальной правильной группировки.

Введем следующие обозначения для реализации процедуры минимизации:  $r[S(C_i)]$  – количество различных состояний множества  $S(C_i)$ ;

$S(C_i \vee C_j)$  – множество различных состояний  $s_i \in S$  исходного автомата, каждое из которых присутствует хотя бы в одной из цепей  $C_i$  и  $C_j$ ;

$r[S(C_i \vee C_j)]$  – количество различных состояний  $s_i \in S$  множества  $S(C_i \vee C_j)$ ;

$r(C_i \vee C_j)$  – количество МСС цепей  $C_i$  и  $C_j$ .

Для дальнейшего изложения процесса минимизации введем ряд коэффициентов, которые характеризуют логические условия покрытия и замыкания.

Обозначим через  $q_i$  коэффициент покрытия и замыкания, который определяется как отношение числа состояний  $S_i$  множества  $S(C_i)$  к числу МСС цепи  $C_i$ :

$$q_i = \frac{r[S(C_i)]}{r(C_i)}. \quad (1)$$

Назовем  $q_{ij}$  взаимным коэффициентом покрытия и замыкания множеств  $i$  и  $j$ , который определяется как отношение

Таблица 1

Математическая модель асинхронного конечного автомата

$S$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	1,00	2	~
2	~	2,10	8
3	3,~ ~	~	4
4	1	5	4,11
5	6	5,~ ~	~
6	6,~ 1	2	~
7	3	7,~ ~	11
8	~	7	8,1~
9	9,0 ~	10	~
10	~	10,01	8
11	9	~	11,~ ~

Таблица 2

Перечень образующих, сокращенного подмножества простых МСС  $W_{con}$  и их цепи с коэффициентами покрытия и замыкания

№ п/п	Образующие МСС	Цепи	Коэффициент $q_i$
1	{1,2}	{1,2}	2/1
2	{1,3}	{1,3}	2/1
3	{1,3,4}	{1,3,4} → {2,5,6}	6/2
4	{1,2,3,4,8}	{1,2,3,4,8} → {2,5,6,7,8} → {2,3,5,6,8} → {8,11}	9/4
5	{1,2,7,8}	{1,2,7,8} → {1,3} → {8,9,11}	6/3
6	{3,6}	{3,6}	2/1
7	{2,5,6}	{2,5,6}	3/1
8	{2,3,5,6}	{2,3,5,6} → {4,8} → {5,7}	7/3
9	{5,7}	{5,7} → {3,6}	4/2
10	{2,5,6,7,8}	{2,5,6,7,8} → {2,3,6} → {2,8,11}	7/3
11	{8,11}	{8,11}	2/1
12	{2,7,8,11}	{2,7,8,11} → {3,9}	6/2
13	{5,10}	{5,10}	2/1
14	{3,9}	{3,9}	2/1
15	{9,10}	{9,10}	2/1
16	{3,9,10}	{3,9,10} → {4,8} → {5,7} → {3,6}	8/4
17	{5,7,8,10}	{5,7,8,10} → {2,3,6} → {8,11}	8/3
18	{9,11}	{9,11}	2/1
19	{7,8,9,10,11}	{7,8,9,10,11} → {3,9}	6/2

ние числа состояний МСС множества  $S(C_i \vee C_j)$  к числу МСС цепей  $C_i$  и  $C_j$ :

$$q_{ij} = \frac{r[S(C_i \vee C_j)]}{r(C_i \vee C_j)}. \quad (2)$$

Назовем  $q_{i,j,\dots,n}$  взаимным коэффициентом покрытия и замыкания МСС  $i,j,\dots,n$ , который определяется как отношение числа состояний  $S_i$  множества  $S(C_i \vee C_j \vee \dots \vee C_n)$  к числу МСС цепей  $C_i, C_j, \dots, C_n$ . Назовем его взаимным коэффициентом покрытия и замыкания МСС  $i,j,\dots,n$ , обозначим как  $q_{i,j,\dots,n}$ :

$$q_{i,j,\dots,n} = \frac{r[S(C_i \vee C_j \vee \dots \vee C_n)]}{r(C_i \vee C_j \vee \dots \vee C_n)}. \quad (3)$$

Коэффициенты покрытия и замыкания (ПЗ)  $q_i$  для МСС множества  $W_{con}$  приведены в табл. 2.

Приведем лемму из работы [3], утверждающую, что логические усло-

вия, при выполнении которых полученное множество  $W_i \subseteq W_{con} (W_{i,j,\dots,n} \subseteq W_{con})$ , включающее МСС  $i(i,j,\dots,n)$  и МСС цепи  $C_i(C_i, C_j, \dots, C_n)$ , является минимальной ПГ.

Лемма 1.

Множество  $W_i \subseteq W_{con} (W_{i,j,\dots,n} \subseteq W_{con})$ , включающее МСС  $i(i,j,\dots,n)$  и МСС цепи  $C_i(C_i, C_j, \dots, C_n)$ , является минимальной ПГ тогда и только тогда, когда:

1)  $W_i(W_{i,j,\dots,n})$  покрывает все состояния исходного конечного автомата;

2) имеет максимальное значение коэффициента ПЗ (взаимного коэффициента ПЗ)  $q_{i,\max}(q_{i,j,\dots,\max})$ .

Таким образом, полученное множество  $W(W_{i,j,\dots,n})$  является минимальной ПГ только в том случае, если оно удовлетворяет логическим условиям леммы 1.

Далее на основе множества  $W_j(W_{j,\dots,n})$  могут быть построены ТВ и ТП нового автомата таким образом, что если  $S_k \in i$ ,  $S_k \in S$ ;  $S'_i \leftrightarrow i$  и  $\lambda(S_k, x_f) \neq (\sim)$ ;  $x_f \in X$ , то  $\lambda(S_k, x_f) = \lambda(S'_{ik}, x_f)$ . Следующему состоянию новой ТП  $\delta(S'_i, x_f)$  соответствует МСС  $j = W_j(W_{j,\dots,n})$ , порожаемое МСС  $i$ -й исходной ТП, задающее конечный автомат.

Из определения коэффициента ПЗ (взаимного коэффициента ПЗ)  $q_i(q_{i,j,\dots,n})$  следует, что если  $W(W_{i,j,\dots,n})$  имеет  $q_{i\max}(q_{i,j,\dots,\max})$  и покрывает исходный конечный автомат, то оно является минимальной ПГ.

В соответствии с логическими условиями, изложенными в лемме 1, можно дать следующие определения для получения минимальной ПГ.

Определение 1. В минимальную ПГ включаются МСС  $i$  и  $j$ , а также МСС их цепей  $C_i$  и  $C_j$ , если и только если

$$\begin{aligned} q_{ij} &> q_{id} (\forall d \in W_{con}), \\ q_{i\dots d\dots p} &(\forall d, \dots, p \in W_{con}). \end{aligned} \quad (4)$$

Определение 2. МСС  $k$  и МСС его цепи включаются в минимальную ПГ в том случае, если и только если

$$q_{ijk} > q_{id} (\forall d, \dots, n \in W_{con}, d \neq k, n \neq k). \quad (5)$$

Построение минимальной ПГ начинается с выбора МСС, имеющих наибольшие значения коэффициента  $q_i$ . Выбор МСС, которые имеют максимальные значения взаимного коэффициента ПЗ, осуществляется из множества  $W_{con}$ , полученного на предыдущем этапе.

Согласно табл. 2, максимальные значения коэффициентов  $q_i$  имеют МСС  $\{1,3,4\}$ ,  $\{2,7,8,11\}$  и  $\{7,8,9,10,11\}$ , которые для упрощения соответственно обозначим как  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Для них определяются значения взаимных коэффициентов ПЗ  $q_{ab}$ ,  $q_{ac}$  и  $q_{bc}$ . На следующем шаге находятся значения взаимного коэффициента ПЗ МСС, включенных в множество  $W_i(W_{i,j,\dots,n})$  (включаются только МСС, имеющие максимальное значение взаимного коэффициента ПЗ), и МСС, которые включают состояния, не

вошедшие в МСС множества  $W_i(W_{i,j,\dots,n})$ . Этот процесс продолжается до тех пор, пока не выполнится условие покрытия, а МСС множества  $W_i(W_{i,j,\dots,n})$  не будут иметь максимальное значение взаимного коэффициента ПЗ, т. е. до тех пор, пока не выполняются условия определений 1 и 2.

Таким образом, в результате рекурсивного процесса последовательного включения МСС в множество  $W_i(W_{i,j,\dots,n})$  в соответствии с требованиями определения 2 получаем множество  $W_i(W_{i,j,\dots,n})$ , которое удовлетворяет условию покрытия и замыкания. Условия замыкания для полученного множества  $W_i(W_{i,j,\dots,n})$  выполняются автоматически, так как  $W_i(W_{i,j,\dots,n})$  включает все МСС цепей  $C_i, C_j, \dots, C_n$ .

Взаимные коэффициенты ПЗ для рассматриваемого примера будут соответственно равны  $q_{ab} = 10/4$ ,  $q_{ac} = 11/4$  и  $q_{bc} = 10/4$ , и в минимальную ПГ включаются множества  $a$  и  $c$ . Так как числитель взаимного коэффициента ПЗ  $q_{ac} = 11/4$ , равен числу состояний исходного конечного автомата, заданного по табл. 1, а значение коэффициента максимально, то множество  $W_{ac}$  согласно лемме 1, является минимальной ПГ.

По вычисленной минимальной ПГ  $\{1,3,4\} \rightarrow \{2,5,6\}$ ;  $\{7,8,9,10,11\} \rightarrow \{3,9\}$  на следующем этапе абстрактного синтеза строится автомат с четырьмя состояниями, т. е. синтезируется математическая модель минимального автомата в виде совмещенной ТП и ТВ.

Рассмотрим процесс синтеза математической модели минимизированного автомата по полученной минимальной (минимизированной) ПГ. Процесс получения (построения) нового автомата достаточно прост [3]: каждому МСС ПГ ставится в соответствие внутреннее состояние  $S'_i$  нового автомата. При этом каждому МСС ПГ присваивается определенный номер внутреннего состояния. Например, для МСС  $a$  и каждого состояния входа  $x_f \in X$  вычисляется множество следующих за МСС  $a$  состояний  $b_{af} = \delta(a, x_f)$ ,  $b_{af} \in b$ .

Таблица 3

Математическая модель минимального асинхронного автомата

$S'$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	1,00	2	1,11
2	2, ~1	2,10	3
3	4	3,01	3,1~
4	4,0~	3	1

При этом новые функции переходов и выходов определяются согласно логическим выражениям:

$$\delta'(S'_i, x_f) = \begin{cases} (\sim), & \text{если } b_{af} = \emptyset \\ S'_j, b_{af} \neq \emptyset, (S'_j \in B, b_{af} \subseteq B) \end{cases};$$

$$\lambda'(S'_i, x_f) = \begin{cases} \lambda(S'_i, x_f), & \text{если } \exists S_i \in a, \lambda(S_i, x_f) \neq (\sim) \\ (\sim) & \lambda(S_i, x_f) = (\sim) \end{cases}. \quad (6)$$

После определения новых функций переходов и выходов строится новый автомат. Новый автомат, построенный по минимальной ПГ  $\{1,3,4\} \rightarrow \{2,5,6\}$ ;  $\{7,8,9,10,11\} \rightarrow \{3,9\}$ , приведен в табл. 3, в которой множеству совместимых состояний  $\{1,3,4\}$  соответствует новое состояние минимизированного КА  $\{1\}$ ;  $\{2,5,6\} \rightarrow 2$ ;  $\{7,8,9,10,11\} \rightarrow 3$ ;  $\{3,9\} \rightarrow 4$ .

**Выводы**

В рамках выполненного исследования предложен способ минимизации числа внутренних состояний недоопределенного конечного автомата: нахождение совместимых внутренних состояний и построение на их основе

простых множеств совместимых внутренних состояний. Для простых МСС, полученных на этапе абстрактного синтеза сокращенного подмножества, определены цепи, порождаемые ими, и вычислены коэффициенты покрытия и замыкания. Предложен алгоритм построения минимальной правильной группировки: на первом шаге выбираются МСС, имеющие максимальное значение коэффициента покрытия и замыкания  $q_i$ , на следующем шаге определяются взаимные коэффициенты покрытия и замыкания  $q_{ij}$ , выбираются МСС, имеющие максимальное значение, и проверяется выполнение условия покрытия исходного автомата. ■

**Литература**

1. Баранов С. И. Синтез микропрограммных автоматов (граф-схемы и автоматы) : 2-е изд. Ленинград : Энергия, 1979. 232 с.
2. Ангер С. Асинхронные последовательностные схемы. Москва : Наука, 1977. 399 с.
3. Соколов В. И., Валиев Ш. К., Коваленко В. Н. Способ получения минимальной правильной группировки // Межвузовский сборник научных трудов УЭМИИТа. Свердловск, 1985. С. 108–112.
4. Лазарев В. Г., Пийль Е. И. Синтез управляющих автоматов : 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергия, 1978. 407 с.
5. Grusselly A., Luccuo F. A Method for Minimizing the Number of Internal State in Incompletely Specified Sequential Networks // IEEE Transactions on Electronic Computers. 1965. Vol. EC-14. Issue 3. Pp. 350–359. DOI: 10.1109/PGEC.1965.264140.
6. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Минимизация числа состояний частичного конечного автомата // Техническая кибернетика. 1976. № 4. С. 127–132.

7. Kella J. State Minimization of Incompletely Specified Sequential Machines // *IEEE Transactions on Computers*. 1970. Vol. C-19. No. 1. Pp. 342–348.

#### References

1. Baranov S. I. Synthesis of microprogramed machines (flow graphs and machins) : 2nd edition. Leningrad : Energy, 1979. 232 p. (In Russian).
2. Unger S. Asynchronous sequential switching circuits. Moscow : Science, 1977. 399 p. (In Russian).
3. Sokolov V. I., Valiev Sh. K., Kovalenko V. N. Method of receiving the minimal proper grouping. *Interuniversity collection of scientific papers UEMIT*. Sverdlovsk, 1985. Pp. 108–112. (In Russian).
4. Lazarev V. G., Piyl E. I. Synthesis of control machines : 2nd edition. Moscow : Energy, 1978. 407 p. (In Russian).
5. Grusselly A., Luccuo F. A Method for Minimizing the Number of Internal State in Incompletely Specified Sequential Networks. *IEEE Transactions on Electronic Computers*. 1965. Vol. EC-14. Issue 3. Pp. 350–359. DOI: 10.1109/PGEC.1965.264140.
6. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Minimization of the number of partial finite-state machine. *Technical Cybernetics*. 1976. No. 4. Pp. 127–132. (In Russian).
7. Kella J. State Minimization of Incompletely Specified Sequential Machines. *IEEE Transactions on Computers*. 1970. Vol. C-19. No. 1. Pp. 342–348.

*Статья сдана в редакцию 5 апреля 2024 года*

---

*Д. С. Завалищин*

## Задача управления мультиагентной транспортной системой

---

*D. S. Zavalishchin*

## Multi-agent transport system control problem

---

### Аннотация

Рассматривается новый класс задач управления некоторой транспортной системой. Особенность системы заключается в переменном количестве участников процесса управления. Перегруппировка участников вместе с их объединением и рассредоточением определяется заданными целевыми точками посещения, начальной точкой отправления и конечной точкой завершения движения системы, построенными траекториями. Структура мультиагентной транспортной системы подразумевает наличие основных и вспомогательных перевозчиков, причем первые могут осуществлять перевозку вторых на некоторых этапах. Именно в такие моменты число участников процесса управления изменяется. В построенной математической модели перемещений рассматриваемой системы и ее управления получена гибридная система дифференциальных уравнений с переключениями, содержащая непрерывную и дискретную составляющие. Решается задача нахождения оптимальных маршрутов при определенных ограничениях.

**Ключевые слова:** задачи управления, оптимизация, задача коммивояжера, задача маршрутизации, гибридная система

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-23-28

### Abstract

A new class of control problems for a certain transport system is considered. The peculiarity of the system is the variable number of participants in the control process. The regrouping of participants, along with their unification and dispersal, is determined by the specified target points of visit, the initial point of departure and the final point of completion of the system's movement, and the constructed trajectories. The structure of a multi-agent transport system implies the presence of primary and secondary carriers, with the former being able to transport the latter at some stages. It is at such moments that the number of participants in the control process changes. In the constructed mathematical model of the movements of the system under consideration and its control, a hybrid system of differential equations with switching is obtained, containing continuous and discrete components. The problem of finding optimal routes under certain constraints is solved.

**Keywords:** control problems, optimization, traveling salesman problem, routing problem, hybrid system

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-23-28

---

*Статья рекомендована к публикации А. Ф. Шориковым, д-ром физ.-мат. наук, профессором, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина.*

**Дмитрий Станиславович Завалищин**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения, с.н.с. Отдела оптимального управления Института математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: zavalishin@usurt.ru. ORCID 0000-0002-4117-8329.

© Д. С. Завалищин, 2024

*The article is recommended for publication by A. F. Shorikov, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin.*

**Dmitry Stanislavovich Zavalishchin**, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport, Senior Researcher of Optimal Control Department, N. N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of UB RAS, Ekaterinburg, Russia. E-mail: zavalishin@usurt.ru. ORCID 0000-0002-4117-8329.

© D. S. Zavalishchin, 2024



Постановки и решения задач, связанных с управлением динамическими объектами, традиционно требуют нетривиальных математических выкладок. С ростом мощности и производительности вычислительных систем, развитием прикладного программного обеспечения исследователи адаптируют классические методы и разрабатывают новые на основе учета современных возможностей компьютерной техники. Можно сказать, что тандем из математика и программиста постепенно соединяется в одного высококвалифицированного специалиста, которому посылны нерешаемые ранее аналитически задачи. А в области теории оптимального управления таких вырожденных, особых, сингулярных или нерегулярных задач немало. Если некоторые динамические управляемые объекты рассматривать в совокупности, например, как транспортную систему, то вопросы построения оптимального управления или решения задач оптимизации требуют специальных подходов.

Задачи группового управления движущимися объектами, в том числе вопросы их реконфигурации в процессе перемещений и обхода препятствий, рассматривались в [1, 2]. Там же исследовались задачи оптимального управления на этапе объединения движущихся объектов в виртуальный контейнер и восстановления первоначальной требуемой конфигурации. Вопросы, связанные с моделированием динамики групповых движений для самых разных приложений [3], весьма актуальны, особенно в управлении служб доставки, спрос на услуги которых в последние годы постоянно растет. В продолжение исследований [4–6], посвященных построению оптимальных траекторий для параллельных или распределенных доставок грузов некоторой транспортной системой, состоящей из основных и вспомогательных перевозчиков, в данной статье предлагается математическая формализация рассматриваемых оптимизационных задач. Постановки задач отчасти,

в плане обхода целевого множества точек, пересекаются с известной задачей коммивояжера. Например, в работе [7] исследуется выбор маршрута на базе модели смешанного целочисленного линейного программирования, предложен гибридный генетический алгоритм решения задачи коммивояжера. А в представленной статье оригинальными являются структура транспортной системы и ее изменяемая конфигурация. Совокупность полученных траекторий движения объектов соответствует решению поставленной оптимизационной задачи.

Для математической постановки задачи можно рассмотреть совокупность траекторий некоторой системы из  $n$  объектов,  $n = 2, \dots, N$ , возникающих в процессе их перемещения на плоскости из начальной точки  $S_0$  в конечную  $F_0$  с посещением заданной целевой точки  $G_1$  (рис. 1).

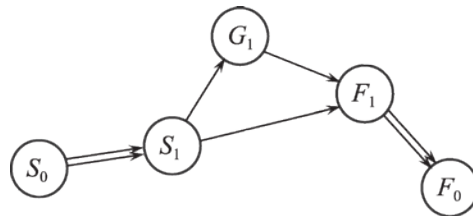


Рис. 1. Перемещения системы из двух объектов

В системе из  $n$  объектов один – основной, остальные  $n - 1$  объектов – вспомогательные. В минимальной конфигурации системы, если  $n = 2$ , один объект является основным и один вспомогательным. Именно такая конфигурация изображена на рис. 1. Перемещения системы происходят следующим образом. На первом этапе движения из начальной точки  $S_0$  основной перевозчик транспортирует вспомогательный до точки их разделения  $S_1$  (этот этап показан на рис. 1 двойными стрелками). Целевую точку  $G_1$  посещает только вспомогательный перевозчик. Точки  $S_1$  (отделение вспомогательного объекта от основного) и  $F_1$  (воссоединение основного и вспомогательного объектов)

определяются с учетом неравенства для расстояний  $D$  имеющегося ресурса  $C$ :

$$D(S_1, G_1) + D(G_1, F_1) \leq C_1. \quad (1)$$

Для основного объекта также можно ввести ограничение

$$D(S_0, S_1) + D(S_1, F_1) + D(F_1, F_0) \leq C_0. \quad (2)$$

При заданных точках  $S_0$ ,  $F_0$  и  $G_1$  координаты для точек  $S_1$  и  $F_1$  выбираются в соответствии с критерием минимума времени

$$t = \frac{D(S_0, S_1) + D(S_1, F_1) + D(F_1, F_0)}{V_0} \rightarrow \min \quad (3)$$

при ограничениях (1) и (2), где  $V_0$  – максимальная скорость основного объекта.

В конфигурации системы  $n = 3$ , где один объект основной, а два вспомогательных, допускается наличие двух целевых точек  $G_1$  и  $G_2$ . В этом случае задача оптимизации (3) может быть записана в виде

$$t = \frac{D(S_0, S_1) + D(S_1, S_2) + D(S_2, F_1)}{V_0} + \frac{D(F_1, F_2) + D(F_2, F_0)}{V_0} \rightarrow \min \quad (4)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} D(S_1, G_1) + D(G_1, F_1) &\leq C_1; \\ D(S_2, G_2) + D(G_2, F_2) &\leq C_2; \\ D(S_0, S_1) + D(S_1, S_2) + D(S_2, F_1) + \\ + D(F_1, F_2) + D(F_2, F_0) &\leq C_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Если говорить о динамике рассматриваемой совокупности объектов, то гибридная динамическая система будет содержать непрерывную и дискретную составляющие и описываться совокупностью дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, \dot{x}_1, u_1), & t \in [t_0, t_1], \\ \dot{x}_2 = f_2(x_2, \dot{x}_2, u_2), & t \in (t_1, t_2], \\ \dot{x}_3 = f_3(x_3, \dot{x}_3, u_3), & \end{cases} \quad (6)$$

где момент переключения  $t_1$  и положение системы  $x_1(t_1)$  неизвестны, а начальное положение  $x_1(t_0)$  задано. Целью управлений  $u_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , является попадание траекторий  $x_2(t)$  и  $x_3(t)$  в заданные точки  $x_2^*$  и  $x_3^*$  в момент  $t_2$ ,  $t_2 \leq T$ , с минимальными затратами.

Результаты моделирования перемещений описанной транспортной системы в конфигурации  $n = 3$  для обслуживания восьми целевых точек представлены на рис. 2. Эти точки (например,



Рис. 2. Перемещения системы из трех объектов



Рис. 3. Концепт транспортной системы доставки посылок

пункты доставок товаров) имеют синий или красный цвет: в первые доставка производится одним из двух вспомогательных транспортных средств, а вторые расположены на обозначенном красными стрелками маршруте основного транспорта. Белые точки фиксируют разделение и объединение транспорта.

Для моделирования и визуализации используется программное обеспечение [8]. Математическое обеспечение алгоритма включает в себя модифицированную задачу коммивояжера, элементы алгоритма ближайшего соседа Дейкстры [9], подходы к моделированию расщепления пассажиропотока по видам транспорта методом взвешенных групповых оценок [10]. Входные данные – адреса доставок, карта дорожной сети, количество, объем и вес каждого груза, характеристики транспорта по максимальной скорости, запасам и времени восстановления ресурса.

Выбор маршрутов основного и вспомогательных транспортных средств, включая позиционирование точек их разделения и объединения, – довольно сложная задача из-за множества ограничений и трудностей формализации. Концептуально же идея распределенных доставок грузов не нова.

Например, в последние годы активно обсуждается использование для доставки грузов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и дронов. В частности, их прототипы были успешно испытаны такими гигантами, как DHL [11] и Amazon [12], еще в 2014 и в 2020 гг. Дроны, применяемые для доставки (рис. 3), как правило, ограничены перевозкой только одного не слишком тяжелого груза за один раз. Кроме того, приходится учитывать время перезарядки или, как вариант, замены аккумуляторов.

В зависимости от концепции эксплуатации дронов обработка значительного количества грузов может потребовать увеличения числа носителей. Поэтому остается под вопросом, могут ли дроны способствовать доставке больших объемов посылок и снижению затрат. Но, с другой стороны, они работают на электричестве, причем работают автономно, к тому же беспрепятственное воздушное сообщение сравнительно быстрее. И, что особенно важно, практика доказала, что предлагаемая концепция является допустимой альтернативой для поставки грузов, особенно в критические времена, такие как пандемия. ■

**Литература**

1. Куржанский А. Б. О задаче группового управления в условиях препятствий // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2014. Т. 20. № 3. С. 166–179. ISSN 0134-4889.
2. Куржанский А. Б. Задача о нестолкновениях при групповом движении в условиях препятствий // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2015. Т. 21. № 2. С. 134–149. ISSN 0134-4889.
3. Niu M., Frost F., Milner J. E., Skarin A., Blackwell P. G. Modelling group movement with behaviour switching in continuous time // *Biometrics*. 2022. Vol. 78. Issue 1. Pp. 286–299. <https://doi.org/10.1111/biom.13409>.
4. Vakolyuk K., Zavalishchin D. Algorithm for Parallel Parcels Delivery Service // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Ekaterinburg, Russia. *IEEE Xplore*. 2021. Pp. 367–370. DOI: 10.1109/USBREIT51232.2021.9455068.
5. Zavalishchin D. S., Vakolyuk K. K. Parallel Delivery Operations Modelling // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. 2022. Vol. 15. No. 4. Pp. 109–114. DOI: 10.14529/mmp220410.
6. Завалищин Д. С. Моделирование оптимальных маршрутов распределенных доставок грузов // *Вестник УрГУПС*. 2023. № 1 (57). С. 14–21. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-1-14-21.
7. Euchi J., Sadok A. Hybrid genetic-sweep algorithm to solve the vehicle routing problem with drones // *Physical Communication*. 2021. Vol. 44. 101236. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101236>.
8. Программа для построения параллельных оптимальных маршрутов доставки / Д. С. Завалищин : программа для ЭВМ 2022669086 Рос. Федерация. № 2022668236; заявл. 07.10.2022; опубли. 17.10.2022.
9. Dijkstra E. W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs // *Numerische Mathematik*. 1959. 1. Pp. 269–271.
10. Тимофеева Г. А., Хазимуллин А. Д. Моделирование расщепления пассажиропотока по видам транспорта методом взвешенных групповых оценок // *Транспорт Урала*. 2022. № 2 (73). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-3-8.
11. Alibaba begins drone delivery trials in China. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-31129804> (дата обращения: 12.04.2024).
12. Boysen N., Fedtke S., Schwerdfeger S. Last-mile delivery concepts: a survey from an operational research perspective // *OR Spectrum*. 2021. Vol. 43. Pp. 1–58. <https://doi.org/10.1007/s00291-020-00607-8>.

**References**

1. Kurzanskii A. B. On a group control problem under obstacle avoidance. *Proceedings of Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics UB RAS*. 2014. Vol. 20. No. 3. Pp. 166–179. ISSN 0134-4889. (In Russian).
2. Kurzanskii A. B. Problem of collision avoidance for a group motion with obstacles. *Proceedings of Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics UB RAS*. 2015. Vol. 21. No. 2. Pp. 134–149. ISSN 0134-4889. (In Russian).
3. Niu M., Frost F., Milner J. E., Skarin A., Blackwell P. G. Modelling group movement with behaviour switching in continuous time. *Biometrics*. 2022. Vol. 78. Issue 1. Pp. 286–299. <https://doi.org/10.1111/biom.13409>.
4. Vakolyuk K., Zavalishchin D. Algorithm for Parallel Parcels Delivery Service. 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Ekaterinburg, Russia. *IEEE Xplore*. 2021. Pp. 367–370. DOI: 10.1109/USBREIT51232.2021.9455068.
5. Zavalishchin D. S., Vakolyuk K. K. Parallel Delivery Operations Modelling. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. 2022. Vol. 15. No. 4. Pp. 109–114. DOI: 10.14529/mmp220410.
6. Zavalishchin D. S. Modeling of optimal routes for distributed cargo deliveries. *Herald of the USURT*. 2023. No. 1 (57). Pp. 14–21. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-1-14-21. (In Russian).

7. Euchi J., Sadok A. Hybrid genetic-sweep algorithm to solve the vehicle routing problem with drones. *Physical Communication*. 2021. Vol. 44. 101236. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101236>.
8. Program for construction of parallel optimal delivery routes / D. S. Zavalishchin : computer program 2022669086 Russian Federation. No. 2022668236; filed 07.10.2022; publ. 17.10.2022. (In Russian).
9. Dijkstra E. W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*. 1959. 1. Pp. 269–271.
10. Timofeeva G. A., Khazimullin A. D. Modeling of passenger traffic splitting by modes of transport by method of weighted group assessments. *Transport of the Urals*. 2022. No. 2 (73). Pp. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-3-8. (In Russian).
11. Alibaba begins drone delivery trials in China. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-31129804> (access date: 12.04.2024).
12. Boysen N., Fedtke S., Schwerdfeger S. Last-mile delivery concepts: a survey from an operational research perspective. *OR Spectrum*. 2021. Vol. 43. Pp. 1–58. <https://doi.org/10.1007/s00291-020-00607-8>.

*Статья сдана в редакцию 10 июня 2024 года*

# Организация производства

УДК 532.529

Б. М. Гасанов, Н. В. Буланов

## Исследование интенсивности теплообмена при кипении жидкости в стесненных условиях узких каналов

UDK 532.529

*B. M. Gasanov, N. V. Bulanov*

## The study of the intensity of heat transfer when the liquid boils in confined spaces of narrow channels

### Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении потока воды, недогретой до температуры насыщенных паров. Цель экспериментов заключалась в изучении влияния ограниченности пространства на интенсивность теплоотдачи при горизонтальном течении воды в узких (по высоте) каналах. Исследовались каналы высотой 7,0, 3,0, 0,6 и 0,3 мм. Эксперименты проводились при атмосферном давлении, массовых скоростях потока 127–370 кг/(м<sup>2</sup>·с), тепловых потоках 50–4800 кВт/м<sup>2</sup> и недогреве воды на входе в канал на 30–75 °С. В зависимости от высоты

канала возникали три режима кипения: с деформированными пузырями, с изолированными пузырями и совместное кипение или чередование кипения с деформированными и изолированными пузырями. По результатам проведенного исследования получен большой массив экспериментальных данных, позволяющих повысить точность расчетов тепло- и массообмена в насадочных испарителях и абсорберах, в том числе в новых типах абсорбционных кондиционеров, используемых при эксплуатации автомобилей, бензиновых, дизельных, газотурбинных тепловозов.

**Ключевые слова:** кипение недогретого потока

жидкости, интенсификация теплообмена, паровой пузырь, жидкость, недогретая до температуры кипения

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-29-44

### Abstract

The article presents the results of an experimental study of heat transfer during boiling of a stream of water underheated up to the temperature of saturated vapors. The experiments aimed at the study the effect of confined space on the heat transfer intensity during the horizontal flow of water in narrow (along the full vertical extent) channels. Channels with heights of 7.0, 3.0, 0.6 and 0.3 mm were studied.

Статья рекомендована к публикации А. А. Сабирзяновым, канд. физ.-мат. наук, доцентом, Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: ASabirzyanov@usurt.ru.

**Байрамали Мехрали оглы Гасанов**, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией криогеники и энергетики Института теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: gbm@itpuran.ru. ORCID 0000-0003-3846-0056.

**Николай Владимирович Буланов**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, Россия. E-mail: NBulanov@usurt.ru. ORCID 0000-0002-4429-7657.

© Б. М. Гасанов, Н. В. Буланов, 2024

The article is recommended for publication by A. A. Sabirzyanov, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Ural State University of Railway Transport. E-mail: ASabirzyanov@usurt.ru.

**Bayramali Mehrali ogly Gasanov**, DSc in Physics and Mathematics, Head of Laboratory of Cryogenics and Energy, Institute of Thermophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia. E-mail: gbm@itpuran.ru. ORCID 0000-0003-3846-0056.

**Nikolay Vladimirovich Bulanov**, DSc in Physics and Mathematics, Professor of Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia. E-mail: NBulanov@usurt.ru. ORCID 0000-0002-4429-7657.

© B. M. Gasanov, N. V. Bulanov, 2024

The experiments were carried out at atmospheric pressure, mass flow rates of 127–370 kg/(m<sup>2</sup>·s), heat flows of 50–4800 kW/m<sup>2</sup> and underheating of water at the entrance to the channel by 30–75 °C. Depending on the height of the channel, three boiling modes appeared: with deformed bubbles, with isolated bubbles and

co-boiling or alternating boiling with deformed and isolated bubbles. Based on the results of the study, a large scale array of experimental data was obtained that allows to increase the accuracy of calculations of heat and mass transfer in fitted-on evaporimeter and absorbers, including in new types of absorption air

conditioners used in the operation of automobiles, gasoline, diesel, gas turbine locomotives.

**Keywords:** boiling of an underheated liquid flow, intensification of heat exchange, steam bubble, liquid underheated to boiling point

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-29-44

**К**ипение жидкости, недогретой до температуры насыщения, широко используется в системах охлаждения, связанных с отводом высоких тепловых потоков. При кипении с недогревом паровые пузыри находятся на поверхности кипения или вблизи нее, а ядро потока либо не содержит паровой фазы, либо она присутствует кратковременно с последующей конденсацией. Такое положение паровых пузырей по сравнению с кипением при температуре насыщения не приводит к существенным изменениям гидравлических характеристик в системах охлаждения. Кроме того, при кипении недогретой жидкости критическая плотность теплового потока выше, чем в случае кипения жидкости при температуре насыщения.

Методы исследования, механизмы и модели кипения недогретой жидкости в условиях вынужденной конвекции подробно описаны в статьях [1, 2]. При кипении на интенсивность теплообмена влияет множество разнообразных факторов: давление, теплофизические свойства жидкости, перегрев стенки канала, шероховатость поверхности, краевой угол смачивания, условия зарождения, роста и эвакуации паровых пузырей и т. д.

Одна из наиболее важных и сложных задач исследования теплообмена при кипении жидкости связана с динамикой паровых пузырей. При кипении в недогретом потоке жизненный цикл пузырей включает такие стадии, как зарождение, рост, отрыв, скольжение и конденсация, что сопровождается значительным теплопереносом. Если

рассматривать среднее время жизни парового пузыря в переохлажденном потоке, оно составляет порядка 200–500 мкс, при этом продолжительность роста – 5–150 мкс, а длительность конденсации – более 200 мкс [3].

Общепризнано, что на стадии роста в основании парового пузыря формируется тонкий слой жидкости (микрослой). В частности, Moore F. D. и Mesler R. B. [4], используя оригинальную термопару и измеряя температуру поверхности в области действующего центра парообразования при кипении воды, обнаружили значительные флуктуации температуры поверхности с быстрым спадом примерно за 2 мс. На этом основании они сделали предположение о возможности существования под растущим паровым пузырем тонкого слоя жидкости, интенсивное испарение которого и определяет эффект быстрого локального охлаждения поверхности. Более поздние исследования были сосредоточены на измерении толщины микрослоя и оценке вклада его испарения на теплообмен [4–10]. Согласно модели кипения недогретой жидкости, предложенной Snyder N. и Robin T. [11], в основании парового пузыря происходит испарение микрослоя жидкости, а в верхней части – конденсация образовавшегося пара с передачей тепла обтекающему паровой пузырь потоку.

Когда рост парового пузыря ограничен стенкой, противоположной от поверхности нагрева, паровой пузырь деформируется. Katto Y. и Yokoya S. [12] установили, что кипение в таких условиях снижает критическую плотность

теплового потока и улучшает средний коэффициент теплоотдачи при низких тепловых потоках. Кроме того, они выяснили, что перегрев поверхности снижается по мере того, как высота зазора становится меньше диаметра отрыва парового пузыря. К настоящему времени накоплен большой массив экспериментальных данных [13–17], позволяющих сделать вывод, что повышение коэффициента теплоотдачи при кипении в ограниченном пространстве вызвано деформацией парового пузыря, вследствие чего испаряющийся микрослой в его основании увеличивается. Как правило, исследования проводились при кипении в большом объеме и при температурах жидкости на линии насыщения.

В связи со значительным технологическим развитием различных отраслей промышленности возникает проблема по рассеиванию больших тепловых потоков из узких пространств, например, в испарителях абсорбционных кондиционеров железнодорожного и автомобильного транспорта [18–20]. При кипении в узких каналах гидродинамические параметры потока и характеристики теплообмена отличаются от аналогичных характеристик, наблюдаемых при кипении в обычных условиях

(в широких каналах). Соответственно задачи исследования, представленного в статье, – визуализация двухфазной области у нагреваемой стенки и определение влияния размера зазора канала на интенсивность теплообмена при кипении в недогретом потоке воды. Влияние на теплоотдачу теплового, массового потока и переохлаждения воды на входе в канал при изменении расстояния зазора, отделяющего поверхность кипения от противоположной, ненагреваемой, стенки канала, изучались на разработанной авторами экспериментальной установке.

### 1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой замкнутый контур, состоящий из резервуара для воды, из теплообменника, центробежного насоса, подогревателя, испытательной секции с прямоугольным каналом, датчика давления, расходомера и других вспомогательных устройств. Для исключения коррозии все трубопроводы и вентили изготовлены из нержавеющей стали. Контур позволяет изменять скорость потока и температуру воды на входе в канал.

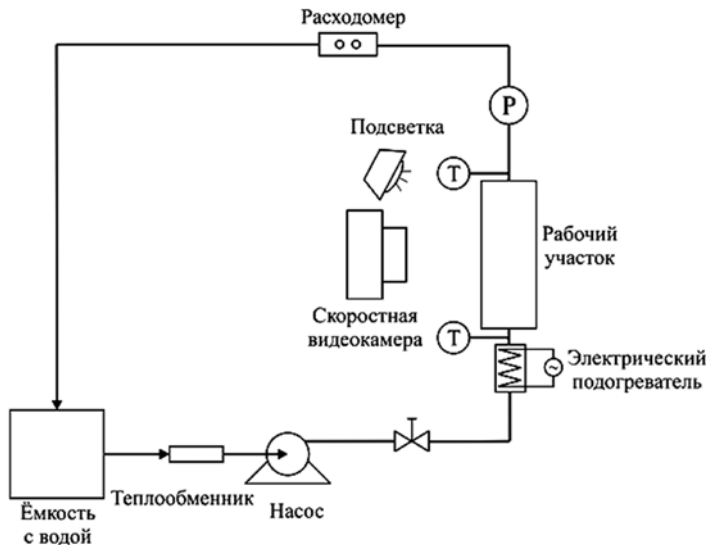


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки



В процессе экспериментов воду в резервуаре предварительно деаэрировали кипячением в течение около 4 ч, а затем насосом прокачивали через испытательный участок. Скорость потока измеряли расходомером с погрешностью измерения  $\pm 0,6\%$ . Для изменения и поддержания температуры жидкости на входе в испытательную секцию использовали электрический подогреватель и теплообменник в виде змеевика, погруженного в термостат с холодной жидкостью. Две медь-константановые термопары с точностью  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , установленные в потоке, измеряли температуру жидкости на входе и выходе из рабочей секции. Все термопары

подключены к системе сбора данных, а она – к компьютеру.

Испытательную секцию (рис. 2) для проведения экспериментов готовили следующим образом. В пластине из оргстекла толщиной 4 мм фрезеровали прямоугольный канал шириной 14 и длиной 50 мм (рис. 2а), затем фрезерованные поверхности полировали до прозрачности, чтобы они могли пропускать свет. В оргстекле сверлили отверстия, в которые устанавливали трубки из нержавеющей стали диаметром 2,5 мм для подвода и отвода рабочей жидкости. В центре канала размещали поверхность кипения – это торцевая поверхность медного стержня диаметром 7 мм,

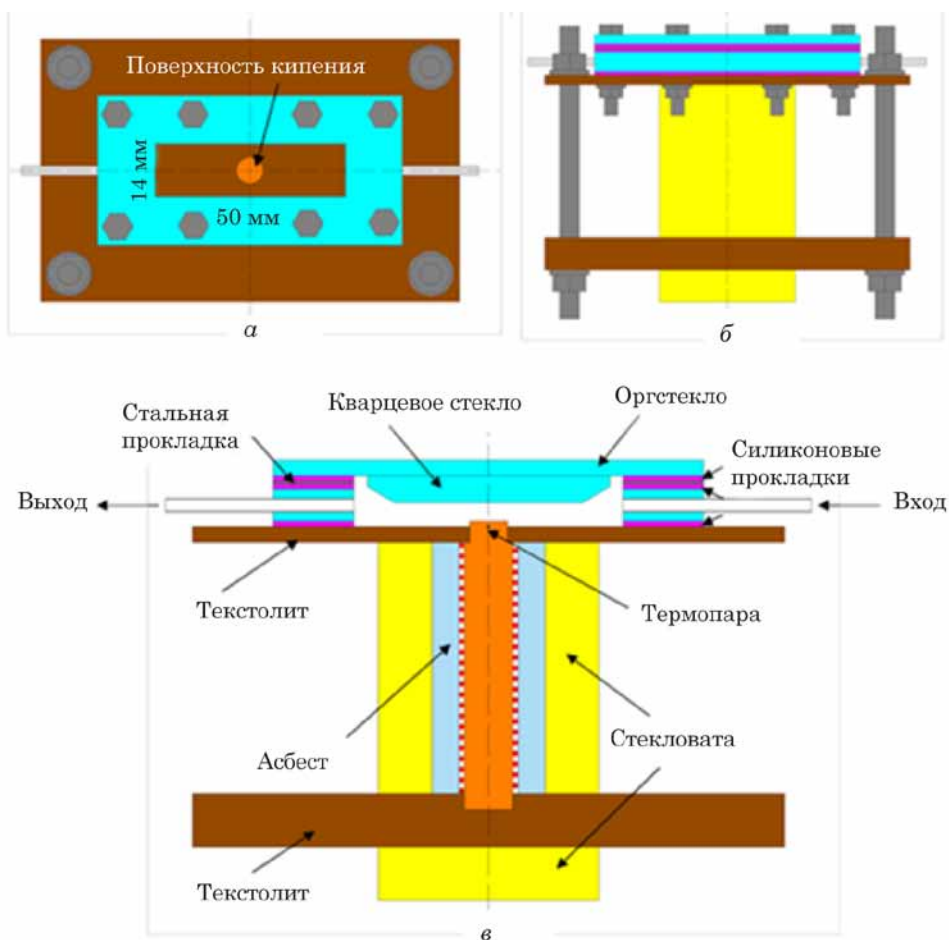


Рис. 2. Испытательная секция: вид сверху (а), сбоку (б) и продольный разрез (в)

установленного с натягом в текстолитовой пластине, которая служила нижней поверхностью канала. Торцевая поверхность стержня выступала на 1 мм над поверхностью текстолита. Чтобы предотвратить протечки и исключить кипение на боковой поверхности стержня, на поверхность между выступающей частью медного стержня и текстолита наносили эпоксидную смолу с низкой теплопроводностью. Излишки эпоксидной смолы до полимеризации удаляли с медной поверхности растворителем, а затем полировали наждачной бумагой с зернистостью 2000. Далее с использованием войлочного круга и полировочной пасты поверхность кипения подвергали зеркальной полировке. Процедуру полировки поверхности повторяли перед проведением каждого опыта.

Противоположную от нагревателя стенку канала изготавливали из оргстекла толщиной 4 мм и устанавливали кварцевое стекло, чтобы вести видеонаблюдение за процессом кипения. Для гидроизоляции канала использовали силиконовые прокладки толщиной 0,7 мм, которые размещали между текстолитом и оргстеклом с каналом, а также между оргстеклом с каналом и смотровым окном (рис. 2б). Все перечисленные детали стягивали восемью крепежными болтами, как это показано на рис. 2а. Зазор между поверхностью кипения и смотровым окном регулировали прокладками из нержавеющей стали толщиной 0,20 мм, размещенными между смотровым окном и оргстеклом с каналом. Измеряя микрометром высоту сборки канала и вычитая толщину прокладок, определяли расстояние зазора от поверхности кипения до противоположной стенки. Погрешность измерения зазора зависела от усилия стягивания силиконовых прокладок и составляла  $\pm 20$  мкм.

Медный стержень длиной 55 мм нагревали нихромовым проволочным нагревателем (диаметр 0,5 мм и длина около 1600 мм), который наматывали на стержень поверх электрической изоляции из слюды. Нихромовую

проволоку нагревали источником постоянного тока мощностью 800 Вт. Напряжение и силу тока измеряли цифровыми вольтметром и амперметром. Для минимизации потерь тепла в окружающую среду нагреватель изолировали несколькими слоями асбестового шнура и сверху дополнительно слоем из стекловаты. Нижнюю часть медного стержня размещали в текстолитовой пластине толщиной 10 мм. По радиусу медного стержня на расстоянии 1 мм от его верхней плоской поверхности, на которой наблюдали различные режимы кипения, сверлили отверстие диаметром 0,8 мм. В него устанавливали медь-константановую термопару, при помощи которой измеряли температуру поверхности с погрешностью  $\pm 0,2$  °С (рис. 2в). Показания термопары заносили в компьютер.

Для наблюдения за процессом кипения использовали скоростную камеру с частотой съемки 3000 кадров в секунду. Съемку проводили в отраженном свете всей площади поверхности кипения.

## 2. Обработка экспериментальных данных

В опытах измеряли полную электрическую мощность нагрева  $Q = U \cdot I$ , которую определяли по измеренному падению напряжения  $U$  и силе тока  $I$ , проходящего через нагреватель. Поскольку нагревательная часть тестовой секции имела хорошую теплоизоляцию, а потери тепла в окружающую среду оценивались менее 3 %, в расчетах потери тепла в окружающую среду не учитывали. Плотность теплового потока рассчитывали по уравнению

$$q = \frac{U \cdot I}{A}, \quad (1)$$

где  $A$  – площадь нагреваемой поверхности,  $m^2$ .

Температуру поверхности кипения  $T_w$  определяли по показаниям термопары и по подводимому тепловому потоку  $q$  на основе закона Фурье для одномерной теплопроводности:

Таблица 1

Неопределенность измеряемых величин

Параметр	Погрешность
Высота канала $\varepsilon$	$\pm 20$ мкм
Температура жидкости $T_{in}$ и $T_{out}$	$\pm 0,2$ °C
Температура нагреваемой поверхности $T_w$	$\pm 0,2$ °C
Массовый расход $G$	$\pm 0,6$ %
Давление $P$	$\pm 0,075$ кПа
Тепловой поток $q$	$\pm 1,4$ %
Коэффициент теплоотдачи $h$	$\pm 6,8$ %

$$T_w = T - q \frac{\delta}{\lambda}, \tag{2}$$

где  $T$  – температура, определяемая термомпарой, °C;  $\delta$  – расстояние между поверхностью кипения и термомпарой, м;  $\lambda$  – теплопроводность меди, Вт/(м · °C).

Коэффициент теплоотдачи от нагреваемой поверхности к воде вычисляли по уравнению

$$h = \frac{q}{T_w - \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right)}, \tag{3}$$

где  $T_{in}$  и  $T_{out}$  – температура воды на входе и выходе из канала.

Погрешности (табл. 1) оценивали с использованием метода анализа неопределенностей [21]. Например, погрешность теплового потока рассчитана по уравнению

$$\Delta q = \sqrt{\left( \frac{\partial q}{\partial U} \Delta U \right)^2 + \left( \frac{\partial q}{\partial I} \Delta I \right)^2 + \left( \frac{\partial q}{\partial A} \Delta A \right)^2} = \sqrt{\left( \frac{I}{A} \Delta U \right)^2 + \left( \frac{U}{A} \Delta I \right)^2 + \left( \frac{UI}{A^2} \Delta A \right)^2}. \tag{4}$$

### 3. Результаты экспериментов

#### 3.1. Влияние размера зазора на теплообмен и визуализация процесса кипения

Как видно из рис. 3, на котором изображены кривые кипения воды при массовой скорости потока 265 кг/(м<sup>2</sup>·с) и расстояниях от поверхности кипения до противоположной стенки канала,

равных 0,3, 0,6, и 3,0 мм, размер зазора  $\varepsilon$  оказывает заметное влияние на интенсивность теплообмена. Так, в канале с зазором 0,3 и 0,6 мм кипение начинается при меньших перегревах  $\Delta T_{sat} = T_w - T_s$  поверхности по сравнению с зазором 3,0 мм. При этом в случае перегрева  $\Delta T_{sat}$  около 28 °C теплоотдача в зазорах 0,3 и 0,6 мм почти в 3 раза превышает теплоотдачу в зазоре 3,0 мм, возле которого наблюдается неразвитое пузырьковое кипение. Такая зависимость теплоотдачи к воде связана с условиями роста и конденсации паровых пузырей.

Максимальный диаметр парового пузыря  $d_{max}$  при кипении в переохлажденном потоке зависит от давления в системе, скорости потока, перегрева поверхности, степени переохлаждения жидкости на входе в канал. Размер паровых пузырей растет по мере увеличения плотности теплового потока

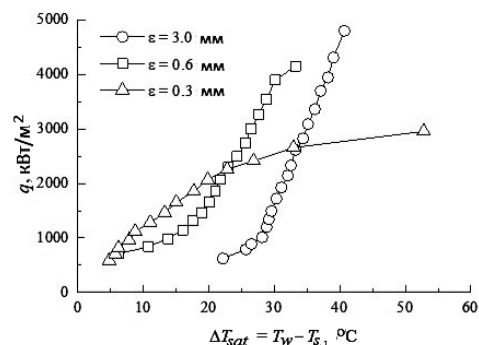


Рис. 3. Кривые кипения воды при изменении размера зазора  $\varepsilon$

и уменьшается с увеличением давления в системе, переохлаждения на входе в канал и массовой скорости потока. Результаты исследований [3, 9, 22–29] позволяют сделать вывод, что для воды при давлении, близком к атмосферному, и недогревах до температуры насыщения  $\Delta T_{sub} = T_s - T_{in}$  больше 30 °С среднее значение  $d_{max}$  колеблется от 400 до 600 мкм.

Как видно из рис. 4, на котором представлены кадры начала кипения в зазоре 0,3 мм при  $q = 590$  кВт/м<sup>2</sup>, два паровых пузыря в процессе роста достигают противоположной стенки и деформируются. Далее деформированные пузыри растут параллельно поверхности кипения до определенного размера, а затем конденсируются в потоке холодной жидкости в зазоре и на периферии поверхности нагрева. Усиление теплоотдачи, безусловно, происходит в результате испарения микрослоя жидкости с большей площади в основании деформированного пузыря. После конденсации деформированных пузырей активизируются новые центры кипения, и цикл зарождения, роста и конденсации деформированных пузырей повторяется. Между циклами зарождения, роста и конденсации деформированных пузырей в течение непродолжительного времени (около 3–15 мс) тепло от поверхности нагрева отводится однофазной конвекцией.

На рис. 5 изображены снимки кипения при нескольких значениях теплового потока, соответствующих тем, что показаны на рис. 3. Светлые области при кипении в зазоре 0,3 мм наблюдаются

из-за преломления света на межфазной границе «жидкость – пар». В канале с зазором 0,3 мм по мере роста плотности теплового потока плотность центров парообразования увеличивается, а время, в течение которого наблюдается однофазная конвекция, сокращается. Из-за хаотичного характера активизации центров кипения в недогретой жидкости формирующиеся деформированные пузыри сливаются с соседними, образуя паровые слои, которые выступают за границу поверхности кипения, тем самым вытесняя поступающую к поверхности кипения жидкость. Конденсация сросшихся деформированных пузырей происходит как в зазоре, так и за периферией нагреваемой поверхности. С ростом теплового потока область проникновения паровых слоев в холодное ядро потока увеличивается.

Зародышеобразование в канале с зазором 0,3 мм происходит в слое жидкости, поступающей к поверхности нагрева после конденсации деформированных пузырей. Это подтверждается результатами визуализации и тем фактом, что при ступенчатом увеличении тепловой нагрузки измеряемые параметры достигают стационарного состояния. Когда объемное паросодержание в зазоре 0,3 мм оказывается настолько большим, что эффективный приток жидкости к поверхности кипения становится затруднительным, происходит частичное высыхание и повторное увлажнение нагреваемой поверхности. При этом в зазоре формируются паровые образования, которые не позволяют

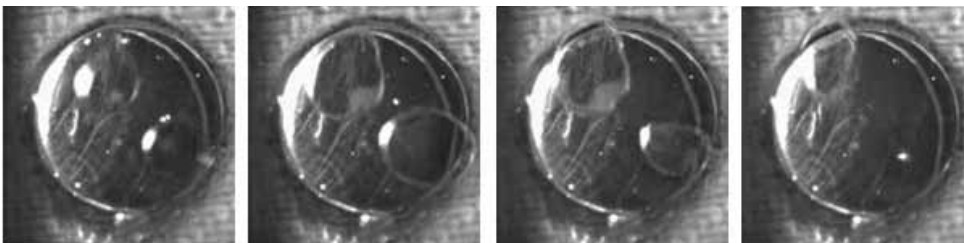


Рис. 4. Последовательность кипения воды в зазоре 0,3 мм: направление потока снизу вверх;  $\Delta T_{sub} = 75$  °С;  $q = 590$  кВт/м<sup>2</sup>;  $G = 265$  кг/(м<sup>2</sup>·с); время между кадрами 1 мс

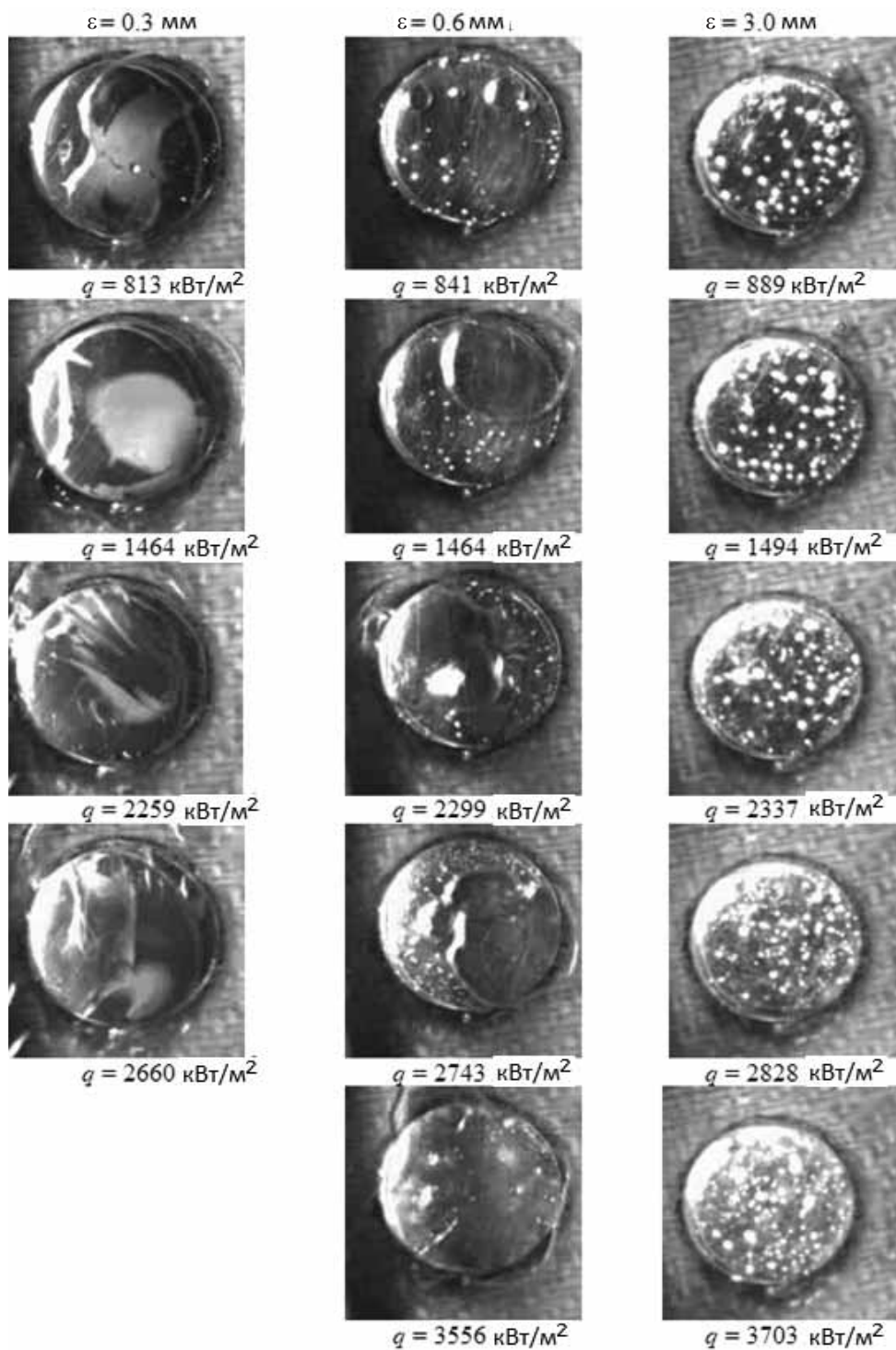


Рис. 5. Кипение воды при изменении размера зазора  $\varepsilon$ :  
плотности потока  $q$  соответствуют показанным на рис. 3; направление потока снизу вверх;  
 $\Delta T_{sub} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $G = 265 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

идентифицировать процессы, протекающие на поверхности кипения. Режим частичного высыхания и повторного увлажнения стенки проявляется при тепловых потоках около  $2600 \text{ кВт/м}^2$  и сопровождается флуктуациями температуры поверхности кипения  $T_w$  (рис. 6а) и температуры воды  $T_{out}$  (рис. 6б) на выходе из канала, амплитуда таких колебаний достигает  $1\text{--}8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Дальнейшее незначительное увеличение тепловой нагрузки приводит к росту площади сухих пятен, а следовательно, к быстрому повышению температуры поверхности и к кризису кипения.

В канале, имеющем зазор  $0,6 \text{ мм}$ , с началом кипения (см. рис. 5) на поверхности нагрева образуются изолированные, т. е. пространственно разделенные, пузыри, которые растут и конденсируются либо скользят по поверхности, а затем конденсируются. Паровые пузыри максимального размера, как и в канале с зазором  $0,3 \text{ мм}$ , достигают противоположной стенки и деформируются. При увеличении подводимого теплового потока на поверхности кипения чередуются или совместно существуют участки с деформированными и изолированными пузырями. Например, при тепловых потоках около  $1400 \text{ кВт/м}^2$  (см. рис. 5) паровые пузыри, имеющие максимальные диаметры, по мере роста достигают противоположной стенки канала и деформируются аналогично тому, как при кипении в канале с зазором  $0,3 \text{ мм}$ . После конденсации деформированного пузыря в течение непродолжительного времени ( $\sim 6\text{--}10 \text{ мс}$ ) может наблюдаться кипение с изолированными пузырями до появления очередного деформированного пузыря. В этом случае тепло от нагреваемой поверхности отводится однофазной конвекцией и испарением деформированных и изолированных пузырей, причем площадь участка нагреваемой поверхности, покрытая деформированными пузырями, больше суммарной площади, занятой изолированными пузырями. Такой механизм теплообмена интенсифицирует теплоотдачу по сравнению

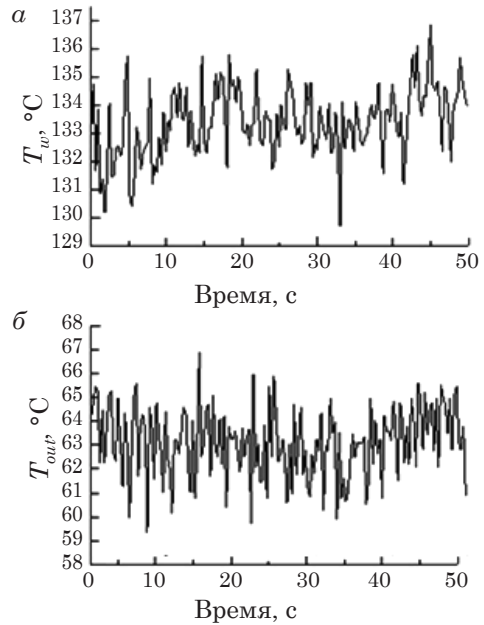


Рис. 6. Колебания температуры поверхности (а) и температуры воды (б) на выходе из канала при частичном высыхании и повторном увлажнении поверхности кипения:  
направление потока снизу вверх;  
 $\Delta T_{sub} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $q = 2600 \text{ кВт/м}^2$ ;  
 $G = 265 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

с неограниченным кипением в канале с зазором  $3 \text{ мм}$ .

При дальнейшем росте подводимого теплового потока по мере увеличения плотности центров парообразования создаются условия для коалесценции изолированных и деформированных пузырей. Это приводит к тому, что время кипения с изолированными пузырями снижается, а с деформированными – увеличивается. Смена режима кипения на одних участках теплообменной поверхности и совместное существование изолированных и деформированных пузырей на других участках при зазоре  $0,3 \text{ мм}$  и высоких тепловых потоках дополнительно усиливают теплоотдачу относительно кипения с деформированными пузырями. Усиление теплоотдачи также достигается за счет более эффективного притока воды к поверхности кипения, чем в канале

с зазором 0,3 мм. При тепловых потоках выше  $3500 \text{ кВт/м}^2$  поверхность кипения преимущественно покрыта только деформированными пузырями. Режим частичного высыхания и повторного увлажнения в канале с зазором 0,6 мм наступает при тепловых потоках около  $3900 \text{ кВт/м}^2$  (см. рис. 3).

В канале с зазором 3 мм во всем исследованном интервале тепловых нагрузок наблюдалось зарождение, скольжение и схлопывание изолированных пузырей. При тепловых потоках около  $4000 \text{ кВт/м}^2$  из-за роста числа и плотности расположения пузырей на поверхности кипения происходило их спонтанное слияние и образование крупных пузырей из мелких. Последующее увеличение тепловой нагрузки приводило к росту числа крупных пузырей и формированию паровых агломератов, которые занимали все сечение канала и не выходили за периферию поверхности кипения, т. е. конденсировались в потоке недогретой жидкости в пределах поверхности кипения. В исследованиях [22, 30–32] показано, что образование паровых агломератов на нагреваемой поверхности указывает на кризис кипения. Поэтому с появлением таких образований наши опыты были прекращены из-за опасения пережечь установку.

Таким образом, при ограниченном кипении в недогретом потоке положительными эффектами являются снижение перегрева поверхности и усиление теплоотдачи при низких тепловых потоках, а нежелательными – ухудшение теплообмена при высоких тепловых потоках и рост гидравлического сопротивления.

### 3.2. Гидравлическое сопротивление течения потока

В исследованных диапазонах тепловых нагрузок при неограниченном кипении в канале с зазором 3,0 мм изолированные пузыри имели малые размеры, не уносились в поток жидкости, соответственно паровая фаза не могла перекрывать поперечное сечение канала. Поэтому при однофазной конвекции

и пузырьковом кипении гидравлическое сопротивление течения потока существенно не менялось.

В каналах с зазорами 0,3 и 0,6 мм источником усиления гидравлического сопротивления потока являются образующиеся и сростшиеся деформированные пузыри, которые по мере роста вытесняют поступающую к поверхности нагрева воду. При этом возникают нежелательные гидравлические эффекты, такие как пульсации давления потока и расхода жидкости. Из рис. 7 видно, что амплитуда колебаний избыточного давления при одинаковом тепловом потоке в канале с зазором 0,3 мм выше, чем с зазором 0,6 мм. Амплитуда колебаний давления также нарастает при увеличении плотности теплового потока и снижении температуры недогрева  $\Delta T_{sub}$ . С уменьшением  $\Delta T_{sub}$ , т. е. с приближением температуры воды к температуре насыщения, снижается скорость конденсации паровых образований, а глубина проникновения паровой

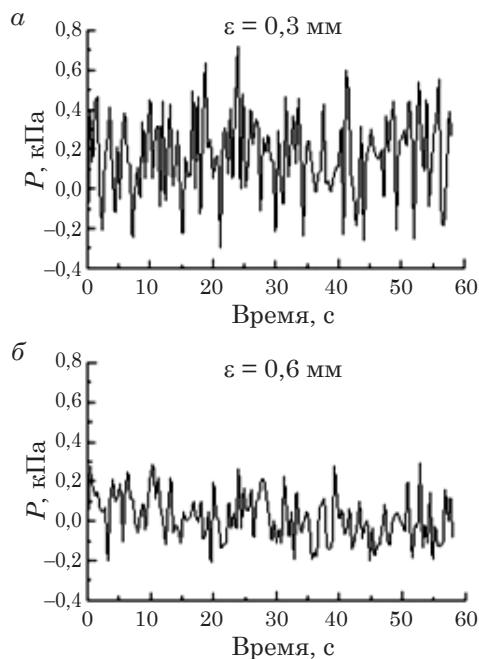


Рис. 7. Колебания избыточного давления в канале с зазорами 0,3 мм (а) и 0,6 мм (б) при  $q = 2100 \text{ кВт/м}^2$

фазы в ядро потока, как это показано на рис. 5 для каналов с зазором 0,3 и 0,6 мм, увеличивается.

### 3.3. Влияние массовой скорости потока и недогрева на теплообмен

В условиях неограниченного кипения недогретого потока увеличение скорости малоэффективно по сравнению с такими механизмами теплопередачи, как испарение и конденсация паровых пузырей, и приводит к повышению конвективной составляющей теплообмена в сторону более высоких перегревов стенок. Было сделано предположение, что в каналах с ограниченным кипением увеличение скорости будет способствовать более активному притоку жидкости к поверхности кипения. Однако, как показали результаты опытов (рис. 8), при ограниченном кипении нарастание скорости практически не влияет на теплопередачу.

Что касается теплообмена, то, как показали опыты, в канале с зазором 3,0 мм при неограниченном кипении (рис. 9а) температура недогрева воды не оказывает на него влияния. С понижением  $\Delta T_{sub}$  снижается значение критической плотности теплового потока. Это происходит в результате того, что с приближением температуры жидкости к температуре насыщения увеличивается диаметр паровых пузырей, способствующий их коалесценции и образованию паровых агломератов. Также

критическая плотность теплового потока снижается потому, что подводимый к стенке тепловой поток расходуется не только на парообразование, но и на подогрев жидкости до температуры насыщения.

В каналах с зазором 0,6 и 0,3 мм (рис. 9б, в) по мере приближения температуры воды к температуре кипения значение  $q_{кр}$  снижается, как и при неограниченном кипении. Кроме того, ухудшается теплообмен, это обусловлено снижением скорости конденсации деформированных пузырей в зазоре и за периферией поверхности кипения, в результате чего поступление притока жидкости к поверхности кипения становится более затрудненным.

Интенсивность теплообмена при кипении недогретой жидкости зависит от числа действующих центров зародышеобразования на единицу площади нагрева в единицу времени. Число таких центров определяется в первую очередь плотностью подводимого теплового потока. Согласно работе [33], коэффициент теплоотдачи рассчитывается как отношение плотности теплового потока к разности температуры поверхности кипения и среднemasовой температуры воды. Как видно из рис. 10, при одинаковых подводимых тепловых потоках коэффициент теплоотдачи к воде в ограниченных каналах оказывается выше, чем в канале с зазором 3 мм.

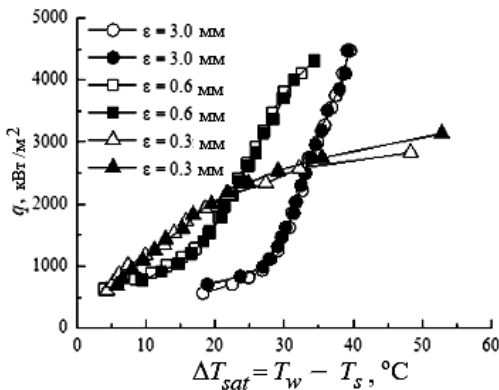


Рис. 8. Влияние скорости потока на теплообмен в зависимости от размера зазора:

- —  $\epsilon = 3,0$  мм,  $G = 127$  кг/(м<sup>2</sup>·с);
- —  $\epsilon = 3,0$  мм,  $G = 370$  кг/(м<sup>2</sup>·с);
- —  $\epsilon = 0,6$  мм,  $G = 127$  кг/(м<sup>2</sup>·с);
- —  $\epsilon = 0,6$  мм,  $G = 370$  кг/(м<sup>2</sup>·с);
- △ —  $\epsilon = 0,3$  мм,  $G = 127$  кг/(м<sup>2</sup>·с);
- ▲ —  $\epsilon = 0,3$  мм,  $G = 370$  кг/(м<sup>2</sup>·с)



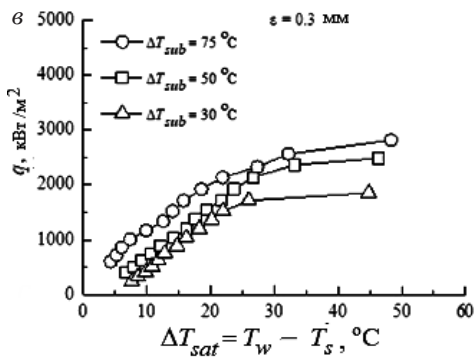
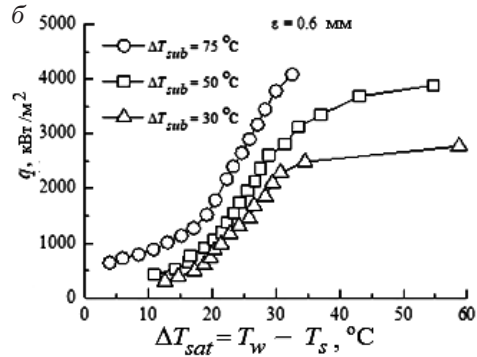
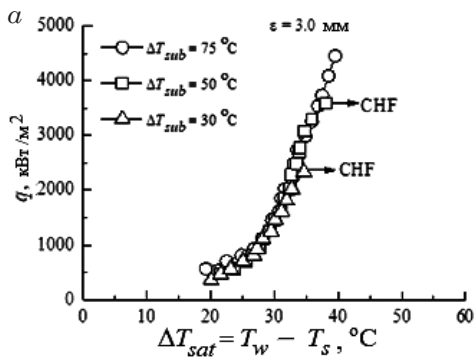


Рис. 9. Влияние температуры недогрева воды на теплообмен

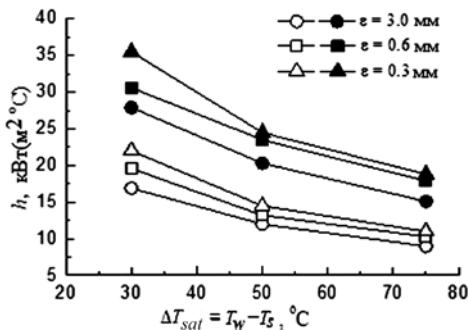


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры недогрева при изменении размера зазора: светлые точки  $q = 850 \text{ кВт/м}^2$ , темные –  $1500 \text{ кВт/м}^2$ ;  $G = 370 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

### Выводы

Проведены экспериментальные исследования о влиянии размера зазора канала на интенсивность теплообмена, и визуализировано поведение паровых пузырей при кипении в восходящем потоке недогретой воды. Исследованы три режима кипения: кипение с деформированными пузырями, совместное кипение с деформированными и изолированными пузырями и кипение с изо-

лированными пузырями. Установлено, что при ограниченном кипении конденсация деформированных пузырей происходит в зазоре над поверхностью кипения и за ее периферией. Снижение температуры недогрева воды приводит к ухудшению теплообмена при ограниченном кипении и к росту гидравлического сопротивления. Ухудшение теплообмена происходит в результате роста паросодержания в зазоре над поверхностью кипения с приближением темпе-

ратуры воды на входе в канал к температуре насыщения. Увеличение гидравлического сопротивления трения потока вызвано снижением скорости конденсации деформированных пузырей в ядре потока с приближением среднemasсовой температуры воды к температуре насыщения. Повышение массовой скорости потока, как и при неограниченном кипении, не оказывает существенного влияния на теплообмен при ограниченном кипении.

Совместное кипение с деформированными и изолированными пузыря-

ми при зазоре канала 0,6 мм интенсифицирует теплоотдачу по сравнению с неограниченным кипением при зазоре 3 мм. Это сопровождается снижением критической плотности теплового потока, что обусловлено ростом паросодержания в зазоре 0,6 мм и ухудшением притока воды к поверхности кипения. Для более эффективного притока жидкости и увеличения величины критической плотности теплового потока можно модифицировать поверхность кипения, что станет предметом последующих исследований авторов. ■

### Литература

1. Review on bubble dynamic of subcooled flow boiling – part a: Research methodologies / G. Yang, W. Zhang, M. Binama [et al.] // *International Journal of Thermal Sciences*. 2023. Vol. 184. 108019.
2. Review on bubble dynamic of subcooled flow boiling – part b: Behavior and models / G. Yang, W. Zhang, M. Binama [et al.] // *International Journal of Thermal Sciences*. 2023. Vol. 184. 108026.
3. Characteristics of subcooled water boiling on structured surfaces / N. V. Vasil'ev, A. Y. Varaksin, Y. A. Zeigarnik [et al.] // *High Temperature*. 2017. Vol. 55. Pp. 880–886.
4. Moore F. D., Mesler R. B. The measurement of rapid surface temperature fluctuations during nucleate boiling of water // *AIChE Journal*. 1961. Vol. 7 (4). Pp. 620–624.
5. Cooper M. G., Lloyd A. J. P. The microlayer in nucleate pool boiling // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1969. Vol. 12 (8). Pp. 895–913.
6. Kim H., Buongiorno J. Detection of liquid – vapor – solid triple contact line in two-phase heat transfer phenomena using high-speed infrared thermometry // *Int. J. Multiphase Flow*. 2011. Vol. 37 (2). Pp. 166–172.
7. Utaka Y., Kashiwabara Y., Ozaki M. Microlayer structure in nucleate boiling of water and ethanol at atmospheric pressure // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2013. Vol. 57 (1). Pp. 222–230.
8. Jung S., Kim H. Hydrodynamic formation of a microlayer underneath a boiling bubble // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 120. Pp. 1229–1240.
9. Investigation of subcooled flow boiling and CHF using high-resolution diagnostics / A. Richenderfer, A. Kossolapov, J. Hyun Seong [et al.] // *Exp. Thermal and Fluid Science*. 2018. Vol. 99. Pp. 35–58.
10. An Experimental Study of Vapor Bubbles Dynamics at Water and Ethanol Pool Boiling at Low and High Heat Fluxes / A. Surtaev, V. Serdyukov, J. Zhou [et al.] // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 126. Part B. Pp. 297–311.
11. Snyder N. W., Robin T. T. Mass-transfer Model in Subcooled Nucleate Boiling // *Trans. ASME. J. Heat Transfer. Ser. C*. 1969. Vol. 91 (3). Pp. 404–411.
12. Katto Y., Yokoya S. Experimental Study of Nucleate Pool Boiling in Case of Making Interference-plate Approach to the Heating Surface // *Proceedings of the 3rd International Journal of Heat Transfer Conference*. 1966. Vol. 3. Pp. 219–227.
13. Ishibashi E., Nishikawa K. Saturated boiling heat transfer in narrow spaces // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1969. Vol. 12. Pp. 861–894.
14. Lee M. T., Yang Y. M., Maa J. R. Nucleate pool boiling in a confined space // *Chem. Eng. Commun.* 1992. Vol. 117. Pp. 205–217.
15. Yao S. C., Chang Y. Pool boiling heat transfer in a confined space // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1983. Vol. 26. Pp. 841–848.
16. Misale M., Guglielmini G., Priarone A. Nucleate boiling and critical heat flux of HFE-7100 in horizontal narrow spaces // *Exp. Therm Fluid Sci.* 2011. Vol. 35. Pp. 772–779.
17. Kapitz M., Reinker F., Wiesche S. Viscous fingering and heat transfer during boiling in a Hele-Shaw cell // *Exp. Therm Fluid Sci.* 2015. Vol. 67. Pp. 18–23.

18. Абсорбционный кондиционер автомобиля (варианты) / Н. В. Буланов, Е. И. Авксентьева, В. Г. Бондаренко : патент 2787633 Российская Федерация. № 202212426; заявл. 12.09.2022; опубл. 11.01.2023, Бюл. № 2.
19. Буланов Н. В., Авксентьева Е. И., Бондаренко В. Г. Использование сорбционных кондиционеров на автомобилях с двигателями внутреннего сгорания // *Транспорт Урала*. 2022. № 3 (74). С. 67–72. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-67-72.
20. Буланов Н. В., Гасанов Б. М. Теплообмен при кипении воды и эмульсий в миниканале // *Вестник УрГУПС*. 2019. № 1 (41). С. 4–15. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-1-4-15.
21. Moffat R. J. Describing the uncertainties in experimental results // *Exp. Thermal Fluid Sci.* 1988. Vol. 1. Pp. 3–17.
22. Gunther F. C. Photographic study of surface boiling heat transfer to water with forced convection // *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. 1951. Vol. 73. Pp. 115–123.
23. Ünal H. C. Maximum bubble diameter, maximum bubble-growth time and bubble-growth rate during the subcooled nucleate flow boiling of water up to 17.7 MN/m<sup>2</sup> // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1976. Vol. 19 (6). Pp. 643–649.
24. Prodanovic V., Fraser D., Salcudean M. Bubble behavior in subcooled flow boiling of water at low pressures and low flow rates // *Int. J. Multiphase Flow*. 2002. Vol. 28 (1). Pp. 1–19.
25. Experimental investigation on bubble contact diameter and bubble departure diameter in horizontal subcooled flow boiling / P. Zhou, R. Huang, Sh. Huang [et al.] // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. Vol. 149. 119105.
26. Vapor bubble departure in forced convection boiling / J. F. Klausner, R. Mei, D. M. Bernhard, L. Zeng // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1993. Vol. 36 (3). Pp. 651–662.
27. Bubble lift-off size in forced convective subcooled boiling flow / R. Situ, T. Hibiki, M. Ishii, M. Mori // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2005. Vol. 48 (25-26). Pp. 5536–5548.
28. Del Valle V. H., Kenning D. B. R. Subcooled flow boiling at high heat flux // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1985. Vol. 28 (10). Pp. 1907–1920.
29. Levin A. A., Khan P. V. Experimental observation of the maximum bubble diameter in non-stationary temperature field of subcooled boiling water flow // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 124. Pp. 876–883.
30. Experimental investigation on the characteristics of maximum bubble size of subcooled flow boiling in narrow rectangular channel under different system pressure / L. Zhang, H. Liu, D. Chen [et al.] // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2021. Vol. 176. 121426.
31. Lee C. H., Mudawar I. A mechanistic critical heat flux model for subcooled flow boiling based on local bulk flow conditions // *International Journal of Multiphase Flow*. 1988. Vol. 14. No. 6. Pp. 711–728.
32. Vapor Agglomerates and Dry Spots as Precursors of the Subcooled Liquid Boiling Crisis in a Channel / N. V. Vasil'ev, Y. A. Zeigarnik, K. A. Khodakov, S. N. Vavilova // *High Temperature*. 2021. Vol. 59. No. 2–6. Pp. 325–334.
33. Burnout in Subcooled Flow Boiling of Water. A Visual Experimental Study / G. P. Celata, M. Cumo, A. Mariani, G. Zummo // *Int. J. Therm. Sci.* 2000. Vol. 39. No. 9–11. P. 896.

#### References

1. Yang G., Zhang W., Binama M. [et al.]. Review on bubble dynamic of subcooled flow boiling-part a: Research methodologies. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023. Vol. 184. 108019.
2. Yang G., Zhang W., Binama M. [et al.]. Review on bubble dynamic of subcooled flow boiling-part b: Behavior and models. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023. Vol. 184. 108026.
3. Vasil'ev N. V., Varaksin A. Y., Zeigarnik Y. A. [et al.]. Characteristics of subcooled water boiling on structured surfaces. *High Temperature*. 2017. Vol. 55. Pp. 880–886.
4. Moore F. D., Mesler R. B. The measurement of rapid surface temperature fluctuations during nucleate boiling of water. *AIChE Journal*. 1961. Vol. 7 (4). Pp. 620–624.
5. Cooper M. G., Lloyd A. J. P. The microlayer in nucleate pool boiling. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1969. Vol. 12 (8). Pp. 895–913.
6. Kim H., Buongiorno J. Detection of liquid – vapor – solid triple contact line in two-phase heat transfer phenomena using high-speed infrared thermometry. *Int. J. Multiphase Flow*. 2011. Vol. 37 (2). Pp. 166–172.

7. Utaka Y., Kashiwabara Y., Ozaki M. Microlayer structure in nucleate boiling of water and ethanol at atmospheric pressure. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2013. Vol. 57 (1). Pp. 222–230.
8. Jung S., Kim H. Hydrodynamic formation of a microlayer underneath a boiling bubble. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 120. Pp. 1229–1240.
9. Richenderfer A., Kossolapov A., Hyun Seong J. [et al.]. Investigation of subcooled flow boiling and CHF using high-resolution diagnostics. *Exp. Thermal and Fluid Science.* 2018. Vol. 99. Pp. 35–58.
10. Surtaev A., Serdyukov V., Zhou J. [et al.]. An Experimental Study of Vapor Bubbles Dynamics at Water and Ethanol Pool Boiling at Low and High Heat Fluxes. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 126. Part B. Pp. 297–311.
11. Snyder N. W., Robin T. T. Mass-transfer Model in Subcooled Nucleate Boiling. *Trans. ASME. J. Heat Transfer. Ser. C.* 1969. Vol. 91 (3). Pp. 404–411.
12. Katto Y., Yokoya S. Experimental Study of Nucleate Pool Boiling in Case of Making Interference-plate Approach to the Heating Surface. *Proceedings of the 3rd International Journal of Heat Transfer Conference.* 1966. Vol. 3. Pp. 219–227.
13. Ishibashi E., Nishikawa K. Saturated boiling heat transfer in narrow spaces. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1969. Vol. 12. Pp. 861–894.
14. Lee M. T., Yang Y. M., Maa J. R. Nucleate pool boiling in a confined space. *Chem. Eng. Commun.* 1992. Vol. 117. Pp. 205–217.
15. Yao S. C., Chang Y. Pool boiling heat transfer in a confined space. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1983. Vol. 26. Pp. 841–848.
16. Misale M., Guglielmini G., Priarone A. Nucleate boiling and critical heat flux of HFE-7100 in horizontal narrow spaces. *Exp. Therm Fluid Sci.* 2011. Vol. 35. Pp. 772–779.
17. Kapitz M., Reinker F., Wiesche S. Viscous fingering and heat transfer during boiling in a Hele-Shaw cell. *Exp. Therm Fluid Sci.* 2015. Vol. 67. Pp. 18–23.
18. Bulanov N. V., Avksentyeva E. I., Bondarenko V. G. Automobile absorption conditioner (variants) : patent 2787633 Russian Federation. No. 202212426; filed 12.09.2022; publ. 11.01.2023, Bulletin No. 2. (In Russian).
19. Bulanov N. V., Avksentyeva E. I., Bondarenko V. G. Use of sorption conditioners on automobiles with internal combustion engines. *Transport of the Urals.* 2022. No. 3 (74). Pp. 67–72. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-67-72. (In Russian).
20. Bulanov N. V., Gasanov B. M. Heat transfer in boiling of water and emulsions in a minichannel. *Herald of the USURT.* 2019. No. 1 (41). Pp. 4–15. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-1-4-15. (In Russian).
21. Moffat R. J. Describing the uncertainties in experimental results. *Exp. Thermal Fluid Sci.* 1988. Vol. 1. Pp. 3–17.
22. Gunther F. C. Photographic study of surface boiling heat transfer to water with forced convection. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers.* 1951. Vol. 73. Pp. 115–123.
23. Ünal H. C. Maximum bubble diameter, maximum bubble-growth time and bubble-growth rate during the subcooled nucleate flow boiling of water up to 17.7 MN/m<sup>2</sup>. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1976. Vol. 19 (6). Pp. 643–649.
24. Prodanovic V., Fraser D., Salcudean M. Bubble behavior in subcooled flow boiling of water at low pressures and low flow rates. *Int. J. Multiphase Flow.* 2002. Vol. 28 (1). Pp. 1–19.
25. Zhou P., Huang R., Huang Sh. [et al.]. Experimental investigation on bubble contact diameter and bubble departure diameter in horizontal subcooled flow boiling. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. Vol. 149. 119105.
26. Klausner J. F., Mei R., Bernhard D. M., Zeng L. Vapor bubble departure in forced convection boiling. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1993. Vol. 36 (3). Pp. 651–662.
27. Situ R., Hibiki T., Ishii M., Mori M. Bubble lift-off size in forced convective subcooled boiling flow. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2005. Vol. 48 (25-26). Pp. 5536–5548.
28. Del Valle V. H., Kenning D. B. R. Subcooled flow boiling at high heat flux. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1985. Vol. 28 (10). Pp. 1907–1920.
29. Levin A. A., Khan P. V. Experimental observation of the maximum bubble diameter in non-stationary temperature field of subcooled boiling water flow. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 124. Pp. 876–883.

30. Zhang L., Liu H., Chen D. [et al.]. Experimental investigation on the characteristics of maximum bubble size of subcooled flow boiling in narrow rectangular channel under different system pressure. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2021. Vol. 176. 121426.
31. Lee C. H., Mudawar I. A mechanistic critical heat flux model for subcooled flow boiling based on local bulk flow conditions. *International Journal of Multiphase Flow.* 1988. Vol. 14. No. 6. Pp. 711–728.
32. Vasil'ev N. V., Zeigarnik Y. A., Khodakov K. A., Vavilova S. N. Vapor Agglomerates and Dry Spots as Precursors of the Subcooled Liquid Boiling Crisis in a Channel. *High Temperature.* 2021. Vol. 59. No. 2–6. Pp. 325–334.
33. Celata G. P., Cumo M., Mariani A., Zummo G. Burnout in Subcooled Flow Boiling of Water. A Visual Experimental Study. *Int. J. Therm. Sci.* 2000. Vol. 39. No. 9–11. P. 896.

*Статья сдана в редакцию 2 апреля 2024 года*

УДК 629.14: 629.4-592

*Д. В. Осипов, П. Ю. Иванов, К. Е. Пронин, И. А. Кудьяров***Экспериментальное исследование работы пневматических тормозов грузового подвижного состава при однотрубном и двухтрубном питании**

UDK 629.14: 629.4-592

*D. V. Osipov, P. Yu. Ivanov, K. E. Pronin, I. A. Kudyarov***Experimental study of the operation of pneumatic brakes of freight rolling stock with single-tube and double-tube power supply****Аннотация**

В статье представлены результаты исследования пневматических процессов штатной и модернизированной тормозных систем подвижного состава. Цель исследования состояла в выявлении недостатков классической пневматической тормозной системы, влияющих на текущий уровень безопасности и скорость движения грузовых поездов, а также в возможности их

устранения за счет модернизации существующей тормозной системы с использованием двухтрубного питания.

На основе данных по изучению модернизированной тормозной системы, полученных в лабораторных условиях, а также данных, полученных в результате опытов, проведенных на поездах, составлены графики зависимости давления сжатого воздуха тормозной магистрали, тормозных цилиндров

и питательной магистрали от времени для новой тормозной системы.

По результатам выполненных исследований сделан вывод, что штатная тормозная система имеет ряд недостатков, связанных со скоростью протекания газодинамических процессов и неравномерностью распределения давления в тормозных цилиндрах по длине поезда, которых лишена двухтрубная тормозная система,

*Статья рекомендована к публикации А. П. Буйносовым, д-ром техн. наук, профессором, Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: ABuinosov@usurt.ru.*

**Дмитрий Валерьевич Осипов**, аспирант кафедры «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия. E-mail: osipovDnor@mail.ru. ORCID 0000-0002-2108-646X.

**Павел Юрьевич Иванов**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия. E-mail: ivanov@mail.ru. ORCID 0000-0001-6836-5928.

**Константин Евгеньевич Пронин**, аспирант кафедры «Физика, механика и приборостроение» Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия. E-mail: prontoM.irk@mail.ru. ORCID 0009-0004-5340-0670.

**Иван Александрович Кудьяров**, студент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия. E-mail: mr.licrimovor@yandex.ru. ORCID 0009-0002-4896-8662.

© Д. В. Осипов, П. Ю. Иванов, К. Е. Пронин, И. А. Кудьяров, 2024

*The article is recommended for publication by A. P. Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Ural State University of Railway Transport. E-mail: ABuinosov@usurt.ru.*

**Dmitriy Valeryevich Osipov**, postgraduate student of Electric Rolling Stock Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: osipovDnor@mail.ru. ORCID 0000-0002-2108-646X.

**Pavel Yuryevich Ivanov**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Electric Rolling Stock Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: ivanov@mail.ru. ORCID 0000-0001-6836-5928.

**Konstantin Evgenyevich Pronin**, postgraduate student of Physics, Mechanics and Instrumentation Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: prontoM.irk@mail.ru. ORCID 0009-0004-5340-0670.

**Ivan Alexandrovich Kudyarov**, student of Railway Cars and Carriage Equipment Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: mr.licrimovor@yandex.ru. ORCID 0009-0002-4896-8662.

© D. V. Osipov, P. Yu. Ivanov, K. E. Pronin, I. A. Kudyarov, 2024

соответственно ее использование позволит повысить скорость и безопасность движения поездов.

**Ключевые слова:** подвижной состав, истощимость, пневматические процессы, самопроизвольное срабатывание, продольно-динамическая реакция, однотрубная тормозная система, двухтрубная тормозная система, прототипирование

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-45-55

### Abstract

The article demonstrates the results of the study of the pneumatic processes of standard and upgraded rolling stock braking systems. The

purpose of the study was to identify the shortcomings of the classical pneumatic braking system that affect the current level of safety and speed of freight trains, as well as the possibility of eliminating them by upgrading the existing braking system using a two-tube power supply.

Based on the data obtained from the study of the upgraded braking system performed in laboratory conditions, as well as data obtained from experiments conducted on trains, graphs of the dependence of the compressed air pressure of the brake line, brake cylinders and feed line on time for the new braking system are compiled.

According to the results of the performed studies, it was concluded that the standard braking system has a number of disadvantages associated with the speed of gas dynamic processes and the uneven distribution of pressure in the brake cylinders along the length of the train. The study found that the two-tube braking system will increase the speed and safety of trains.

**Keywords:** rolling stock, exhaustion, pneumatic process, accidental actuation, longitudinal dynamic reaction, single-tube braking system, double-tube braking system, prototyping

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-45-55

## 1. Введение

Большая протяженность путей и самый высокий по сравнению с другими видами транспорта объем грузооборота делают железнодорожные перевозки основой функционирования экономики России [1]. Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [2] и долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» [3] основными направлениями определены увеличение массы, скорости и повышение безопасности движения поездов.

Однако повышение массы поезда приводит к снижению скорости движения. Например, за 30 лет средняя масса поездов увеличилась на 30 %, в то время как техническая скорость в 2023 г. составила 42,4 км/ч, т. е. ненамного превысила показатели за 1960 г. Участковая скорость достигла 37,6 км/ч, что соответствует значению 1997 г. [4]. Для одновременного повышения и массы, и скорости грузового поезда требуется увеличение длины тормозного пути, т. е. снижение безопасности движения,

что недопустимо. Поэтому очевидным вариантом решения проблемы становится снижение допустимой скорости.

Так как для обеспечения безопасности движения используется пневматическая тормозная система, можно сделать вывод, что если с ростом массы падает скорость, то тормозная система не способна выполнять свои функции. Это представляет собой серьезную проблему, в определенной степени ограничивающую развитие железнодорожного транспорта. Поскольку показателем эффективности работы тормозной системы является скорость протекания газодинамических процессов [5], в нашем исследовании были поставлены следующие задачи:

анализ газодинамических процессов в тормозных цилиндрах в режиме отпуска при однотрубной и двухтрубной тормозных системах;

изучение процесса истощимости тормозной системы при циклических торможениях;

оценка влияния скорости протекания газодинамических процессов на скорость движения грузового поезда.

## 2. Экспериментальное исследование работы пневматических тормозов при двух способах организации питания запасного резервуара

Для проведения экспериментальных исследований однотрубной тормозной системы в тормозную магистраль и тормозные цилиндры головной и хвостовой части грузового поезда (1-й и 70-й вагон) были установлены тензометрические датчики давления (рис. 1). Данные об изменении давления во времени передавались на микроконтроллерный блок системы мониторинга газодинамических процессов [6, 7] и записывались на съемный носитель памяти.

Из рис. 1 видно, что в тормозной магистрали хвостового вагона давление на 6 % ниже, чем зарядное давление в головном вагоне на момент торможения. Процесс зарядки тормозной магистрали для первого вагона завершается за 190–200 с, но для хвостового вагона этого времени недостаточно, и к моменту следующего торможения процесс зарядки тормозной магистрали еще не завершился. Поэтому давление

в тормозном цилиндре последнего вагона на 14 % ниже, чем в тормозном цилиндре первого вагона.

При более детальном рассмотрении пневматических процессов в режиме отпуска и зарядки была выявлена разница скорости их протекания в тормозной системе головной и хвостовой частей (рис. 2).

Как видно из рис. 2, в хвостовом вагоне время от перевода ручки крана машиниста в первое положение до срабатывания воздухораспределителя на отпуск составляет  $t_2 = 11$  с, это на 45 % больше, чем в головном вагоне, и является следствием недостаточности давления в тормозной магистрали хвостовой части состава.

Отметим, что в головных вагонах поезда сила прижатия тормозной колодки снижается быстрее, в результате возрастают продольно-динамические усилия. Это может привести к самопроизвольному срабатыванию пневматических тормозов, повреждению автосцепных устройств и другим негативным последствиям, что влияет на текущий уровень безопасности движения [8, 9].

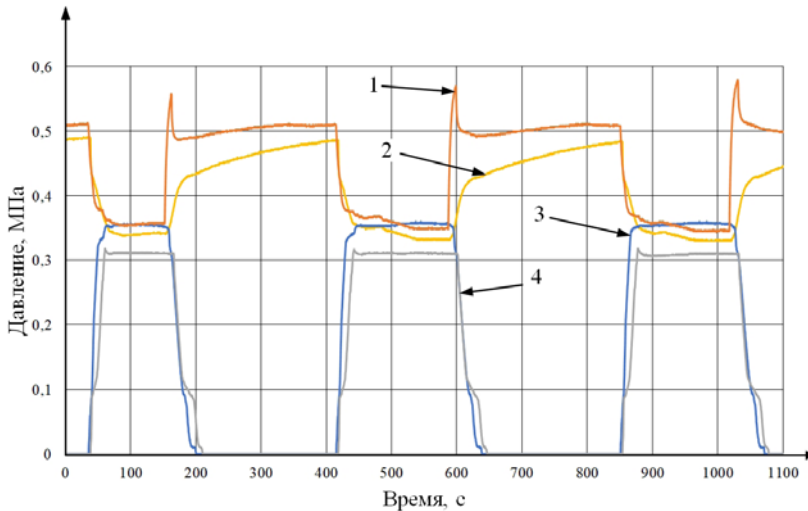


Рис. 1. Пневматические процессы в тормозной системе грузового поезда при однотрубном питании: зависимость давления от времени в тормозном цилиндре (1) и тормозной магистрали (2) первого вагона; то же в тормозном цилиндре (3) и тормозной магистрали (4) семидесятого вагона



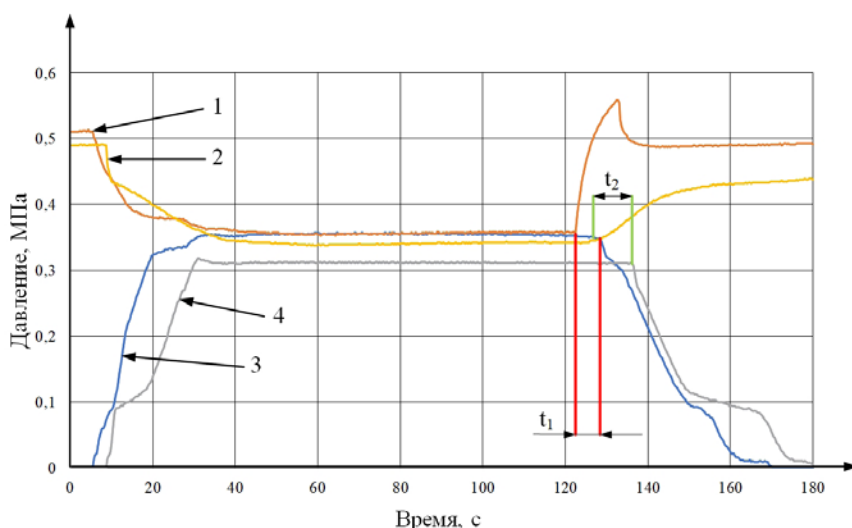


Рис. 2. Сравнение пневматических процессов в тормозной системе грузового поезда в режиме отпуска при однотрубном питании: зависимость давления от времени в тормозном цилиндре (1) и тормозной магистрали (3) первого вагона; то же в тормозном цилиндре (2) и тормозной магистрали (4) семидесятого вагона;  $t_1$  и  $t_2$  – время с момента перевода ручки крана машиниста в положение отпуска и зарядки до начала снижения давления в тормозных цилиндрах для головного и хвостового вагонов соответственно

Однако одновременный отпуск тормозов невозможен при движении по ломаному профилю пути. Согласно [10], при движении на горно-перевальных участках в поездах повышенного веса и длины для предупреждения разрыва автосцепок после отпуска автотормозов разрешается включение до 25 % воздухораспределителей вагонов на горный режим с головы поезда обычного формирования весом более 6,0 тыс. тс и длиной более 350 осей, а также с головной части первого состава соединенного поезда весом от 6,0 до 12,0 тыс. тс.

Истощимость при циклических торможениях – наиболее существенный недостаток тормозной системы. Каждый последующий цикл торможения и отпуска приводит к более низкому давлению в тормозных цилиндрах (рис. 3). А при отпуске увеличивается время задержки между управляющим воздействием и моментом снижения давления в тормозном цилиндре. В [10] определены нормы управления пневматическими тормозами подвижного состава,

в которых установлены требования по предупреждению истощения тормозной системы. Но даже при соблюдении требуемой минимальной выдержки между торможениями (не менее 60 с) истощимость тормозной системы не прекращается.

В нашем эксперименте выдержка времени между первым и вторым торможением составила 65 с. Но при втором торможении давление в тормозном цилиндре первого вагона при одинаковой разрядке тормозной магистрали снизилось на 5 %, а в хвостовом вагоне – более чем на 35 %. При этом для третьего торможения, когда выдержка времени составила менее 30 с и для первого, и для семидесятого вагона, давление в тормозном цилиндре по отношению к предыдущему торможению изменилось на 5 %. Таким образом, соблюдение правил управления тормозами при выполнении циклических торможений не позволяет обеспечить требуемый уровень безопасности движения. Согласно [10], для предупреждения истощимости

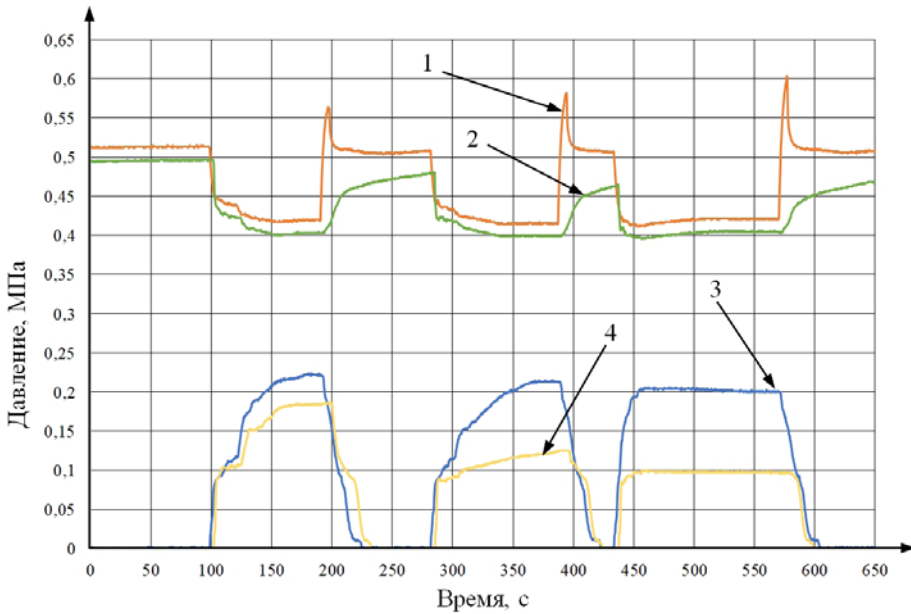


Рис. 3. Пневматические процессы в тормозной системе грузового поезда с однотрубной тормозной системой при истощении тормозной магистрали: зависимость давления от времени в тормозном цилиндре (1) и тормозной магистрали (3) первого вагона; то же в тормозном цилиндре (2) и тормозной магистрали (4) семидесятого вагона

разница давления в головной и хвостовой части состава не должна превышать 0,04 МПа. В нашем эксперименте она была не больше 0,02 МПа, несмотря на это, так как тормозная магистраль хвостовой части заряжается значительно дольше, времени на зарядку требуется не менее 150 с, что в 2,5 раза выше установленного значения.

Одним из возможных способов предотвратить истощение тормозной системы и повысить скорость заполнения и разрядки тормозных цилиндров может стать организация двухтрубного питания тормозной системы. Эффективность разработанной в [11] двухтрубной тормозной системы была подтверждена в статьях [12, 13]. Однако рассмотренная в [12] математическая модель разрядки тормозной магистрали и заполнения тормозных цилиндров построена на основе экспоненциальных зависимостей, что носит, скорее, наглядный характер, так как не учитывает реальные свойства тормозной системы и не

отражает реальные газодинамические процессы. Это потребовало выполнения лабораторных экспериментов [13], в которых был сделан сравнительный анализ газодинамических процессов, протекающих в тормозных цилиндрах в режиме торможения при двух способах организации питания запасного резервуара, а также процесса истощимости запасного резервуара.

Так как ранее не изучалось влияние двухтрубной тормозной системы на скорость газодинамических процессов в тормозном цилиндре в режиме отпуска, это потребовало дополнительных исследований на лабораторном стенде [13]. При аналогично определенных значениях периодов времени  $t_1$  и  $t_2$  было установлено, что  $t_1$  уменьшились на 45 % по отношению к  $t_2$  (рис. 4), т. е. при двухтрубном питании время отпуска сократилось.

Истощимость, разница тормозных сил и скорости отпуска тормозов в совокупности с индивидуальными

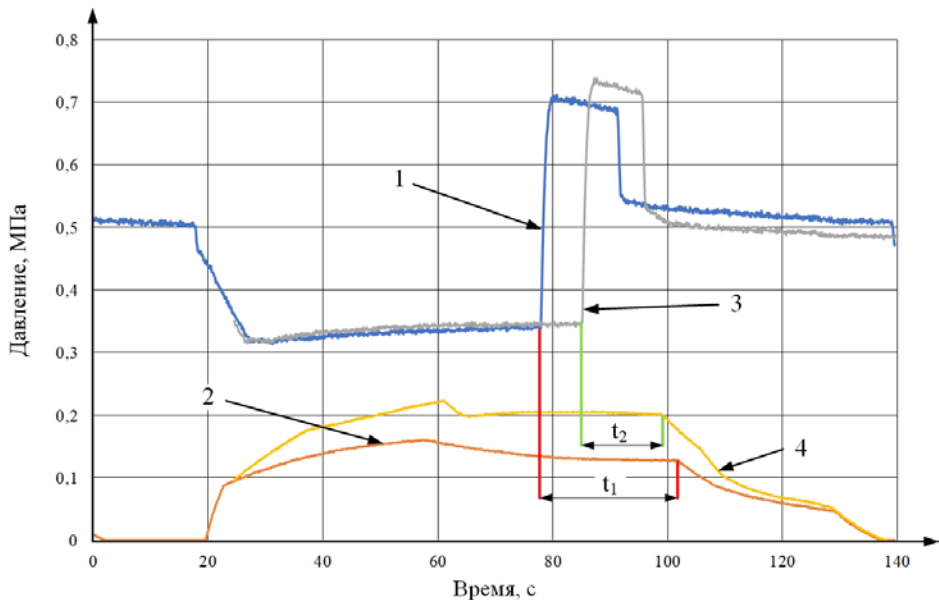


Рис. 4. Сравнение пневматических процессов в тормозной системе грузового поезда в режиме отпуска для однотрубной и двухтрубной тормозных систем: зависимость давления от времени в тормозном цилиндре (1) и тормозной магистрали (2) однотрубной тормозной системы; то же в тормозном цилиндре (3) и тормозной магистрали (4) двухтрубной тормозной системы

характеристиками тормозной системы каждого вагона и неисправностями пневматической части могут стать причиной замедленного отпуска либо полного неотпуска тормозов, вследствие чего повышается вероятность возникновения юза колесных пар [14]. Помимо этого снижается ресурс тормозной колодки, что требует проведения дополнительных исследований (в том числе с использованием современных цифровых технологий [15]) о влиянии скорости протекания газодинамических процессов на износ рабочей поверхности катания. Механизм образования юза и, как следствие, ползуна начинается с того, что в процессе движения происходит значительный разогрев колодок и поверхности катания колеса. При остановке поезда из-за разогрева трущихся поверхностей может произойти фрикционное сваривание прижатой к кругу катания колодки с колесом, а соответственно заклинивание колесной пары и возникновение ползунов глубиной более 30 мм [16].

Модернизация однотрубной тормозной системы за счет двухтрубного питания позволит решить эти проблемы. Дополнительно двухтрубное питание частично обеспечивает зарядку тормозов во время перекрыши при следовании поезда на тормозах [17], что расширяет возможный диапазон способов управления тормозами в процессе движения, а значит, увеличивает техническую и участковую скорости.

### 3. Влияние скорости протекания газодинамических процессов на скорость движения грузовых поездов

При двухтрубной тормозной системе процесс заполнения тормозного цилиндра ускоряется на 50 % [12, 13]. За счет этого при одинаковом времени выдержки ручки крана машиниста в четвертом положении и одинаковой выдержке времени между торможениями  $t_1^B = t_2^B$  для однотрубной и двухтрубной тормозных систем сокращается время

торможения и время заполнения тормозных цилиндров  $t_1^3 < t_2^3$ . Это позволяет осуществлять следующий цикл торможения-отпуска быстрее, чем при однотрубной системе, что положительным образом влияет на скорость движения поезда (рис. 5). Таким образом, максимальное снижение скорости движения до значения, при котором происходит отпуск тормозов  $V_{отп}$  для однотрубной системы, становится меньше и достигает уровня  $V'_{отп}$ , что увеличивает среднюю скорость движения по участку.

Зарядка запасного резервуара через дополнительный трубопровод питательной магистрали еще в процессе торможения сокращает объем сжатого

воздуха, поступающего через воздухо-распределитель в запасный резервуар, вследствие чего ускоряется процесс зарядки тормозной магистрали поезда. Следовательно, появляется возможность снижать время выдержки при циклических торможениях, а значит, чаще осуществлять регулировочные торможения и поддерживать скорость движения на уровне, приближенном к максимально допустимой скорости (рис. 6). Сокращение времени заполнения тормозного цилиндра и времени выдержки между торможениями  $t_1^B > t_2^B$  при модернизированной системе позволяет снизить скорость при втором торможении до  $V''_{отп}$ , где  $V''_{отп} > V'_{отп} > V_{отп}$ .

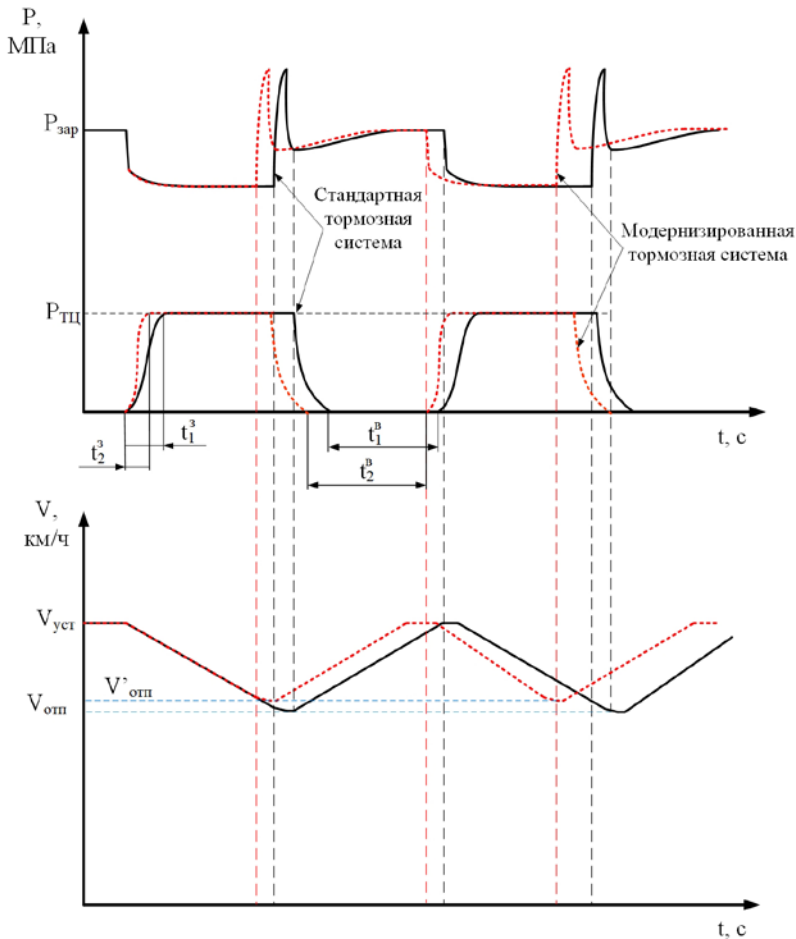


Рис. 5. Влияние скорости наполнения тормозного цилиндра на скорость движения подвижного состава

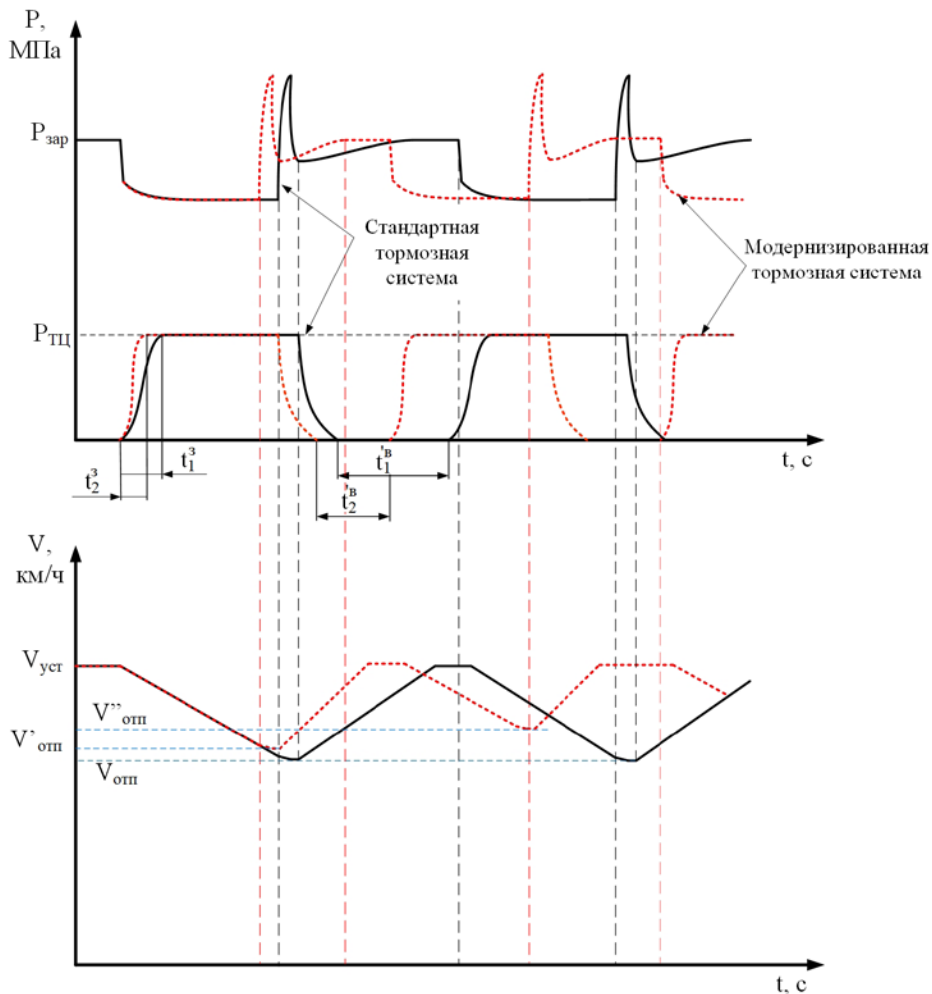


Рис. 6. Влияние сокращения времени выдержки между торможениями вследствие неистощимости при циклических торможениях на скорость движения подвижного состава

## Выводы

Таким образом, на основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что использование на грузовом подвижном составе однотрубной тормозной системы, особенно в условиях тенденции к увеличению массы и длины поездов, накладывает ограничения на функционирование всей сети железных дорог. Это связано с тем, что уже сейчас при стандартной длине состава в 70 вагонов наблюдается недостаточность давления в тормозной магистрали и тормозных цилиндрах в хвостовых

вагонах состава. При дальнейшем увеличении длины поезда доля вагонов с пониженной эффективностью торможения будет расти, что подтвердили результаты выполненного исследования.

В качестве одного из решений проблем предложено использовать двухтрубную тормозную систему. Проведенные ранее исследования доказали ее эффективность в отношении скорости срабатывания системы на торможение, а наше исследование доказывает ее преимущество в скорости протекания пневматических процессов в режиме отпуска. Все эти факторы позволяют

сделать предположение, что двухтрубная тормозная система выполняет циклические торможения со значительно меньшей выдержкой времени между торможениями, чем существующая, и в конечном счете способна обеспечить повышение скорости и безопасности движения грузовых поездов. ■

### Литература

1. Борискина Ю. И., Костина О. И. Развитие железнодорожного транспорта и его роль в экономике России // Актуальные вопросы экономики региона: анализ, диагностика и прогнозирование : материалы VI Международной студенческой научно-практической конференции, Нижний Новгород, 6 апреля 2016 г. Нижний Новгород : Стимул-СТ, 2016. С. 171–174.
2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010> (дата обращения: 29.10.2023).
3. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 г. № 466-р. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293730/4293730950.pdf> (дата обращения: 29.10.2023).
4. Долгосрочная динамика скоростей железнодорожного транспорта 1950–2023. URL: [https://f-husainov.livejournal.com/889662.html?utm\\_source=3userpost](https://f-husainov.livejournal.com/889662.html?utm_source=3userpost) (дата обращения: 29.10.2023).
5. Хамнаева А. А. Повышение эффективности пневматической тормозной системы грузового подвижного состава в режиме зарядки и отпуска : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2023. 199 с.
6. Мониторинг газодинамических процессов воздухораспределителя грузового подвижного состава / А. С. Ковшин, А. А. Хамнаева, П. Ю. Иванов [и др.] : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020660869 Рос. Федерация. № 2020660007; заявл. 04.09.2020; опубли. 15.09.2020.
7. Сбор и обработка данных с тензометрических датчиков пневматического оборудования / А. С. Ковшин, А. А. Хамнаева, П. Ю. Иванов [и др.] : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020660868 Рос. Федерация. № 2020660008; заявл. 04.09.2020; опубли. 15.09.2020.
8. Процесс самопроизвольного срабатывания пневматических тормозов грузового подвижного состава / П. Ю. Иванов, Н. Л. Михальчук, Е. И. Макарова, И. А. Ролле // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 1 (65). С. 60–66. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).60-66.
9. Определение причин самопроизвольных срабатываний тормозов поезда в границах Красноярской железной дороги / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский, И. А. Худоногов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 3 (59). С. 68–76. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).68-76.
10. О вводе в действие правил технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : распоряжение ОАО «Российские железные дороги» от 03.09.2014 г. № 2017-р. URL: <https://rcit.su/techinfoX9.html> (дата обращения: 29.10.2023).
11. Двухтрубная тормозная система железнодорожного подвижного состава / П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева, А. М. Худоногов [и др.] : патент 2740624 Рос. Федерация. № 2020121882; заявл. 26.06.2020; опубли. 18.01.2021, Бюл. № 2.
12. Сравнительный анализ тормозных систем подвижного состава с однострубно и двухтрубным питанием / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. А. Хамнаева [и др.] // Вестник РГУПС. 2020. № 3. С. 35–42. DOI: 10.46973/0201-727X\_2020\_3\_35.
13. Двухтрубная тормозная система на железнодорожном подвижном составе / Д. В. Осипов, П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский [и др.] // Транспорт Российской Федерации. 2022. № 4–5 (101–102). С. 38–41. ISSN 1994-831X.
14. Карпычев В. А. Разработка метода системного анализа автотормоза грузового подвижного состава : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2000. 316 с.

15. Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю., Емельянов Д. О. Реверсивный инжиниринг в исследовании элементов тормозных систем // Вестник УрГУПС. 2023. № 3 (59). С. 80–86. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-3-80-86.
16. Иванова Т. В., Налабордин Д. Г. Эмпирическая оценка интенсивности образования ползуна при движении заклиненной колесной пары при движении грузового вагона // Вагоны и вагонное хозяйство. 2021. № 2 (66). С. 33–35. ISSN 1817-6089.
17. Зарубежный опыт повышения эффективности пневматических тормозов / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, Н. И. Мануилов // Локомотив. 2020. № 11 (767). С. 36–37. ISSN 0869-8147.

#### References

1. Boriskina Yu. I., Kostina O. I. The development of railway transport and its role in the Russian economy. *Topical issues of the region's economy: analysis, diagnosis and forecasting* : proceedings of the 6th International student's scientific and practical conference, Nizhniy Novgorod, April 6, 2016. Nizhniy Novgorod : Stimulus-ST, 2016. Pp. 171–174. (In Russian).
2. Strategy for development of railway transport in the Russian Federation until 2030 : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 17.06.2008 No. 877-r. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010> (access date: 29.10.2023). (In Russian).
3. Long-term development program of the JSC «Russian Railways» until 2025 : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 19.03.2019 No. 466-r. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293730/4293730950.pdf> (access date: 29.10.2023). (In Russian).
4. Long-term dynamics of railway transport speeds in the Russian Federation 1950–2023. URL: [https://f-husainov.livejournal.com/889662.html?utm\\_source=3userpost](https://f-husainov.livejournal.com/889662.html?utm_source=3userpost) (access date: 29.10.2023). (In Russian).
5. Khamnaeva A. A. Improving the efficiency of the pneumatic braking system of freight rolling stock in charging and release mode : PhD in Engineering Thesis. St. Petersburg, 2023. 199 p. (In Russian).
6. Kovshin A. S., Khamnaeva A. A., Ivanov P. Yu. [et al.]. Monitoring of gas dynamic processes of the air distributor of freight rolling stock : certificate of state registration of a computer program 2020660869 Russian Federation. No. 2020660007; filed 04.09.2020; publ. 15.09.2020. (In Russian).
7. Kovshin A. S., Khamnaeva A. A., Ivanov P. Yu. [et al.]. Data collection and processing from strain gauges of pneumatic equipment : certificate of state registration of a computer program 2020660868 Russian Federation. No. 2020660008; filed 04.09.2020; publ. 15.09.2020. (In Russian).
8. Ivanov P. Yu., Mikhal'chuk N. L., Makarova E. I., Rolle I. A. The process of accidental actuation of freight rolling stock pneumatic brakes. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2020. No. 1 (65). Pp. 60–66. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).60-66. (In Russian).
9. Ivanov P. Yu., Manuilov N. I., Dul'skii E. Yu., Khudonogov I. A. Improving the controllability of brakes of trains. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2018. No. 3 (59). Pp. 68–76. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).68-76. (In Russian).
10. On the entry into force of the rules for the maintenance of braking equipment and brake control of railway rolling stock : the Order of JSC «RZD» dated 03.09.2014 No. 2017-r. URL: <https://rcit.su/techinfoX9.html> (access date: 29.10.2023). (In Russian).
11. Ivanov P. Yu., Khamnaeva A. A., Khudonogov A. M. [et al.]. Double-tube braking system of railway rolling stock : patent 2740624 Russian Federation. No. 2020121882; filed 26.06.2020; publ. 18.01.2021, Bulletin No. 2. (In Russian).
12. Ivanov P. Yu., Dul'skij E. Yu., Khamnaeva A. A. [et al.]. Comparative analysis of the rolling stock brake systems with a single-pipe and two-pipe supply. *Vestnik RGUPS*. 2020. No. 3. Pp. 35–42. DOI: 10.46973/0201–727X\_2020\_3\_35. (In Russian).
13. Osipov D. V., Ivanov P. Yu., Dul'skiy E. Yu. [et al.]. Double-tube braking system on the railway rolling stock. *Transport of the Russian Federation*. 2022. No. 4–5 (101–102). Pp. 38–41. ISSN 1994-831X. (In Russian).
14. Karpichev V. A. Development of a method for system analysis of auto brakes of freight rolling stock : DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2000. 316 p. (In Russian).

15. Ivanov P. Y., Dulsky E. Y., Emelyanov D. O. Reverse engineering in the study of brake system elements. *Herald of the USURT*. 2023. No. 3 (59). Pp. 80–86. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-3-80-86. (In Russian).
16. Ivanova T. V., Nalabordin D. G. Empirical assessment of the intensity of the formation of a slider during the movement of a jammed wheelset during the movement of a freight car. *Railway Cars and Carriage Equipment*. 2021. No. 2 (66). Pp. 33–35. ISSN 1817-6089. (In Russian).
17. Ivanov P. Yu., Dulskiy E. Yu., Manuilov N. I. Foreign experience in improving the efficiency of pneumatic brakes. *Locomotive*. 2020. No. 11 (767). Pp. 36–37. ISSN 0869-8147. (In Russian).

*Статья сдана в редакцию 29 ноября 2023 года*



УДК 621.313.333.2

*А. В. Железняков, А. А. Кучеренко*

## Исследование технологии изготовления литых медных короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных тяговых двигателей

UDK 621.313.333.2

*A. V. Zheleznyakov, A. A. Kucherenko*

## Research of manufacturing technology of cast copper short-circuited rotor windings of asynchronous traction motors

### Аннотация

Статья посвящена процессу изготовления литых медных короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных тяговых двигателей. В качестве базовой рассмотрена технология, разработанная в Научно-исследовательском институте взрывозащищенного и рудничного электрооборудования с опытно-экспериментальным производством (НИИВЭ), г. Донецк, позволяющая производить энергоэффективные взрывозащищенные асинхронные двигатели для привода горных машин и ориентированная на применение только отечественных материалов и технологического оборудования.

При выполнении исследований изучен процесс приготовления расплава меди с заданной электропроводностью (технология плавки меди), подтверждена возможность изготовления литых медных короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных тяговых двигателей виброгравитационным способом, проанализированы условия интенсификации процесса заполнения формы и затвердевания медной отливки ротора (технология заливки меди).

В статье представлены основные результаты технологических исследований, которые могут быть использованы в качестве исходных данных для разработки промышленной технологии литья медных короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных тяговых двигателей типа АД914У1.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, тяговый электропривод, ротор, пакет ротора, короткозамкнутая обмотка, виброгравитационный способ литья, медная отливка  
DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-56-65

### Abstract

The article focuses on the manufacturing process of cast copper short-circuited rotor windings of asynchronous traction motors. The basic technology developed at the Scientific Research Institute of Explosion-Proof and Mine Electrical Equipment with Pilot Production (NIIVE), Donetsk, allows the production of energy-efficient explosion-proof asynchronous motors for driving mining machines and is focused on the use of only domestic materials and technological equipment.

During the research, the process of preparing a copper liquid melt with a given electrical conductivity (copper melting technology) was studied, the possibility of manufacturing cast copper short-circuited rotor windings of asynchronous traction motors by vibration gravity was confirmed, the conditions for intensifying the mold filling process and solidification of the copper casting of the rotor (copper casting technology) were analyzed.

The article presents the main results of technological research that can be used as initial data for the development of industrial casting technology for copper short-circuited rotor windings of AD914U1 type asynchronous traction motors.

**Keywords:** asynchronous motor, electric traction drive, rotor, rotor pack, short-circuited winding, vibro-gravity casting method, brass casting  
DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-56-65

*Статья рекомендована к публикации И. С. Цихалевским, канд. техн. наук, доцентом, Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: ITsihalovsky@usurt.ru.*

**Андрей Владимирович Железняков**, канд техн. наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника» Донецкого института железнодорожного транспорта, Донецк, ДНР, Россия. E-mail: zheleznyakov-64@mail.ru. ORCID 0009-0006-3436-0583.

**Александр Алексеевич Кучеренко**, канд техн. наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника» Донецкого института железнодорожного транспорта, Донецк, ДНР, Россия. E-mail: kaa-1951@mail.ru. ORCID 0009-0004-6173-3854.

© А. В. Железняков, А. А. Кучеренко, 2024

*The article is recommended for publication by I. S. Tsihalevskiy, PhD in Engineering, Associate Professor, Ural State University of Railway Transport. E-mail: ITsihalovsky@usurt.ru.*

**Andrey Vladimirovich Zheleznyakov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Automation, Telemechanics, Communications and Computer Technology Department, Donetsk Institute of Railway Transport, Donetsk, DPR, Russia. E-mail: zheleznyakov-64@mail.ru. ORCID 0009-0006-3436-0583.

**Alexander Alexeevich Kucherenko**, PhD in Engineering, Associate Professor of Automation, Telemechanics, Communications and Computer Technology Department, Donetsk Institute of Railway Transport, Donetsk, DPR, Russia. E-mail: kaa-1951@mail.ru. ORCID 0009-0004-6173-3854.

© A. V. Zheleznyakov, A. A. Kucherenko, 2024

При эксплуатации грузовых поездов большой массы и длины остро стоит проблема повышения надежности, безопасности и энергоэффективности электровозов, в том числе электровозов переменного тока. Ключевую роль здесь играет вопрос повышения энергоэффективности электровозов с асинхронным тяговым электроприводом (АТЭП). Один из инновационных путей решения этой проблемы – создание ресурсоэнергосберегающего электрооборудования, в частности асинхронных тяговых двигателей (АТД), обеспечивающих эффективную работу предприятий железнодорожного транспорта при существенной экономии потребления электроэнергии.

На перспективном тяговом подвижном составе предусматривается использование АТЭП, в состав которого входят АТД и система преобразования электроэнергии (трансформатор, статические полупроводниковые преобразователи, фильтровое и реакторное оборудование).

Выпуск АТД мощностью 1000–1200 кВт освоен отечественной промышленностью. В то же время элементная база для силовых статических преобразователей пока закупается по импорту. Но даже силовых полупроводниковых приборов требуемой мощности недостаточно для создания работоспособного АТЭП, так как необходимо разработать методы и алгоритмы управления ими [1].

Применение линейных асинхронных двигателей (ЛАД) с изменяемыми сопротивлениями короткозамкнутых обмоток вторичных элементов позволит расширить диапазон регулирования ЛАД, предназначенных для высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта, при больших тяговых усилиях (в том числе при пуске в ход) методом вытеснения тока в пазу вторичного элемента двигателя [2].

В работе [3] сделан вывод, что лучшая энергоэффективность электровоза серии 2ЭС7 по сравнению с электровозом серии ВЛ80С в трехсекционном исполнении достигается за счет меньшего

количества секций, а по сравнению с электровозом этой же серии в двухсекционном исполнении энергоэффективность достигается не за счет применения асинхронного тягового привода, а за счет использования режима рекуперации электроэнергии.

Авторы статей [4, 5] считают, что сегодня в России наиболее перспективными и удовлетворяющими требованиям энергетической эффективности и работоспособности остаются электровозы переменного тока с коллекторным приводом, которые могут быть модернизированы на основе использования новых выпрямительно-инверторных преобразователей и выпрямительных установок возбуждения с применением IGBT-транзисторов.

Оценка перспектив развития АТД показывает, что кардинальных изменений их конструкции в ближайшем будущем не предвидится, поэтому повышение энергоэффективности двигателей возможно путем усовершенствования проектирования с учетом условий эксплуатации и режимов нагружения, а также технологии изготовления [6].

Согласно исследованиям, проведенным в США, Франции, Италии, Германии, Польше, Бразилии, Индии и Корее, применение в асинхронных двигателях (АД) литой медной короткозамкнутой обмотки (ЛМКО) ротора вместо литой алюминиевой короткозамкнутой обмотки (ЛАКО) в значительной степени решает проблемы ресурсоэнергосбережения [7].

В Научно-исследовательском институте взрывозащищенного и рудничного электрооборудования с опытно-экспериментальным производством (НИИВЭ, Донецк) удалось решить эту задачу путем применения ЛМКО в роторах взрывозащищенных АД.

Использование новой технологии изготовления ЛМКО при производстве взрывозащищенных АД позволило при тех же габаритных размерах двигателей обеспечить повышение мощности в 1,3–1,7 раза, КПД – на 1,5–3,0 %,

перегрузочной способности – в 1,4–1,7 раза, показателей надежности – в 1,5–2,5 раза.

Электродвигатели нового поколения способствуют увеличению энерговооруженности электропривода на 30–70 % за счет повышения мощности АД без изменения установочно-присоединительных и габаритных размеров [8].

Использование ЛМКО ротора позволяет также решить одну из самых актуальных проблем современной техники – существенно уменьшить вредный уровень шума (на 15–20 дБА) и уровень вибрации (до класса вибрации 2 вместо 2,8) в широком диапазоне частоты (50–8000 Гц) с одновременным увеличением полезной мощности, перегрузочной способности, КПД, надежности и экономической эффективности [9].

Таким образом, целесообразно изучить возможность производства высокоэффективных асинхронных двигателей для тягового электропривода.

Представленное в настоящей статье исследование посвящено разработке научных основ технологии изготовления литой медной короткозамкнутой обмотки ротора тягового электродвигателя АД914У1 (габариты ротора: длина – 465, диаметр – 510 мм). В качестве макетных образцов для проведения экспериментов использованы пакеты роторов электродвигателей, габаритные размеры которых приведены в табл. 1.

Цель исследования заключалась в экспериментальном выяснении кон-

Таблица 1  
Габаритные размеры пакетов роторов

Длина, мм	Диаметр, мм	Количество, шт.
600	203	3
620	230	2
500	272	3
470	340	2

кретных условий получения бездефектных медных отливок короткозамкнутых обмоток роторов тяговых электродвигателей АД914У1 для разработки промышленной технологии, оснастки и оборудования.

В литейном производстве чистую медь относят к материалам с плохими литейными свойствами, что обусловлено ее низкой жидкотекучестью, в 2,7 раза меньшей, чем у алюминия (табл. 2). Преимущественно же медь используют для литья в виде сплавов, таких как бронза (с оловом) и латунь (с цинком).

В практике получения отливок из меди шихту плавят в слабоокислительной атмосфере, а расплав защищают слоем шлака, который наряду с этим собирает и связывает примеси, окислы, а также другие загрязнения расплава. Для наведения шлака в шихту еще в начале плавки вводят флюс. К числу эффективных флюсов относятся древесный уголь, бура, борная кислота, борный шлак и др. [10]. Нами для уменьшения окисления меди в период нагрева шихты использовался серебристый графит, а после расплавления

Таблица 2

Литейные свойства материалов

Металл, сплав	Чистота, %	Температура заливки, °С	Жидкотекучесть (длина спирали), мм	Способ литья
Цинк	99,99	453	110	В кокиль
Алюминий	99,75	706	95	В кокиль
Медь техническая	99,5	1150–1200	35	В кокиль
Бронза оловянная БРОФ6,5-0,4	–	–	117	В землю
Латунь ЛК80-3	–	950–1000	90	–

медь покрывалась легкоплавким флюсом – стеклом или борно-литиевой композицией.

Указанные меры, однако, не исключают, а лишь снижают окисление меди и насыщение ее водородом. Поэтому перед разливкой медь раскисляют. Эта операция в конечном счете определяет степень чистоты меди и является главной в технологии плавки.

Подобное двойное раскисление вызвано тем, что фосфористая медь отлочно усваивается и хорошо раскисляет расплав меди, но из-за неодинаковой в разных плавках окисленности меди может быть введено недостаточное или избыточное количество раскислителя. В таких случаях электропроводность меди остается низкой (недораскисление) или ее будут снижать, вводя в качестве раскислителя фосфор (переокисление), влияние которого весьма сильно [10]. Поэтому фосфористую медь мы вводим с недостатком, а расплав дораскисляем цинком. Последний при погружении в жидкую медь испаряется и усваивается нестабильно, но возможное попадание в медь избыточного количества цинка намного меньше снижает электропроводность меди, чем избыток в ней фосфора.

Дальнейший анализ полученных данных показал, что электропроводность меди неодинакова уже в начале и в конце разливки большинства плавок: к концу разливки она снижается на 0,4–4 МСм/м (длительность разливки составляла от 0,5 до 1,7 мин). Причинами являются систематическое внесение в расплав избыточного количества раскислителя, а также длительное ведение процесса разливки.

Усовершенствование технологии заключается в том, что раскислитель вводится частями, и величина последней части зависит от действительной в этот момент электропроводности металла. Отобранная порция расходуется в течение 60–80 с для заливки одной формы, чем резко уменьшается изменение электропроводности меди в процессе разливки.

В новой технологии плавки исключительно важен предложенный экспресс-контроль электропроводности меди. Величина электропроводности измеряется прибором КЭП-1М непосредственно у печи на здесь же отлитых в кокиль пробах. Этот прибор имеет важное преимущество перед известным измерителем электропроводности ИЭ-1, так как пробы не требуется механически обрабатывать, что и делает возможным проведение экспресс-контроля.

Точность таких измерений, как показали исследования, весьма высока: абсолютные значения электропроводности проб меди, измеренных приборами КЭП-1М и ИЭ-1, статистически совпадают, а относительные погрешности составляют соответственно 1,2–1,8 и 0,4–1,2 %. Рассмотренная новая технология обеспечивает приготовление расплава меди с высокой и стабильной электропроводностью – от 55 до 57 МСм/м. В полном объеме технология изложена в проекте технологического процесса [11].

Для литья роторов с медной клеткой выбран гравитационный (классический) способ литья металла в кокиль при наклонном к горизонту до 5–7° положении сердечника с подводом металла в полость одного и переливом в выпор из полости другого короткозамыкающего кольца. Кокиль – специальная емкость, в которую заливается расплавленная масса металла. Расплавленный металл под действием силы гравитации заполняет все полости оснастки, полностью копируя форму заданного изделия. После полного охлаждения готовую деталь можно легко извлечь и отправить на механическую обработку. Кокиль обычно изготавливают из чугуна, благодаря чему допустимо его многократное применение.

Можно перечислить множество причин того, почему именно данный способ нашел наибольшее распространение, но основные из них – относительная простота и дешевизна по сравнению с другими способами, что отражается на конечной стоимости отливок. При таком

способе литья клетки роторов получают плотными, без литейных дефектов. Тем не менее для литья из меди короткозамкнутых обмоток роторов выбранный способ потребовалось существенно усовершенствовать.

Вибрационный способ заливки короткозамкнутых обмоток роторов заключается в том, что в процессе заливки и кристаллизации металла форма (кокиль) находится на столе, которому сообщается колебательное движение.

На рис. 1 показана форма для получения отливков роторов виброгравитационным способом, которая состоит из двух матриц 1 и прилегающих к ним щек 2, пакета ротора 3, собранного и сжатого на оправке 4 с буртом и зафиксированного на ней через упорное кольцо 5 двумя поперечными шпонками 6.

Щека 2 соединена с матрицей 1 двумя колонками 7, каждая из которых зафиксирована с одной стороны ее буртом (утоплен заподлицо), а с другой – клином 8. На наружную цилиндрическую поверхность сердечника 3 нанесен теплоизолирующий слой 9 листового материала толщиной 2–3 мм и стянут через 70–100 мм стальной проволокой 0,5 мм.

Литейная форма собирается в жесткое, герметичное по отношению к расплаву меди целое при помощи оправки 4 с двумя опорными кольцами 10 и клиньями 11 и четырех тяг 12 с буртом и клином 13 по краям. В рабочем положении литейная форма устанавливается так, что оправка 4 располагается горизонтально или наклонно, а матрицы 1 со щеками 2 образуют две воронки: одна – заливочную форму (литник), а другая – переливную (выпор).

Применяя виброгравитационный способ, ЛМКО роторов изготавливают следующим образом. Вначале на предварительно подогретые до 150 °С рабочие поверхности матрицы 1 и щек 2 наносят защитное покрытие, составленное в долях к воде из огнеупорной глины – 2,5, жидкого стекла – 0,6, перманганата калия – 0,005 и воды – 10 кг. Затем каждую матрицу 1 собирают с соответствующей щекой 2 на двух колонках 7 и фиксируют двумя клиньями 8. Через одну собранную таким образом матрицу со щекой продевают четыре тяги 12, укладывают матрицу горизонтально на подставку, вертикально устанавливают в нее пакет ротора 3 на оправке 4 и сверху на указанные оправку и тяги

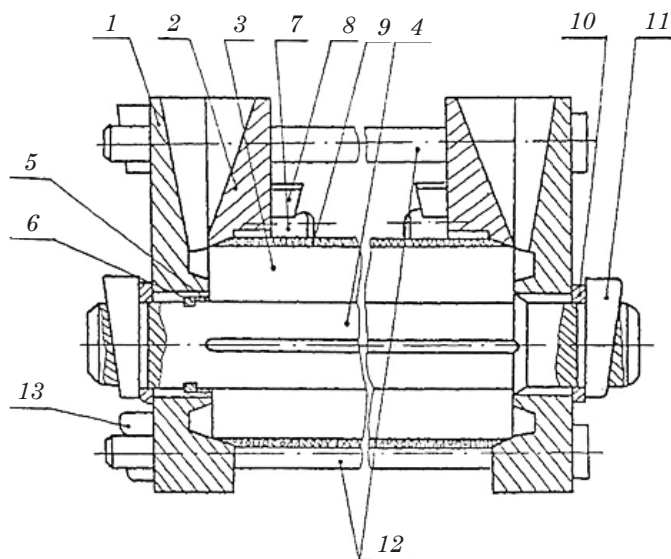


Рис. 1. Заливочная форма совместно с пакетом ротора

надевают вторую матрицу 1, собранную со второй щекой 2.

После этого на оправку 4 надевают упорное кольцо 10, в нее забивают клин 11, а в тяги 12 забивают клинья 13. Собранную таким образом часть формы поворачивают и устанавливают горизонтально, надевают второе упорное кольцо 10 с другой стороны оправки, вбивают в нее клин 11 и дополнительно подбивают клинья 13 в тягах 12.

Далее литейную форму помещают в печь и подогревают до определенной температуры. Подогретую литейную форму извлекают из печи и устанавливают на вибрационный стенд. Именно к этому времени заканчивают приготовление расплава меди (перегрев, раскисление, счистка шлака), включают вибрационный стенд и при температуре 1280–1300 °С расплав меди заливают в литейную форму. По окончании заливки литейную форму продолжают подвергать действию вибрации еще в течение 1–2 мин, а спустя 3–5 ч форму раскрывают, выполняя разборку в обратном порядке описанной выше операции сборки. После охлаждения отливки литники от нее отрубает и на этом заканчивают

изготовление ЛМКО ротора виброгравитационным способом.

Итак, изложенная выше технология изготовления ЛМКО роторов асинхронных двигателей отличается от действующей технологии литья таких же роторов из алюминия в сущности тем, что сердечник теплоизолируют по наружной цилиндрической поверхности или же подогрев сердечника производят в собранной литейной форме. Указанные решения позволяют резко замедлить снижение температуры расплава меди в процессе заполнения формы и именно этим обеспечивают возможность качественной отливки ЛМКО ротора (рис. 2).

Интервал температур подогрева сердечника 600–760 °С является оптимальным. Если температура сердечника при заливке формы ниже 600 °С, то в производстве роторов с ЛМКО появляется брак по недоливам; если же температура выше 760 °С, возможен брак по вытеканию металла из литейной формы, и лишь при подогреве сердечников роторов до температуры в интервале от 600 до 760 °С клетки роторов получаются без литейных дефектов.

Технологическую операцию заливки исследовали в 10 экспериментах в два

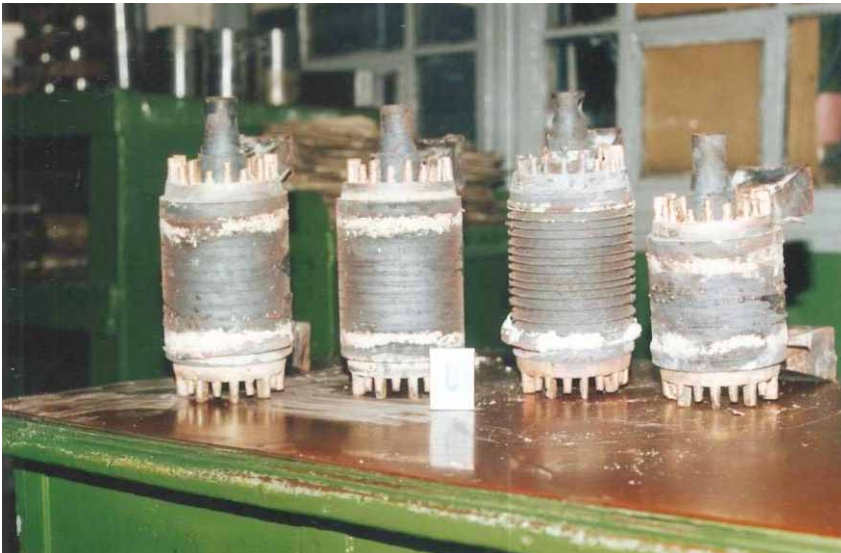


Рис. 2. Роторы с ЛМКО

этапа: первый этап составили эксперименты 1–4, второй – эксперименты 5–10 [11].

Исследования проводили при отливке из меди обмоток роторов специальных электродвигателей (макеты образцов роторов тягового электродвигателя АД914У1). В каждом эксперименте отливали один ротор.

Шихту массой 150 кг составляли на 100 % из меди марки М1 в виде прутков (10×20 мм) и пластин сечением 10×100×250 мм. Расплав готовили в печи ИСТ-0,16 в графитовом тигле (номинальная емкость печи 160 кг). В экспериментах 6 и 8 вводили соответственно 1 % (согласно проекту технологического процесса) и 2 % борно-литиевого флюса, в остальных экспериментах – 0,1 % черного или серебристого графита и 2 % стекла. Длительность плавки составляла от 1 ч 36 мин до 2 ч 18 мин (табл. 3) [11].

По достижении расплавом требуемой температуры (см. табл. 3) очищали шлак и раскисляли медь введением в кококольчике фосфористой меди в количестве 0,1 % и цинка 0,5 % от массы шихты. При выпуске металла в ковш вводили за два приема под струю еще

такое же количество цинка, очищали шлак и переносили расплав к форме.

В качестве ковша для расплава меди использовали графитошамотный тигель, который предварительно подогревали в камерной печи И45 (мощностью 50 кВт) до 500–700 °С.

Собранную литейную форму подогревали до 600–760 °С в течение 1,5–3 ч в другой камерной печи И45 (мощностью 50 кВт) с автоматической регулировкой температуры.

В эксперименте 1 использовали стенд для вибрации литейной формы. Для экспериментов 2–10 его модернизировали: упростили фиксацию литейной формы, понизили стол (для удобства заливки с пола), а с 6-го эксперимента на столе приварили опоры для наклона формы на 5–7° к горизонту.

Температуру расплава меди в экспериментах 1–5 измеряли термопарой ТХА с потенциометром Э111163, в экспериментах 6–10 – с помощью оптического пирометра ОПИР-017, ГОСТ 8335 (см. табл. 3).

Амплитуду вибрации ( $\lambda$ , мм) измеряли виброметром УР102 (с магнитоэлектрическим датчиком). При горизонтальном положении формы

Таблица 3

Параметры технологии литья макетных образцов медных короткозамкнутых обмоток роторов специальных электродвигателей

№ п/п	Время		Температура, °С		Время заполнения формы, с	Габарит макета сердечника $L \times D$ , мм	Примечание
	подогрева сердечника	плавки меди	сердечника	меди			
1	3 ч 36 мин	1 ч 40 мин	760	1290	15	203×600	Годная отливка
2	3 ч 30 мин	1 ч 47 мин	750	1280	12	203×600	То же
3	3 ч 42 мин	1 ч 47 мин	720	1270	16	203×600	– // –
4	3 ч 40 мин	1 ч 36 мин	700	1280	20	230×620	– // –
5	3 ч 40 мин	2 ч 05 мин	670	1290	18	230×620	– // –
6	4 ч 08 мин	1 ч 48 мин	660	1280	22	272×500	– // –
7	3 ч 10 мин	1 ч 43 мин	650	1300	20	272×500	– // –
8	3 ч 53 мин	1 ч 35 мин	640	1290	16	272×500	– // –
9	3 ч 03 мин	2 ч 18 мин	630	1290	14	340×470	– // –
10	3 ч 53 мин	1 ч 52 мин	620	1290	13	340×470	– // –

с залитым ротором на вибростенде амплитуда заливочной воронки составила  $\lambda_a = 0,04$  мм, выпора  $\lambda_b = 0,02$  мм [9].

Технология получения отливок из меди и ее сплавов изучена еще недостаточно. Однако в последние годы исследования активизировались: подбираются новые сплавы, в том числе и с высокой электропроводностью, совершенствуются технология плавки, технология заливки.

Исследования проводили при отливке из меди короткозамкнутых обмоток роторов специальных электродвигателей (пакеты роторов тягового электродвигателя АД914У1). В каждом эксперименте из оставшегося в ковше металла отливали пробу размером  $\varnothing 50 \times 30$  мм, обрабатывали ее снизу до эталонной чистоты и прибором ИЭ-1 измеряли электропроводность. Затем на короткозамкнутых кольцах зачищали площадки и прибором ИЭ-1 ориентировочно оценивали электропроводность меди колец роторов (табл. 4).

Интервал температур подогрева сердечника установлен для технологии литья из меди обмоток роторов ряда

специальных двигателей. Колебание температуры всего сердечника, а также неравномерность ее в самом сердечнике вызываются случайными сбоями и задержками в производственном процессе с момента извлечения сердечника из печи. В этом отношении значительно более надежной является технология с индукционным подогревом сердечника в собранной и установленной под заливку форме.

### Выводы

Подтверждена возможность приготовления расплава меди с электропроводностью  $\gamma \geq 50$  МСм/м по предлагаемой технологии плавки.

Разработаны основы технологии заливки медью короткозамкнутых обмоток роторов виброгравитационным способом: подвод металла – боковой с переливом в выпор при наклонном положении сердечника к горизонту  $5-7^\circ$ ; температура приготовленной для заливки меди –  $1280-1300$  °С, температура подогрева сердечника ротора с кокилем перед заливкой –  $600-760$  °С. ■

Таблица 4

Электропроводность меди, приготовленной для отливки роторов, и меди короткозамкнутых колец роторов (средние значения по пяти измерениям)

№ эксперимента	Электропроводность, МСм/м при 20 °С	
	проб расплава	колец отливок
1	–	54,5 <sup>1</sup>
2	55,5	–
3	57,6	–
4	52,0	–
5	53,2	–
6	54,5	–
7	57,7	57,4 <sup>1</sup>
8	57,6	57,3 <sup>2</sup>
9	57,9	57,8 <sup>2</sup>
10	57,8	–

<sup>1</sup> Измерено на грубо обточенной поверхности.

<sup>2</sup> Измерено на необработанной поверхности.



### Литература

1. Колпахчян П. Г. Методология комплексного моделирования и способы управления асинхронным тяговым приводом магистральных электровозов : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Новочеркасск, 2006. 402 с.
2. Регулируемый линейный асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой для магнитнолевитационного транспорта / В. А. Соломин, А. А. Бичилова, Л. Л. Замшина, Н. А. Трубицина // Транспортные системы и технологии. 2017. Т. 3. № 4. С. 127–149. ISSN 2413-9203.
3. Маринин С. А. Сравнение энергетической эффективности грузовых электровозов переменного тока с коллекторным и асинхронным тяговым приводом // Вестник УрГУПС. 2022. № 1 (53). С. 57–64. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-1-57-64.
4. Власьевский С. В., Малышева О. А., Грибенюк Д. В. Сравнительные возможности применения на электровозах переменного тока коллекторного и асинхронного привода // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2017. № 1. С. 9–20. ISSN 2227-1384.
5. Снижение издержек при выборе технологического оборудования испытательного стенда вспомогательных электрических машин электроподвижного состава / А. В. Бублик, В. В. Бублик, Н. В. Есин, О. В. Гателюк // Транспорт Урала. 2022. № 1 (72). С. 35–40. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-35-40.
6. Классификация магнитных усилителей сцепления и поиск новых решений тягового привода / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров [и др.] // Транспорт Урала. 2022. № 2 (73). С. 50–58. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-50-58.
7. Технологические аспекты изготовления литой медной короткозамкнутой обмотки ротора взрывозащищенных электродвигателей / В. А. Чувашев, В. Ю. Чуванков, А. В. Железняков [и др.] // Сборник научных трудов Украинского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института взрывозащищенного и рудничного электрооборудования с опытно-экспериментальным производством. Сер. : Взрывозащищенное электрооборудование, 2007. С. 225–241.
8. Чувашев В. А., Папазов Ю. Н., Велков А. А. Энергоэффективные асинхронные двигатели // Вестник Севастопольского государственного технического университета. 2008. Вып. 88. С. 92–97.
9. Чувашев В. А., Гривин С. А., Иванов В. А. Шумоподавляющие свойства медной литой короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя // Сборник научных трудов Украинского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института взрывозащищенного и рудничного электрооборудования с опытно-экспериментальным производством. Сер. : Взрывозащищенное электрооборудование, 2006. С. 157–172.
10. Murtxu K. S. Melting and casting of high conductivity cooper // British Foundryman. 1974. 67. No. 12.
11. Чувашев В. А., Чуванков В. Ю., Железняков А. В. Разработка документации технологической оснастки на экспериментальный образец ротора тягового электродвигателя АД914У1 с литой короткозамкнутой обмоткой из медного сплава : технический отчет по договору № 72 от 01.07.2005 г. / УкрНИИВЭ, 2005. 38 с.

### References

1. Kolpakchyan P. G. Methodology of complex modeling and methods of control of asynchronous traction drive of mainline electric locomotives : DCs in Engineering Thesis. Novocherkassk, 2006. 402 p. (In Russian).
2. Solomin V. A., Bichilova A. A., Zamshina L. L., Trybitsina N. A. Adjustable squirrel-cage linear induction motor for magnetic levitation transport. *Transportation Systems and Technologies*. 2017. Vol. 3. No. 4. Pp. 127–149. ISSN 2413-9203. (In Russian).
3. Marinin S. A. Comparison of the energy efficiency of AC electric freight locomotives with collector and asynchronous traction drive. *Herald of the USURT*. 2022. No. 1 (53). Pp. 57–64. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-1-57-64. (In Russian).
4. Vlashevsky S. V., Malysheva O. A., Gribenyuk D. V. Comparative opportunities of use on electric locomotives of the collector and asynchronous drive. *Vestnik of Sholom-Aleichem Priamursky State University*. 2017. No. 1. Pp. 9–20. ISSN 2227-1384. (In Russian).

5. Bublik A. V., Bublik V. V., Esin N. V., Gatelyuk O. V. Decrease of expanses at selection of technological equipment of inspection bench for auxiliary electrical machines of electric motive power. *Transport of the Urals*. 2022. No. 1 (72). Pp. 35–40. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-35-40. (In Russian).
6. Kosmodamianskiy A. S., Vorobyev V. I., Izmerov O. V. [et al.]. Classification of magnetic adhesion boosters and search for new decisions for traction drive. *Transport of the Urals*. 2022. No. 2 (73). Pp. 50–58. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-50-58. (In Russian).
7. Chuvashhev V. A., Chuvankov V. Yu., Zheleznyakov A. V. [et al.]. Technological aspects of manufacturing cast copper short-circuited rotor windings of explosion-proof electric motors. *Collection of research papers of the Ukrainian Scientific Research Design and Technological Institute of Explosion-Proof and Mine Electrical Equipment with Pilot Production. Series : Explosion-proof electrical equipment*, 2007. Pp. 225–241. (In Russian).
8. Chuvashhev V. A., Papazov Yu. N., Velkov A. A. Energy-efficient asynchronous motors. *Herald of Sevastopol State Technical University*. 2008. Issue 88. Pp. 92–97. (In Russian).
9. Chuvashhev V. A., Grivin S. A., Ivanov V. A. Noise-suppressing properties of a copper cast short-circuited rotor winding of an asynchronous motor. *Collection of research papers of the Ukrainian Scientific Research Design and Technological Institute of Explosion-Proof and Mine Electrical Equipment with Pilot Production. Series : Explosion-proof electrical equipment*, 2006. Pp. 157–172. (In Russian).
10. Murtxy K. S. Melting and casting of high conductivity cooper. *British Foundryman*. 1974. 67. No. 12.
11. Chuvashhev V. A., Chuvankov V. Yu., Zheleznyakov A. V. Development of documentation of technological equipment for an experimental sample of the rotor of AD914U1 traction electric motor with the cast short-circuited winding made of copper alloy : technical report on contract No. 72 dated 07.01.2005. UkrNIIVE, 2005. 38 p. (In Russian).

*Статья сдана в редакцию 29 января 2024 года*

# Управление в технических системах

УДК 629.4:620.179.162

*А. Н. Киреев, Ю. В. Ливцов, М. А. Киреева*

## Настройка функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры по боковому цилиндрическому отражателю при диагностировании деталей подвижного состава

УДК 629.4:620.179.162

*A. N. Kireev, Yu. V. Livtsov, M. A. Kireeva*

## Setting up the function of temporary adjustment of the ultrasonic equipment sensitivity by the lateral cylindrical reflector during rolling stock parts diagnosis

### Аннотация

Для повышения эффективности использования подвижного состава разработаны методы и средства технического диагностирования, которые применяют при техническом обслуживании и ремонтах, а также в качестве самостоятельного технологического процесса. Диагностирование позволяет повысить коэффициент

готовности, вероятность безотказной работы, ремонтно-контролепригодность подвижного состава, снизить стоимость его эксплуатации и трудоемкость технологических процессов.

В комплекс мероприятий тестового диагностирования входят операции ультразвукового неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железных

дорог на отсутствие внутренних недопустимых несплошностей.

Наибольшее распространение среди методов ультразвукового контроля получил эхоимпульсный, который относится к методам отражения.

Одной из самых ответственных операций в процессе ультразвукового контроля является настройка

*Статья рекомендована к публикации А. Н. Поповым, канд. техн. наук, доцентом, Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: ANPopov@usurt.ru.*

**Андрей Николаевич Киреев**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры железнодорожного транспорта Луганского государственного университета им. Владимира Даля, Луганск, ЛНР, Россия. E-mail: lifter\_23@mail.ru. ORCID 0000-0002-7548-3348.

**Юрий Владимирович Ливцов**, канд. техн. наук, заведующий кафедрой железнодорожного транспорта Луганского государственного университета им. Владимира Даля, Луганск, ЛНР, Россия. E-mail: livtsoff@yandex.com. ORCID 0000-0001-8747-7132.

**Маргарита Анатольевна Киреева**, старший преподаватель кафедры железнодорожного транспорта Луганского государственного университета им. Владимира Даля, Луганск, ЛНР, Россия. E-mail: kmagt@mail.ru. ORCID 0000-0001-7463-2682.

© А. Н. Киреев, Ю. В. Ливцов, М. А. Киреева, 2024

*The article is recommended for publication by A. N. Popov, PhD in Engineering, Associate Professor, Ural State University of Railway Transport. E-mail: ANPopov@usurt.ru.*

**Andrey Nikolaevich Kireev**, DSc in Engineering, Professor, Professor of Railway Transport Department, Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, LPR, Russia. E-mail: lifter\_23@mail.ru. ORCID 0000-0002-7548-3348.

**Yuriy Vladimirovich Livtsov**, PhD in Engineering, Head of Railway Transport Department, Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, LPR, Russia. E-mail: livtsoff@yandex.com. ORCID 0000-0001-8747-7132.

**Margarita Anatolyevna Kireeva**, Senior Lecturer of Railway Transport Department, Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, LPR, Russia. E-mail: kmagt@mail.ru. ORCID 0000-0001-7463-2682.

© A. N. Kireev, Yu. V. Livtsov, M. A. Kireeva, 2024

чувствительности ультразвуковой аппаратуры.

В статье представлены результаты исследования по разработке безэталонного метода настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры при диагностировании деталей подвижного состава с учетом затухания ультразвука по боковому цилиндрическому отражателю.

Для реализации метода разработан новый математический аппарат, в основу которого положены ключевые закономерности физической акустики, а также методы математического и физического моделирования.

Безэталонная настройка функции временной регулировки чувствительности позволяет избавиться от недостатков применения настроечных образцов с искусственными отражателями.

Для автоматизации расчетов при диагностировании деталей подвижного состава железных дорог ультразвуковым методом и учете затухания ультразвуковой волны по боковому цилиндрическому отражателю разработана программа NDTRT TSA SCR F-BCR.

**Ключевые слова:** подвижной состав, железная дорога, диагностирование, ультразвуковой контроль, ультразвуковой дефектоскоп, пьезоэлектрический преобразователь, временная регулировка чувствительности, боковой цилиндрический отражатель, плоскодонный цилиндрический отражатель

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-66-73

#### Abstract

To increase the efficiency of the use of rolling stock, methods and means of technical diagnostics have been developed, which are used during maintenance and repairs, as well as an independent technological process. Diagnosis makes it possible to increase the availability coefficient, the probability of trouble-free operation, repair and control suitability of rolling stock, reduce the cost of its operation and the complexity of technological processes.

The complex of test diagnostic measures includes operations of ultrasonic non-destructive testing of railway rolling stock parts and assemblies for the absence of internal unacceptable irregularities.

Pulse-echo method, which refers to reflection methods, has become the most widespread among ultrasonic control methods.

One of the most important operations in the process of ultrasonic testing is to adjust the sensitivity of ultrasonic equipment.

The article focuses on the results of a study on the development of a non-etalon method for adjusting the function of temporary sensitivity ultrasonic equipment setting when diagnosing rolling stock parts, taking into account the attenuation of ultrasound along a lateral cylindrical reflector.

To implement the method, a new mathematical apparatus has been developed, which is based on the key laws of physical acoustics, as well as the methods of mathematical and physical modeling.

The non-standard adjustment of the temporary sensitivity setting function allows to get rid of the disadvantages when using tuning samples with artificial reflectors.

A program NDTRT TSA SCR F-BCR has been developed to automate calculations when diagnosing railway rolling stock parts using the ultrasonic method and taking into account the attenuation of the ultrasonic wave along a lateral cylindrical reflector.

**Keywords:** rolling stock, railway, diagnosis, ultrasonic testing, ultrasonic instrument, piezoelectric sensor, electronic distance-amplitude compensation, side drill hole, flat-bottom cylindrical reflector

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-66-73

Подвижной состав железных дорог представляет собой сложнейшую систему, работоспособность которой зависит от технического состояния входящих в нее подсистем и элементов, а оценкой этого технического состояния, поиском дефектов и неисправностей занимается техническая диагностика [1, 2].

Техническая диагностика эффективно применяется не только при

производстве на предприятиях-изготовителях деталей и узлов разнообразных машин и агрегатов (пооперационный и выходной контроль), но и при их эксплуатации. Задачи технического диагностирования решаются с помощью тестового и функционального диагностирования. Первое применяется, когда объект не используется по назначению. На объект подаются входные тестовые воздействия, и фиксируется его

реакция, которая сравнивается с эталонной. При функциональном диагностировании тестовыми являются рабочие входные воздействия [2].

При производстве деталей и узлов железнодорожного подвижного состава одним из необходимых условий их нормальной эксплуатации является отсутствие дефектов типа нарушений сплошности (несплошностей).

Для выявления внутренних несплошностей наибольшее применение получил ультразвуковой метод неразрушающего контроля [3–7], который относится к методам тестового диагностирования.

Технология проведения ультразвукового контроля состоит из нескольких последовательно выполняемых операций. Важнейшей является настройка ультразвуковой аппаратуры, включающая в себя настройку шкалы расстояний ультразвукового дефектоскопа и настройку чувствительности.

Настройка чувствительности ультразвуковой аппаратуры осуществляется на настроечных образцах, форма, размеры и свойства материала которых соответствуют объекту контроля. В настроечных образцах выполняются искусственные отражатели на разной глубине в контролируемом диапазоне. Размер искусственного отражателя соответствует минимально допустимой в объекте контроля несплошности. В практике ультразвукового контроля деталей подвижного состава наибольшее распространение получил плоскодонный цилиндрический отражатель (ПЦО). Но вследствие множества технических причин изготовление искусственных отражателей в настроечных образцах может приводить к несоответствию техническим требованиям.

Эффективнее, с нашей точки зрения, является безэталонный метод настройки функции временной регулировки чувствительности (ВРЧ) ультразвуковой аппаратуры, предложенный в работе [8]. Данный метод имеет более высокую достоверность результатов ультразвукового контроля, так как

позволяет настроить чувствительность непосредственно на объекте контроля. Учет затухания ультразвуковой волны осуществляется по измеренному донному сигналу в объекте контроля.

Однако существуют объекты, в которых либо отсутствует донная поверхность в непосредственной акустической видимости ультразвукового луча, либо донная поверхность имеет высокую волнистость или шероховатость. В подобных случаях применять метод, предложенный в работе [8], не представляется возможным. В таких ситуациях для учета затухания в объекте контроля целесообразно использовать или конструктивные, или технологические отражатели. Например, в работе [9] предложен метод настройки функции ВРЧ по шпоночному пазу в объекте контроля. Кроме того, в деталях подвижного состава часто имеются либо конструктивные, либо технологические боковые цилиндрические сверления, ориентированные цилиндрической поверхностью параллельно поверхности ввода ультразвуковой волны, которые можно использовать для учета затухания при настройке функции ВРЧ ультразвуковой аппаратуры.

Цель нашего исследования состояла в разработке нового метода настройки функции ВРЧ ультразвуковой аппаратуры без применения настроечных образцов и при учете затухания ультразвуковой волны по боковому цилиндрическому отражателю (БЦО).

Для разработки математического аппарата нового метода применялись следующие аналитические зависимости [10, 11].

1. Аналитическая зависимость, описывающая амплитуду эхо-сигнала от БЦО:

$$N_{\text{БЦО}} = 20 \lg \left( \frac{S_a}{\lambda} \sqrt{\frac{d_{\text{БЦО}}}{8x_{\text{БЦО}}^3 \left( 1 + \frac{d_{\text{БЦО}}}{2x_{\text{БЦО}}} \right)}} e^{-2\delta x_{\text{БЦО}}} \right), \quad (1)$$

где  $S_a$  – площадь пьезоэлектрического преобразователя, мм<sup>2</sup>;  $\lambda$  – длина ультразвуковой волны, мм;  $d_{\text{БЦО}}$  – диаметр БЦО, мм;  $x_{\text{БЦО}}$  – расстояние от поверхности ввода ультразвуковой волны до отражающей поверхности БЦО, мм;  $\delta$  – коэффициент затухания ультразвуковой волны, Нп/мм.

2. Аналитическая зависимость для расчета коэффициента затухания ультразвуковой волны по измеренному эхо-сигналу от БЦО:

$$\delta = - \frac{\ln \left( \frac{8\lambda^2 x_{\text{БЦО}}^3 10^{N_{\text{БЦО}}/10} (1 + d_{\text{БЦО}}/(2x_{\text{БЦО}}))}{S_a^2 d_{\text{БЦО}}} \right)}{4x_{\text{БЦО}}}. \quad (2)$$

3. Аналитическая зависимость, описывающая амплитуду эхо-сигнала от плоскодонного цилиндрического отражателя (ПЦО):

$$N_{\text{ПЦО}} = 20 \lg \left( \frac{S_a S_{\text{ПЦО}}}{\lambda^2 x_{\text{ПЦО}}^2} e^{-2\delta x_{\text{ПЦО}}} \right), \quad (3)$$

где  $S_{\text{ПЦО}}$  – площадь ПЦО, мм<sup>2</sup>,  $x_{\text{ПЦО}}$  – расстояние от поверхности ввода ультразвуковой волны до ПЦО, мм.

Для реализации предложенного метода использовались следующие аналитические выражения.

1. Коэффициент усиления ультразвукового дефектоскопа [выражение находится из аналитических зависимостей (2) и (3)]:

$$K_{\text{ус}} = \left| 20 \lg \left( \frac{S_a S_{\text{ПЦО}}}{\lambda^2 x_{\text{к}}^2} Z^{x_{\text{к}}/2x_{\text{БЦО}}} \right) \right|, \quad (4)$$

где  $x_{\text{к}}$  – расстояние от поверхности ввода ультразвуковой волны до конечной точки настройки функции ВРЧ, мм;  $Z$  – компонент, отвечающий за затухание ультразвука в объекте контроля,

$$Z = \frac{8\lambda^2 x_{\text{БЦО}}^3 10^{N_{\text{БЦО}}/10} (1 + d_{\text{БЦО}}/(2x_{\text{БЦО}}))}{S_a^2 d_{\text{БЦО}}}.$$

2. Для настройки уровня ВРЧ применяется аналитическая зависимость

$$k_{\text{ВРЧ}} = N_{\text{ВРЧ}} - N_{\text{к}}, \quad (5)$$

где  $N_{\text{ВРЧ}}$  – амплитуда эхо-сигнала от ПЦО в точке настройки функции ВРЧ, дБ;  $N_{\text{к}}$  – амплитуда эхо-сигнала от ПЦО в конечной точке настройки функции ВРЧ, дБ.

3. Амплитуда эхо-сигнала от ПЦО в точке настройки функции ВРЧ находится из выражения

$$N_{\text{ВРЧ}} = 20 \lg \left( \frac{S_a S_{\text{ПЦО}}}{\lambda^2 x_{\text{ВРЧ}}^2} Z^{x_{\text{ВРЧ}}/2x_{\text{БЦО}}} \right), \quad (6)$$

где  $x_{\text{ВРЧ}}$  – расстояние от поверхности ввода ультразвуковой волны до ПЦО в точке настройки функции ВРЧ, мм.

4. Аналитическая зависимость для расчета уровня ВРЧ при учете затухания по БЦО [выражение находится из аналитических зависимостей (2), (3), (5), (6)]

$$k_{\text{ВРЧ}} = 20 \lg \left( \frac{x_{\text{к}}^2}{x_{\text{ВРЧ}}^2} Z^{x_{\text{ВРЧ}} - x_{\text{к}}/2x_{\text{БЦО}}} \right). \quad (7)$$

Начальная точка настройки функции ВРЧ  $x_{\text{н.ВРЧ}}$  (мм) выбирается из условия  $x_{\text{н.ВРЧ}} > S_a/\pi\lambda$ . Конечная точка настройки функции ВРЧ  $x_{\text{к.ВРЧ}}$  (мм) выбирается конкретно для каждого контролируемого объекта и зависит от величины зоны контроля. Минимальное количество точек настройки функции ВРЧ (координат маркера ВРЧ) – 3, рекомендуемое – 5 и более.

Для автоматизации расчетов при использовании безэталонного метода настройки функции ВРЧ ультразвукового дефектоскопа с учетом затухания ультразвуковой волны по БЦО разработана программа NDTRT TSA SCR F-BCR. Алгоритм программы в виде блок-схемы представлен на рис. 1. Идентификация функций и переменных в разработанном алгоритме приведена в табл. 1. Окна программы показаны на рис. 2 и 3.

Работа с программой NDTRT TSA SCR F-BCR осуществляется в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 1.

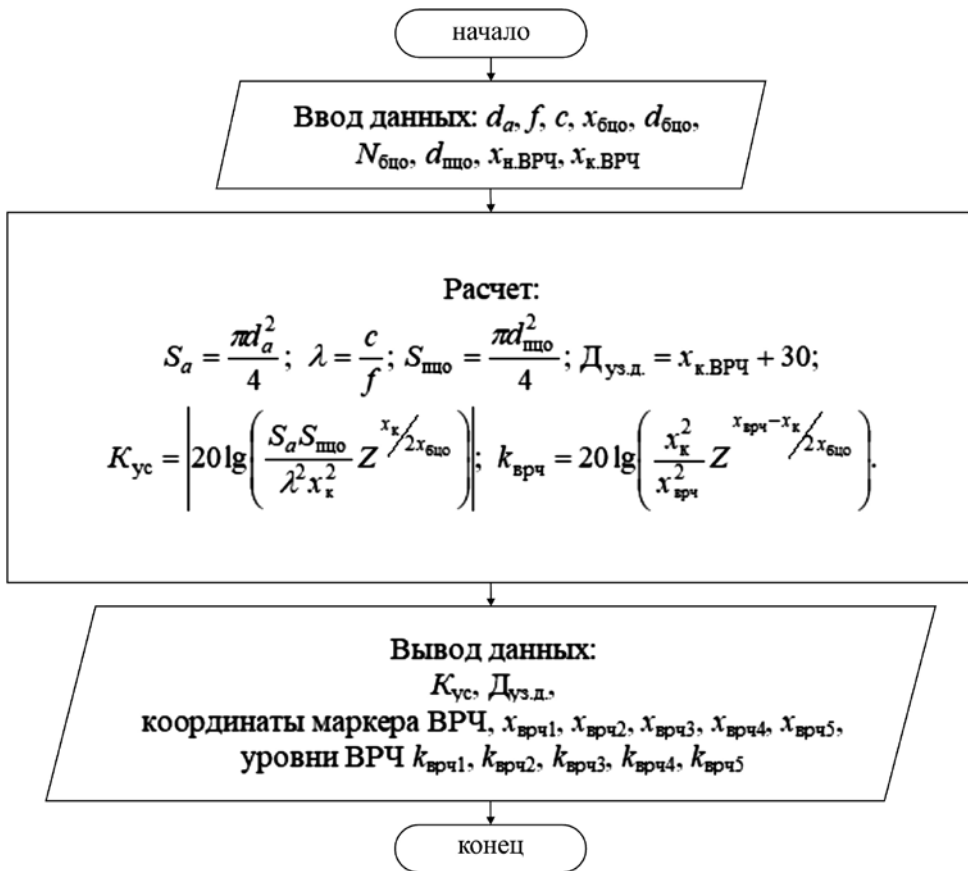


Рис. 1. Алгоритм программы NDRTR TSA SCR F-BCR



Рис. 2. Загрузочное окно программы

Таблица 1

Идентификация функций и переменных в программе  
NDTRT TSA SCR F-BCR

№ п/п	Функция или аргумент	Обозначение	Размерность
1	Диаметр пьезоэлектрического преобразователя	$d_a$	мм
2	Площадь пьезоэлектрического преобразователя	$S_a$	мм <sup>2</sup>
3	Частота ультразвуковой волны	$f$	Гц
4	Скорость ультразвуковой волны	$c$	мм/с
5	Длина ультразвуковой волны	$\lambda$	мм
6	Расстояние до отражающей поверхности БЦО	$X_{\text{БЦО}}$	мм
7	Диаметр БЦО	$d_{\text{БЦО}}$	мм
8	Амплитуда эхо-сигнала от БЦО	$N_{\text{БЦО}}$	дБ
9	Диаметр ПЦО	$D_{\text{ПЦО}}$	мм
10	Площадь ПЦО	$S_{\text{ПЦО}}$	мм <sup>2</sup>
11	Точка настройки функции ВРЧ	$x_{\text{ВРЧ}}$	мм
12	Начальная точка настройки функции ВРЧ	$x_{\text{н.ВРЧ}}$	мм
13	Конечная точка настройки функции ВРЧ	$x_{\text{к.ВРЧ}}$	мм
14	Диапазон ультразвукового дефектоскопа	$D_{\text{уз.д}}$	мм
15	Коэффициент усиления ультразвукового дефектоскопа	$K_{\text{ус}}$	дБ
16	Уровень ВРЧ	$k_{\text{ВРЧ}}$	дБ

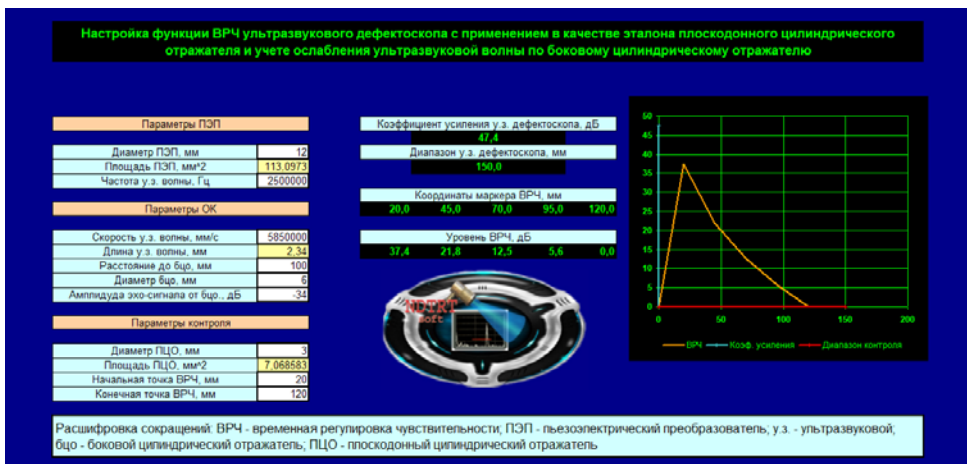


Рис. 3. Окно ввода-вывода данных



### Выводы

Показана возможность применения технологических или конструктивных боковых цилиндрических отражателей для настройки функции ВРЧ ультразвуковой аппаратуры при диагностировании деталей и узлов подвижного состава железных дорог ультразвуковым методом.

Разработан математический аппарат для реализации предложенного метода. Для автоматизации расчетов безэталонного метода настройки функции ВРЧ с учетом затухания по боковому цилиндрическому отражателю создан алгоритм и на его основе программа NDTRT TSA SCR F-BCR. ■

### Литература

1. Киреев А. Н., Киреева М. А. Техническая диагностика подвижного состава. Луганск : Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2019. 193 с.
2. Сафарбаков А. М., Лукьянов А. В., Пахомов С. В. Основы технической диагностики деталей и оборудования. Ч. 2. Иркутск : ИрГУПС, 2007. 110 с.
3. Алешин Н. П., Щербинский В. Г. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий. Москва : Высшая школа, 1991. 271 с.
4. Ультразвуковой контроль / Н. П. Алешин, В. Т. Бобров, Ю. В. Ланге [и др.] ; под общ. ред. В. В. Ключева. Москва : Спектр, 2011. 224 с.
5. Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И. Неразрушающий контроль. Книга 2. Акустические методы контроля. Москва : Высшая школа, 1991. 283 с.
6. Ермолов И. Н., Ермолов М. И. Ультразвуковой контроль. Москва : Издательский дом «Азимут», 1998. 170 с.
7. Клиндух В. Ф., Макиенко В. М., Кузмичев Е. Н. Неразрушающие методы контроля и диагностика узлов и деталей подвижного состава. Хабаровск : ДВГУПС, 2005. 109 с.
8. Киреев А. Н. Настройка функции ВРЧ ультразвуковой аппаратуры при диагностировании элементов экипажной части подвижного состава железных дорог // Вестник УрГУПС. 2016. № 1 (29). С. 23–29. DOI: 10.20291/2079-0392-2016-1-23-29.
9. Киреев А. Н., Быкадоров В. В., Киреева М. А. Настройка функции ВРЧ по шпоночному пазу при ультразвуковом контроле деталей и узлов машин и агрегатов // Вестник ЛГУ им. В. Даля. 2021. № 6 (48). С. 69–75. ISSN 2522-4905.
10. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. Москва : Машиностроение, 1981. 240 с.
11. Киреев А. Н. Дефектометрия при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог : монография. Луганск : Ноулдидж, 2016. 147 с.

### References

1. Kireev A. N., Kireeva M. A. Technical diagnostics of rolling stock. Lugansk : Publishing House of LNU named after V. Dalh, 2019. 193 p. (In Russian).
2. Safarbakov A. M., Lukyanov A. V., Pakhomov S. V. Fundamentals of technical diagnostics of parts and equipment. Part. 2. Irkutsk : Irkutsk State Transport University, 2007. 110 p. (In Russian).
3. Aleshin N. P., Shcherbinskiy V. G. Radiation, ultrasonic and magnetic flaw detection of metal products. Moscow : Higher School, 1991. 271 p. (In Russian).
4. Aleshin N. P., Bobrov V. G., Lange Yu. V. [et al.]. Ultrasonic control : under the general edition by V. V. Klyuev. Moscow : Spectrum, 2011. 224 p. (In Russian).
5. Ermolov I. N., Aleshin N. P., Potapov A. I. Non-destructive testing. Book 2. Acoustic control methods. Moscow : Higher School, 1991. 283 p. (In Russian).
6. Ermolov I. N., Ermolov M. I. Ultrasonic control. Moscow : Publishing House «Azimuth», 1998. 170 p. (In Russian).
7. Klindukh V. F., Makienko V. M., Kuzmichev E. N. Non-destructive testing methods and diagnostics of components and parts of rolling stock. Khabarovsk : Far Eastern State Transport University, 2005. 109 p. (In Russian).
8. Kireev A. N. Setting time corrected gain function of ultrasonic equipment for diagnosing rolling stock undercarriage elements. *Herald of the USURT*. 2016. No. 1 (29). Pp. 23–29. DOI: 10.20291/2079-0392-2016-1-23-29. (In Russian).

9. Kireev A. N., Bykadorov V. V., Kireeva M. A. Adjusting the corrected grain function by keyway during ultrasonic inspection of machine parts and assemblies. *Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University*. 2021. No. 6 (48). Pp. 69–75. ISSN 2522-4905. (In Russian).
10. Ermolov I. N. Theory and practice of ultrasonic control. Moscow : Machinery, 1981. 240 p. (In Russian).
11. Kireev A. N. Flaw detection in ultrasonic diagnostics of elements and systems of railway rolling stock : monograph. Lugansk : Knowledge, 2016. 147 p. (In Russian).

*Статья сдана в редакцию 28 февраля 2024 года*

УДК 656.212.5

А. А. Климов

## О корректировке алгоритма расчета высоты сортировочной горки

UDK 656.212.5

A. A. Klimov

## On adjusting the algorithm of a marshalling yard height calculation

### Аннотация

В настоящее время высота сортировочных горок рассчитывается на основании определения сил сопротивления движению вагонов при скатывании с горки в конкретных условиях. Причем нормативы расчета основного удельного сопротивления движению, используемые до сих пор, были приняты более 40 лет назад. Соответственно их применение для описания ходовых характеристик современного вагонного парка может приводить к результатам, не отвечающим действующим условиям эксплуатации, и к увеличению вероятности возникновения нештатных ситуаций при роспуске. В статье предлагается корректировка алгоритма расчета высоты сортировочной горки, основанная на результатах современных исследований основного удельного сопротивления движению, выполненных специалистами Сибирского государственного университета путей сообщения и АО «НИИАС», и корректировка непосредственно методики расчета высоты сортировочной горки.

**Ключевые слова:** цифровая железнодорожная станция, высота сортировочной горки, сопротивление движению вагонов, «расчетные бегуны», энергетическая высота

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-74-85

### Abstract

At present the height of marshalling yards is calculated basing on the determination of the power of resistance to the movement of cars when rolling down a hill on definite conditions. Wherein the calculation norms of the main specific resistance to movement, used until present time, were accepted more than 40 years ago. Therefore, their use for the description of the modern car park driving characteristics may lead to the results of unsuitable current operating conditions, as well as to the increase of the emergency appearance when disbanding. The article suggests the adjustment of the algorithm of a marshalling yard height calculation based on the results of up-to-date researches of the main specific resistance to movement made by the specialists of the Siberian Transport University and JSC «NIIAS» and the correction of the methods of calculation of the height of the marshalling yard.

**Keywords:** digital railway station, height of a marshalling yard, resistance to cars movement, «estimated runners», energy elevation

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-74-85

---

*Статья рекомендована к публикации С. В. Бушуевым, канд. техн. наук, доцентом, Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: SBushuev@usurt.ru.*

**Александр Александрович Климов**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск, Россия. E-mail: a-aklimov@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1421-0976.

© А. А. Климов, 2024

*The article is recommended for publication by S. V. Bushuev, PhD in Engineering, Associate Professor, Ural State University of Railway Transport. E-mail: SBushuev@usurt.ru.*

**Alexander Alexandrovich Klimov**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia. E-mail: a-aklimov@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1421-0976.

© A. A. Klimov, 2024

С 2018 г. ОАО «РЖД» реализует проект «Цифровая железнодорожная станция», цель которого – постепенный переход от автоматизированного к автоматическому управлению станционными технологическими процессами [1]. При этом должны решаться комплекс задач, предусматривающих оптимизацию технологических процессов, повышение безопасности движения поездов и маневровой работы, увеличение пропускных и перерабатывающих способностей железнодорожной станции и отдельных ее элементов, сокращение эксплуатационных расходов по пропуску и переработке вагонопотоков. Реализация проекта также направлена на то, чтобы за счет современных технических средств и систем управления с использованием искусственного интеллекта минимизировать и участие человека в выполнении трудоемких технологических операций, и влияние человеческого фактора на технологические процессы [2].

Сортировочные станции относятся к числу наиболее крупных на сети железных дорог, и их развитие идет по принципу концентрации переработки на меньшем числе станций, но с соответствующим путевым развитием и современным техническим оснащением, что позволяет обеспечить необходимый уровень пропускной и перерабатывающей способностей и снизить себестоимость переработки вагонопотоков. Сортировочные станции – достаточно сложные транспортные системы, тем не менее их технологические процессы в целом однотипны и могут быть хорошо формализованы для оптимизации и управления. Поэтому именно сортировочные станции выбраны для реализации пилотного проекта «Цифровая железнодорожная станция» [3].

Построение цифровой железнодорожной станции предполагает разработку и внедрение ряда аппаратно-программных средств, систем и устройств, позволяющих в реальном времени формировать динамическую модель работы станции для планирования

и управления технологическим процессом [4]. При этом перед разработкой модулей автоматического управления станционными процессами необходимо предварительно обеспечить соответствие объектов управления действующим нормативам и требованиям. В противном случае надежность функционирования соответствующих подсистем и станции в целом будет снижаться.

Одним из основных элементов, определяющих темп и безопасность переработки вагонопотоков в сортировочной системе, являются сортировочные горки. После реализации в ОАО «РЖД» Программы механизации и автоматизации сортировочные горки на основных сортировочных станциях сети стали автоматизированными, оборудованными современными системами механизации. При этом практически на каждой горке, а также в сортировочных парках по-прежнему параметры отдельных участков продольного профиля не соответствуют требованиям правил и норм проектирования, что может приводить к нарушениям безопасности сортировочного процесса [5]. В качестве основных причин можно отметить просадки участков пути в процессе эксплуатации, отклонение фактического продольного профиля от проектного (в том числе после реконструкции), несоответствие проектного продольного профиля действующим нормативам из-за особенностей проектного положения конкретной станции, истории ее развития и др.

В результате задача скатывания отцепов с соблюдением установленных требований решается за счет использования автоматизированных систем управления, корректирующих скорость скатывания в реальном времени, что может вызывать необходимость в дополнительных эксплуатационных расходах, связанных с торможением отцепов, а также повышать вероятность возникновения нештатных ситуаций при роспуске составов и заполнении путей сортировочных парков. Поэтому перед проектированием, установкой и настройкой автоматизированных систем

управления сортировочным процессом нужно решить задачу по приведению высоты и продольного профиля сортировочной горки, а также числа и мощности тормозных средств в соответствие действующим нормативным требованиям.

Одним из важнейших конструктивных параметров сортировочных горок является наличная высота  $H_{\text{нал}}$ , определяемая как разность отметок вершины горки и расчетной точки (РТ), устанавливаемой на расстоянии 50 м от нижнего стыка парковой тормозной позиции. Если высота горки окажется менее расчетного значения, это будет приводить к уменьшению дальности пробега отцепов, в том числе к увеличению вероятности останова отдельных отцепов в пределах спускной части горки. В результате могут нарушаться условия обеспечения безопасности роспуска составов, возникать потребность в выполнении дополнительной маневровой работы, сокращаться перерабатывающая способность сортировочной горки и станции в целом. При избыточном значении высоты горки увеличиваются скорости движения отцепов, возрастают эксплуатационные расходы на их торможение, снижается вероятность безопасного проследования отцепов по разделительным элементам (соблюдение необходимых пространственно-временных интервалов на стрелочных переводах и тормозных позициях), повышается вероятность возникновения нештатных ситуаций различного характера.

В целом наличная высота горки должна попадать в расчетный диапазон допустимых значений, при этом итоговая высота и конструкция продольного профиля спускной части устанавливаются по результатам моделирования скатывания одиночных вагонов с определенными характеристиками, т. е. «расчетных бегунов». При сравнении вариантов высоты и конструкции продольного профиля спускной части горки рекомендуется ориентироваться на тот вариант, который обеспечивает наибольшую перерабатывающую

способность при соблюдении всех имеющихся ограничений.

Необходимо отметить, что расчет высоты сортировочной горки базируется на определении значений сил сопротивления движению вагонов при скатывании [6]. При этом в зависимости от ходовых свойств вагона рассчитывается значение основного удельного сопротивления движению. Используемые в настоящее время значения основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с горки установлены по результатам исследований, выполненных ЦНИИ МПС СССР еще в 1970-е годы [7]. За прошедший период парк вагонов значительно обновился, что позволило улучшить их ходовые характеристики и сократить основное удельное сопротивление движению [8, 9].

Таким образом, в современных условиях эксплуатации использование существующих значений основного удельного сопротивления движению вагонов при определении высоты горки будет приводить к отклонению расчетного диапазона допустимых значений и потребной высоты горки. Следовательно, на текущем этапе развития теории и практики проектирования корректировка алгоритмов расчета высоты горки является актуальной.

В качестве исходных данных для решения рассматриваемой задачи используются новые значения основного удельного сопротивления движению вагонов  $w_{\text{очн}}$ , полученные по результатам исследований, выполненных специалистами Сибирского государственного университета путей сообщения и Ростовского филиала АО «НИИАС» [10–12]. Новые числовые характеристики плотностей распределения величины  $w_{\text{очн}}$  для различных весовых категорий определены на основании натуральных наблюдений за процессом скатывания отцепов из одиночных вагонов, а также на основании обработки статистических данных о результатах скатывания отцепов на этой же сортировочной горке по данным комплекса «Компьютерное зрение» (КЗСП)

Таблица 1

Соотношение существующих и новых числовых характеристик основного удельного сопротивления движению вагонов

Параметр	Назначение	Значение, Н/кН	
		Существующее	Новое
Среднее значение $w_{\text{осн}}$ для легкой весовой категории	Определение расчетной (минимальной) высоты горки $H_p$	1,75	0,83
Среднее квадратическое отклонение для легкой весовой категории	Определение расчетной (минимальной) высоты горки $H_p$ в районах со сложными метеоусловиями	0,67	0,56
Значение $w_{\text{осн}}$ для «очень плохого» (ОП) бегуна	Проверка расчетной (минимальной) высоты горки $H_p$	4,50	3,60
Значение $w_{\text{осн}}$ для «очень хорошего» (ОХ-100) бегуна	Определение конструктивной (максимальной) высоты горки $H_k$	0,50	0,10

[13, 14]. Соотношения существующих и новых значений  $w_{\text{осн}}$ , используемых при расчете высоты сортировочной горки, приведены в табл. 1 (по данным работ [10–12], выполненных при непосредственном участии автора).

Новые значения  $w_{\text{осн}}$  (см. табл. 1) необходимо уточнять после проведения дополнительных исследований на различных горках сети, расположенных в разных климатических зонах. Однако представленные результаты показывают значительное отклонение величины  $w_{\text{осн}}$  от существующих значений, что должно учитываться при определении высоты горки, в том числе с корректировкой алгоритма и методики расчета.

Существующий порядок определения высоты горки представлен в виде алгоритма (рис. 1). Итоговая (проектная) высота горки  $H_r$  и конструкция продольного профиля спускной части рассчитываются на основании сравнения вариантов в диапазоне допустимых значений  $[H_p; H_k]$ . При этом рекомендуется тот вариант, который обеспечивает реализацию максимальной скорости роспуска с обязательным достижением уровня наличной расчетной часовой перерабатывающей способности горки [6]. Значения высот реальных горок  $H_{\text{нал}}$  в основном превышают минимальные значения  $H_p$ . Приближение

фактической высоты горки  $H_{\text{нал}}$  к значению  $H_k$  встречается весьма редко и, как правило, по причине недостаточной мощности тормозных позиций.

Согласно рис. 1, расчет высоты горки включает два этапа:

на этапе 1 определяется допустимый диапазон изменения высоты горки  $[H_p; H_k]$ ;

на этапе 2 при помощи итерационных расчетов определяются итоговая (проектная) высота горки и мощность ее технического оснащения.

Значения потребных высот горки ( $H_p$  и  $H_k$ ) рассчитываются на основании закона сохранения энергии. Поэтому значение высоты в теории горочных расчетов рассматривается в виде энергетической характеристики, определяющей общий начальный запас энергии движения отцепа на вершине горки (ВГ), и измеряется в метрах энергетической высоты (м эн. в.).

Минимальная высота горки  $H_p$  должна обеспечивать докатывание «очень плохого» расчетного бегуна до расчетной точки (РТ) в неблагоприятных условиях. Таким образом, общий запас энергии движения отцепа на вершине горки будет складываться из энергетической высоты, соответствующей начальной скорости движения (скорости роспуска)  $h_0$ , и высоты горки  $H_r$ .

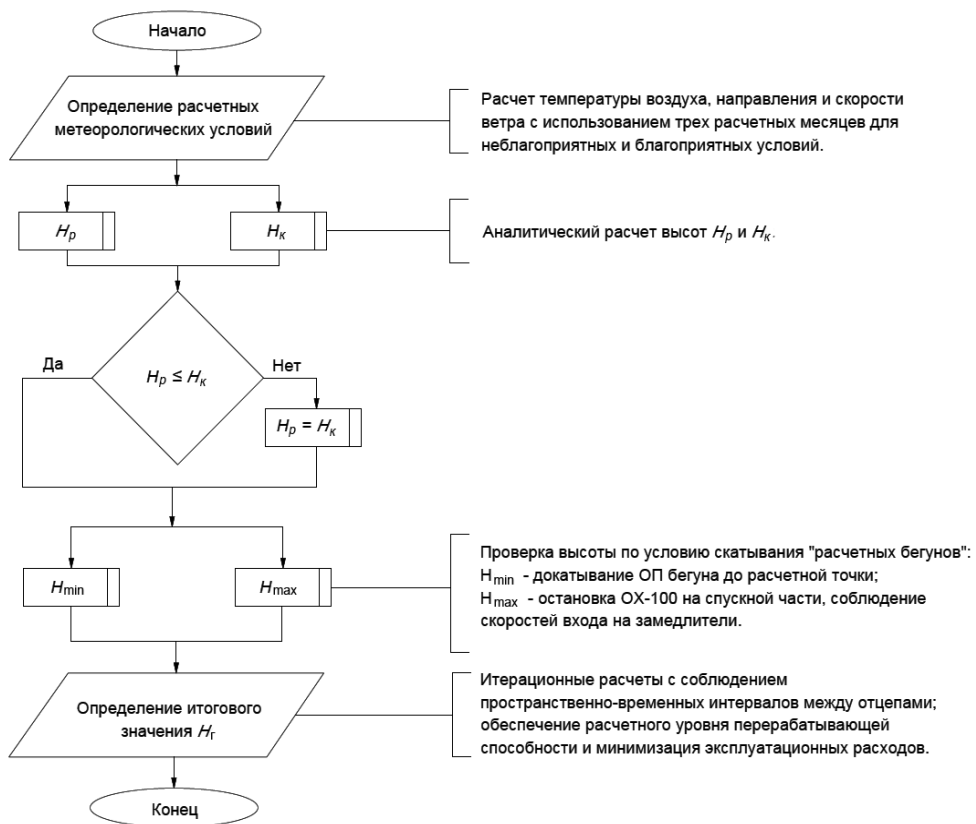


Рис. 1. Алгоритм определения высоты горки по существующей методике

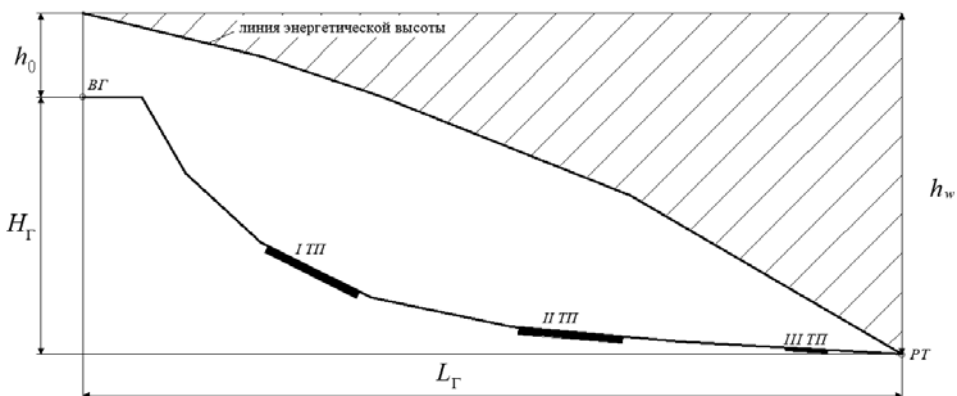


Рис. 2. Принципиальная схема к расчету минимально необходимой высоты сортировочной горки с тремя тормозными позициями (ТП)

Условие докатывания «расчетного бегуна» до РТ выражается в остановке отцепя в конце рассматриваемого маршрута. Следовательно, в решении этой задачи суммарная энергия движения отцепя при его остановке на РТ использовалась для преодоления работы сил суммарного сопротивления движению отцепя  $h_w$ . Принципиальная схема решения задачи в энергетических высотах представлена на рис. 2.

Согласно рис. 2, минимально необходимая высота сортировочной горки определяется по выражению

$$\begin{aligned} H_{\min} &= h_w - h_0 \Rightarrow \\ \Rightarrow H_{\min} &= h_{\text{осн}} + h_{\text{св}} + h_{\text{ск}} + h_{\text{сн}} - h_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $h_{\text{осн}}$ ,  $h_{\text{св}}$ ,  $h_{\text{ск}}$ ,  $h_{\text{сн}}$  – значения потерь удельной энергии движения вагона на преодоление сил основного сопротивления, сопротивления от воздушной среды и ветра, от стрелочных переводов и кривых, от снега и инея соответственно, м э. в.

Рассмотренный подход реализован в нормативных документах по проектированию сортировочных горок. Так, с 1992 г. и по настоящее время для определения расчетной высоты горок повышенной, большой и средней мощности используется формула [15], выведенная на основании выражения (1):

$$H_p = 1,75(\bar{h}_{\text{осн}} + \bar{h}_{\text{ск}} + \bar{h}_{\text{св}}) + h_{\text{сн}} - h_0, \quad (2)$$

где 1,75 – коэффициент отклонения расчетного значения суммы  $(\bar{h}_{\text{осн}} + \bar{h}_{\text{ск}} + \bar{h}_{\text{св}})$  от ее среднего значения;  $\bar{h}_{\text{осн}}$ ,  $\bar{h}_{\text{ск}}$ ,  $\bar{h}_{\text{св}}$  – средние значения потерь удельной энергии движения вагона при преодолении сил основного сопротивления, сопротивления от стрелочных переводов и кривых, от воздушной среды и ветра соответственно.

В формуле (2) используются средние значения потерь удельной энергии движения следующих сил сопротивления движению  $(\bar{h}_{\text{осн}} + \bar{h}_{\text{ск}} + \bar{h}_{\text{св}})$ , увеличенные на коэффициент отклонения 1,75 (для горок малой мощности коэффициент

отклонения принимается 1,5, и в расчете не учитывается значение  $h_{\text{сн}}$ ). Отметим, что применение рассмотренного подхода было обосновано широким диапазоном допустимых значений основного удельного сопротивления движению вагонов. В современных же условиях этот диапазон существенно сузился, а доля вагонов с сопротивлением менее минимально установленного (0,5 Н/кН) значительно увеличилась.

Кроме того, расчет потерь энергии движения на преодоление силы сопротивления от среды и ветра в нормах 1992 г. [15] выполнялся для метеорологических условий наиболее благоприятного и неблагоприятного месяцев, что в совокупности с использованием коэффициентов отклонения 1,75 (или 1,5) приводило к увеличению высоты горки. С 2003 г. для расчета  $\bar{h}_{\text{св}}$  используются средние значения параметров метеорологических условий за три наиболее неблагоприятных и благоприятных расчетных месяца [6]. Это позволило снизить значение расчетной высоты горки, что показано на примере трех реальных сортировочных горок в работе [16].

Таким образом, методы расчета высоты горки регулярно корректировались для адаптации к современным условиям эксплуатации. С учетом указанных изменений в настоящее время целесообразность определения на этапе 1 диапазона допустимых значений высоты сортировочных горок аналитическим способом через средние значения потерь удельной энергии движения вагонов вызывает сомнение, потому что задачи, решаемые на этапе 2 при определении итоговой (проектной) высоты горки, фактически дублируют требования, применяемые при расчете значений  $H_p$  и  $H_k$ .

Исходя из этого минимальное и максимальное значения высоты горки следует определять прямым расчетом [17]:

этап 1 – определение границ допустимого диапазона изменения высоты горки  $H_{\min}$  (по условию докатывания бегуна ОП до расчетной точки для неблагоприятного месяца) и  $H_{\max}$



(по условию остановки бегуна ОХ-100 на спускной части горки и соблюдения допустимых скоростей входа на замедлители тормозных позиций для благоприятного месяца);

этап 2 – определение итоговой (проектной) высоты горки  $H_r$ , обеспечивающей выполнение установленных требований и ограничений при минимальных эксплуатационных расходах на расформирование составов.

Условия расчетов приведены в табл. 2 (новые значения величины  $w_{оч}$  получены на основании результатов исследований [18], выполненных при непосредственном участии автора).

Алгоритм расчета высоты сортировочной горки с учетом предложенных корректировок представлен на рис. 3.

Для апробации предлагаемых корректировок рассмотрена эксплуатируемая сортировочная горка большой мощности с тремя тормозными позициями, расположенная в Западной Сибири (табл. 3).

Приведенные в табл. 3 значения показывают существенное различие параметров внешней среды и ветра,

используемых при выполнении расчетов. В частности, расчетные месяцы определяются по значению суммарного удельного сопротивления движению от среды и ветра, снега и инея ( $w_{св} + w_{ин}$ ), и для рассматриваемой горки максимальные значения соответствуют ноябрю, декабрю и марту, так как в марте и ноябре наблюдаются более сильные ветровые нагрузки по сравнению с январем и февралем.

Аналогичный подход применяется при выборе расчетного румба, здесь в качестве критерия используется значение сопротивления от среды и ветра ( $w_{св}$ ). Расчетная скорость встречного ветра неблагоприятного месяца (4,82 м/с) оказалась ниже скорости ветра, определенной для трех расчетных месяцев (5,57 м/с). Кроме того, изменилось значение расчетного румба: вместо румба Ю (для неблагоприятного месяца) – румб ЮЗ (для трех расчетных месяцев), что обусловлено характером ветровых нагрузок местности.

Использование при определении расчетных условий внешней среды и ветра трех расчетных месяцев, как правило,

Таблица 2

Рекомендуемые условия и характеристики «расчетных бегунов» для выполнения расчетов по определению высоты горки

Расчетный параметр	Условия выполнения расчета	Характеристика «расчетных бегунов»	
		Тип	Значение $w_{оч}^*$ Н/кН*
Минимальная высота горки $H_{min}$	Докатывание «расчетного бегуна» до РТ, условия неблагоприятные	ОП	3,6
Максимальная высота горки $H_{max}$	1. Соблюдение допустимых скоростей входа «расчетного бегуна» на тормозные позиции. 2. Проверка мощности тормозных позиций. Условия благоприятные	ОХ-100	0,1
Проектная высота горки $H_r$	1. Проверка интервалов между «расчетными бегунами» на разделительных элементах. 2. Реализация наибольшей скорости роспуска. Условия неблагоприятные	ОП**	3,6
		П**	3,5
		Х**	0,2
		ОХ-85**	0,1

\* Значения основного удельного сопротивления движению «расчетных бегунов» предварительны и требуют уточнения после выполнения дополнительных исследований на разных станциях сети.

\*\* При решении задачи используются сочетания «расчетных бегунов», приведенные в правилах и нормах проектирования сортировочных устройств в зависимости от мощности горки.

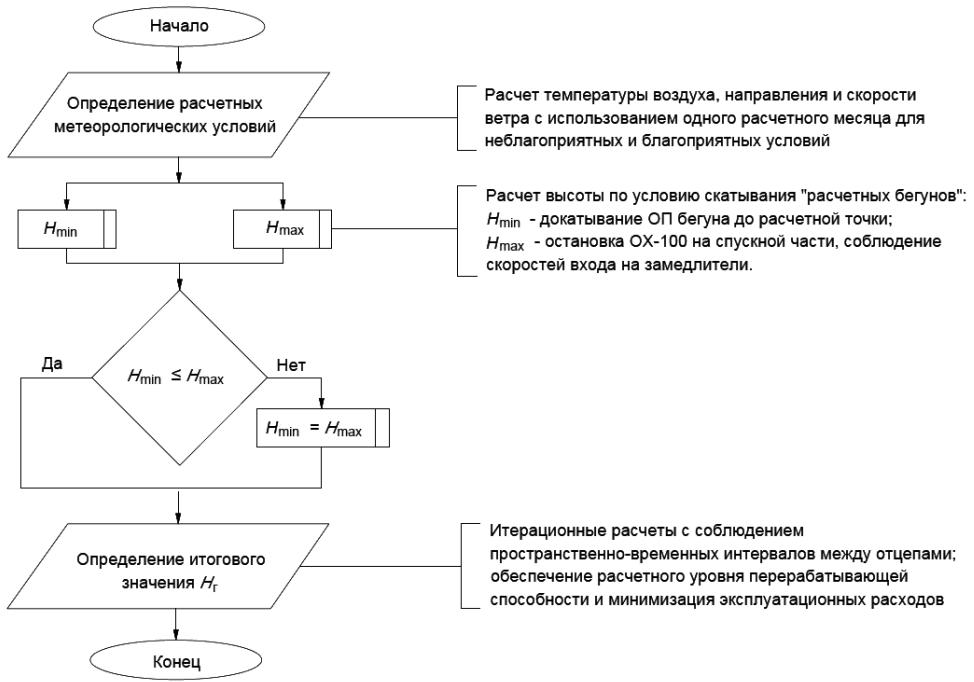


Рис. 3. Предлагаемый алгоритм расчета высоты сортировочной горки

Таблица 3

Расчетные неблагоприятные условия для определения высоты сортировочной горки различными методами

Параметр	Единица измерения	Расчетный месяц/месяцы	Значение
Правила и нормы проектирования сортировочных устройств 2003 г. [6]			
Расчетная температура наружного воздуха	°С	ноябрь, декабрь, март	-2,83
Расчетный румб	–	–	ЮЗ
Угол обдувания на горбе горки	град.	–	65
Расчетная скорость встречного ветра	м/с	–	5,57
Правила и нормы проектирования сортировочных устройств 1992 г. [15]			
Расчетная температура наружного воздуха	°С	декабрь	-41,3
Расчетный румб	–	–	Ю
Угол обдувания на горбе горки	град.	–	20
Расчетная скорость встречного ветра	м/с	–	4,82

понижает значения метеорологических параметров. Например, значение температуры наружного воздуха составило  $-2,83^\circ$  (по сравнению с  $-41,3^\circ$  для наиболее неблагоприятного месяца), что для Западной Сибири может быть недостаточным при скатывании отцепов в наиболее неблагоприятный период года. Поэтому методика определения расчетных параметров внешней среды и ветра, представленная в правилах и нормах 1992 г. [15], более корректно отражает условия работы горки в неблагоприятных и благоприятных условиях.

Расчет значения  $H_p$  для рассматриваемой сортировочной горки по существующей методике [формула (2)] приведен в табл. 4, а расчет значения  $H_{min}$  по предлагаемому методу [формула (1)] – в табл. 5. В обоих случаях выполнено сопоставление существующих и новых значений случайной величины  $w_{очн}$ . Расчет сделан для пути № 13

сортировочной горки – «трудного» пути горочной горловинны.

Сравнение результатов расчета показывает, что высота горки  $H_p$  недостаточна для выполнения условия докатывания «расчетного бегуна» ОП до расчетной точки. Кроме того, использование новых значений  $w_{очн}$  приведет к значительному снижению высоты сортировочной горки:

при расчете по существующей методике – с 4,61 до 3,81 м эн. в.;

прямым расчетом – с 4,70 до 4,25 м эн. в.

Таким образом, при использовании действующей методики расчета величины  $H_p$  и новых значений величины  $w_{очн}$  высота горки существенно снизится (до 3,81 м эн. в.), что приведет к понижению дальности пробега отцепов и повышению вероятности их остановки в пределах спускной части горки. Использование прямого расчета высоты горки по условию докатывания бегуна

Таблица 4

Определение расчетной высоты горки  $H_p$  для существующих ( $\bar{w}_{очн} = 1,750$  Н/кН) и новых ( $\bar{w}_{очн} = 0,833$  Н/кН) значений основного удельного сопротивления движению

Расчетный участок	$\bar{h}_{св}$	$\bar{h}_{ск}$	$\bar{h}_{сн}$	$\bar{h}_{очн}$	
				$\bar{w}_{очн} = 1,750$ Н/кН	$\bar{w}_{очн} = 0,833$ Н/кН
1	0,203	0,029	0,000	0,141	0,067
2	0,439	0,163	0,000	0,218	0,104
3	0,703	0,216	0,024	0,394	0,187
4	0,077	0,000	0,009	0,120	0,057
<b>Высота горки <math>H_p</math></b>				<b>4,609</b>	<b>3,808</b>

Таблица 5

Определение высоты горки  $H_{min}$  для существующих ( $w_{очн} = 4,5$  Н/кН) и новых ( $w_{очн} = 3,6$  Н/кН) значений основного удельного сопротивления движению «расчетного бегуна» ОП

Расчетный участок	$h_{св}$	$h_{ск}$	$h_{сн}$	$h_{очн}$	
				$w_{очн} = 4,5$ Н/кН	$w_{очн} = 3,6$ Н/кН
1	0,292	0,029	0,000	0,363	0,290
2	0,574	0,163	0,000	0,560	0,448
3	0,949	0,216	0,172	1,012	0,810
4	0,151	0,000	0,067	0,309	0,248
<b>Высота горки <math>H_{min}</math></b>				<b>4,700</b>	<b>4,251</b>

ОП до расчетной точки с актуализированными значениями основного удельного сопротивления движению является более целесообразным.

Значение конструктивной (максимальной) высоты для рассматриваемой горки изменилось незначительно (с 4,98 до 4,94 м эн. в.), так как при выполнении расчета использованы существующие значения профильных высот. Наличие высоты горки составляет  $H_{\text{нал}} = 4,62$  м эн. в. и в целом попадает в установленные диапазоны допустимых значений.

### Выводы

Существующая методика предполагает определение минимального и максимального значения высоты горки аналитическими методами и последующий поиск итогового значения на основе итерационных расчетов в установленном диапазоне. Для этой методики характерен элемент дублирования задач, которые решаются при помощи общих в принципе подходов, но с различающимися исходными данными и условиями проведения расчетов, что в целом усложняет процедуру поиска оптимального варианта.

В настоящее время при проектировании новых или реконструкции существующих горок используются программы имитационного моделирования скатывания отцепов, которые дают возможность подобрать наиболее рациональную конструкцию продольного профиля горки (а следовательно, и проектную высоту горки) в увязке с ее техническим оснащением. Имитационные модели позволяют выполнять проверку высоты горки и по условию докатывания бегуна ОП до расчетной точки, и по условию соблюдения допустимой скорости входа бегуна ОХ-100 на замедлители тормозных позиций, в связи с этим выполнение аналитического

расчета минимального и максимального значения высоты горки становится нецелесообразным.

Использование существующих значений основного удельного сопротивления движению и действующего алгоритма расчета высоты горки может приводить к результатам, не соответствующим современным условиям эксплуатации. Более совершенным является алгоритм прямого расчета высоты горки по условию докатывания «расчетного бегуна» ОП до расчетной точки в неблагоприятных условиях скатывания, которые должны устанавливаться для расчетного неблагоприятного месяца с наибольшим значением параметра ( $w_{\text{св}} + w_{\text{сн}}$ ). При этом рекомендуется использовать новые значения основного удельного сопротивления движению  $w_{\text{сн}}$ , соответствующие современному парку вагонов. Максимально возможная высота горки также может определяться прямым расчетом, но по условиям скатывания «расчетного бегуна» ОХ-100 в благоприятных условиях (при обеспечении соблюдения допустимой скорости входа на замедлители и остановки бегуна ОХ-100 в пределах спускной части горки – на второй тормозной позиции). В данном случае также рекомендуется использовать новые значения основного удельного сопротивления движению вагонов  $w_{\text{сн}}$ .

Для определения итоговых новых значений основного удельного сопротивления движению  $w_{\text{сн}}$  должны быть выполнены дополнительные исследования на различных горках сети железных дорог с целью расширения объема статистической выборки и уточнения полученных числовых характеристик. Уже полученные новые значения величины  $w_{\text{сн}}$  существенно отличаются от используемых в настоящее время, что также подтверждает необходимость в пересмотре алгоритма и методики расчета высоты сортировочной горки. ■

*Публикация осуществлена в рамках реализации гранта  
ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ  
в области железнодорожного транспорта.*

**Литература**

1. Концепция «Цифровая железнодорожная станция»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 07.11.2018 г. № 1049 (в ред. от 05.06.2020 г. № 1217/р).
2. Цифровая железнодорожная станция – от концепции к реальному внедрению / В. Е. Андреев, А. И. Долгий, В. В. Кудюкин [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 9. С. 2–6. DOI: 10.34649/AT.2023.9.9.001.
3. Лыкова М. П. Цифровая железнодорожная станция // Современные исследования в гуманитарных и естественнонаучных отраслях: сборник научных статей. Ч. VII. Москва: Перо, 2021. С. 9–14.
4. Калинин А. В., Долганюк С. И., Савицкий А. Г. К вопросу построения системы управления технологическим процессом Цифровой станции // Труды АО «НИИАС». 2021. Т. 2. Вып. 11. С. 9–25.
5. Исследование причин возникновения повреждений грузовых вагонов при роспуске на немеханизированных сортировочных горках и разработка мероприятий по их предупреждению / С. В. Танкеев, А. Е. Колодин, В. Б. Свердлов [и др.] // Вестник УрГУПС. 2021. № 2 (50). С. 4–13. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-2-4-13.
6. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. Москва: Техинформ, 2003. 168 с.
7. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / В. П. Волков, И. П. Старшов, Е. А. Сотников, А. И. Арбузин. Москва: Транспорт, 1975. 102 с.
8. Применение цифровых моделей и средств спутниковой навигации для определения основного сопротивления движению грузовых вагонов / Ю. П. Бороненко, И. Р. Крон, Р. В. Рахимов, Я. О. Рузметов // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Второй Международной научно-технической конференции, Ташкент, 19–22 апреля 2023 г. Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2023. С. 62–69.
9. Бессоненко С. А., Гунбин А. А., Климов А. А. Исследование основного удельного сопротивления движению отцепов при скатывании с сортировочной горки на основе натурных наблюдений // Вестник СГУПС. 2022. № 4 (63). С. 62–68. DOI: 10.52170/1815-9265\_2022\_63\_62.
10. Распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов на сортировочных горках / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Климов [и др.] // Вестник СГУПС. 2023. № 1 (64). С. 52–61. DOI: 10.52170/1815-9265\_2023\_64\_52.
11. Исследование параметров основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Климов [и др.] // Известия Транссиба. 2023. № 1 (53). С. 53–62. ISSN 2220-4245.
12. Распределения вероятностей удельного сопротивления движению разных типов вагонов в сортировочном парке / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Климов [и др.] // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. 2022. Вып. 4. С. 12–17. ISSN 2664-5025.
13. Компьютерное зрение для контроля сортировочных процессов / А. Е. Хатламаджиан, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов, В. В. Борисов // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 3. С. 8–11. DOI: 10.34649/AT.2021.3.3.002.
14. Компьютерное зрение как способ интеллектуализации систем горочной автоматизации / И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов, А. М. Лященко, Д. В. Глазунов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 1. С. 46–53. DOI: 10.52261/02346206\_2022\_1\_46.
15. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР: ВСН 207–89. Москва: Транспорт, 1992. 104 с.
16. Климов А. А. Анализ соответствия методики расчета высоты сортировочной горки современным условиям эксплуатации // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 3 (99). С. 59–64. ISSN 1997-0722.
17. Бессоненко С. А., Гунбин А. А., Климов А. А. Актуализация методов расчета конструктивных параметров сортировочных горок // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. 2023. Вып. 5. С. 19–28. ISSN 2664-5025.
18. Бессоненко С. А., Гунбин А. А., Климов А. А. Актуализация параметров «расчетных бегунов», используемых при проектировании сортировочных горок // Вестник ВНИИЖТ. 2024. Т. 83. № 1. С. 60–68. ISSN 2223-9731.

## References

1. Digital Railway Station concept : approved by the Order of JSC «RZD» dated 07.11.2018 No. 1049 (in edition from 05.06.2020 No. 1217/r). (In Russian).
2. Andreev V. E., Dolgy A. I., Kudyukin V.V. [et al.]. Digital Railway Station – from concept to real implementation in 5 years. *Automation, communication, informatics*. 2023. No. 9. Pp. 2–6. DOI: 10.34649/AT.2023.9.9.001. (In Russian).
3. Lykova M. P. Digital Railway Station. *Modern studies in humanitarian and natural science spheres* : collection of scientific articles. Part VII. Moscow : Stylus, 2021. Pp. 9–14. (In Russian).
4. Kalinin A. V., Dolganyuk S. I., Savitskiy A. G. To the problem of the construction of the maintenance of the system of the technological process of the digital station. *Works of VNIAS*. 2021. Vol. 2. Issue 11. Pp. 9–25. (In Russian).
5. Tankeev S. V., Kolodin A. E., Sverdlov V. B. [et al.]. Investigation of the causes of damage to freight cars during disbanding on non-mechanized sorting slides and development of measures to prevent them. *Herald of the USURT*. 2021. No. 2 (50). Pp. 4–13. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-2-4-13. (In Russian).
6. Rules and norms of designing sorting devices on railway gauges 1520 mm. Moscow : Techninform, 2003. 168 p. (In Russian).
7. Volkov V. P., Starshov I. P., Sotnikov E. A., Arbuzin A. I. Resistance to the movement of freight cars when rolling down hills. Moscow : Transport, 1975. 102 p. (In Russian).
8. Boronenko Yu. P., Kron I. R., Rakhimov R. V., Ruzmetov Ya. O. Application of digital models and satellite navigation tools to determine the main resistance to the movement of freight cars. *Railway rolling stock: problems, solutions, prospect* : proceedings of the 2nd International scientific and practical conference, Tashkent, April 19–22, 2023. Tashkent : Tashkent State Transport University, 2023. Pp. 62–69. (In Russian).
9. Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. Investigation of the main specific resistance to the movement of cuts when rolling down a gravity hump based on field observations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022. No. 4 (63). Pp. 62–68. DOI: 10.52170/1815-9265\_2022\_63\_62. (In Russian).
10. Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. [et al.]. Probability distributions of specific resistance to the movement of cuts on gravity humps. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023. No. 1 (64). Pp. 52–61. DOI: 10.52170/1815-9265\_2023\_64\_52. (In Russian).
11. Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. [et al.]. Investigation of the parameters of the main specific resistance to the movement of cars when rolling down a marshalling yard. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2023. No. 1 (53). Pp. 53–62. ISSN 2220-4245. (In Russian).
12. Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. [et al.]. Probability distributions of specific resistance to movement of different types of wagons when rolling down in the sorting fleet. *Problems of railway stations and junctions perspective development*. 2022. Issue 4. Pp. 12–17. ISSN 2664-5025. (In Russian).
13. Khatlamajian A. E., Olgezyer I. A., Sukhanov A. V., Borisov V. V. Computer vision for railway humping control. *Automation, communication, informatics*. 2021. No. 3. Pp. 8–11. DOI: 10.34649/AT.2021.3.3.002. (In Russian).
14. Olgezyer I. A., Sukhanov A. V., Lyashchenko A. M., Glazunov D. V. Computer vision as a way of intellectualization of hill automation systems. *Engineering & Automation Problems*. 2022. No. 1. Pp. 46–53. DOI: 10.52261/02346206\_2022\_1\_46. (In Russian).
15. Rules and norms of designing sorting devices on railway gauges of USSR : VSN 207–89. Moscow : Transport, 1992. 104 p. (In Russian).
16. Klimov A. A. Analysis of compliance of the method of calculating the height of the sorting slide with modern operating conditions. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2023. No. 3 (99). Pp. 59–64. ISSN 1997-0722. (In Russian).
17. Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. Updated methods for calculating design parameters of gravity yards. *Problems of railway stations and junctions perspective development*. 2023. Issue 5. Pp. 19–28. ISSN 2664-5025. (In Russian).
18. Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. Updating the parameters of «calculated runners» used in the design of gravity humps. *Russian Railway Science Journal*. 2024. Vol. 83. No. 1. Pp. 60–68. ISSN 2223-9731. (In Russian).

Статья сдана в редакцию 23 апреля 2024 года

УДК 621.317.789: 621.316.719.3

*Н. Э. Амиров, П. В. Шепелин, А. А. Булатов*

## Измерение избыточной энергии электрического торможения поездов в системе энергоснабжения постоянного тока РЖД

UDK 621.317.789: 621.316.719.3

*N. E. Amirov, P. V. Shepelin, A. A. Bulatov*

## Excess energy measurement for electric braking of trains in the JSC «Russian Railways» DC power supply system

### Аннотация

Статья посвящена измерению избыточных мощностей процесса рекуперативного торможения неавтономного подвижного состава с учетом потерь в тяговой сети для определения эффективности и целесообразности установки накопительных систем на участках обращения. Рассмотрено схемное решение, позволяющее на стадии проектирования накопительных систем установить эффективность и пригодность участка к накоплению избыточных мощностей в тяговой энергосистеме.

**Ключевые слова:** рекуперативное торможение, подвижной состав, накопители энергии, избыточная энергия, энергоэффективность  
DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-86-92

### Abstract

The article is devoted to measuring the excess capacity of the regenerative braking process of non-autonomous rolling stock, taking into account losses in the traction network to determine the effectiveness and expediency of installing storage systems in circulation areas. A schematic solution is considered that allows at the design stage of storage systems to establish the efficiency and suitability of the site for the accumulation of excess capacity in the traction power system.

**Keywords:** regenerative braking, rolling stock, energy storage, excess energy, energy efficiency  
DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-86-92

---

*Статья рекомендована к публикации А. П. Буйновым, д-ром техн. наук, профессором, Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: ABuinosov@usurt.ru.*

**Намик Эльманович Амиров**, преподаватель кафедры «Тяговый подвижной состав» Самарского государственного университета путей сообщения, Самара, Россия. E-mail: n.amirov@samgups.ru. ORCID 0000-0002-2828-2260.

**Павел Викторович Шепелин**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Самарского государственного университета путей сообщения, Самара, Россия. E-mail: shepelin@samgups.ru. ORCID 0000-0002-6279-1253.

**Андрей Александрович Булатов**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Самарского государственного университета путей сообщения, Самара, Россия. E-mail: a.bulatov@samgups.ru. ORCID 0000-0002-1278-2172.

© Н. Э. Амиров, П. В. Шепелин, А. А. Булатов, 2024

*The article is recommended for publication by A. P. Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Ural State University of Railway Transport. E-mail: ABuinosov@usurt.ru.*

**Namik Elmanovich Amirov**, Lecturer of Traction Rolling Stock Department, Samara State Transport University, Samara, Russia. E-mail: n.amirov@samgups.ru. ORCID 0000-0002-2828-2260.

**Pavel Viktorovich Shepelin**, PhD in Engineering, Associate Professor of Traction Rolling Stock Department, Samara State Transport University, Samara, Russia. E-mail: shepelin@samgups.ru. ORCID 0000-0002-6279-1253.

**Andrey Alexandrovich Bulatov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Traction Rolling Stock Department, Samara State Transport University, Samara, Russia. E-mail: a.bulatov@samgups.ru. ORCID 0000-0002-1278-2172.

© N. E. Amirov, P. V. Shepelin, A. A. Bulatov, 2024

Повышение энергетической эффективности грузоперевозок на электрифицированных участках относится к числу важнейших целей стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации. В системах тягового энергоснабжения постоянного тока напряжением 3000 В одним из источников снижения расхода сетевой энергии на выполнение транспортной работы является использование избыточной энергии рекуперативного торможения электровозов в тяговой сети. Такая программа реализуется в холдинге ОАО «РЖД» уже более десяти лет [1]. За это время за счет внедрения организационно-технических мероприятий на подвижном составе удалось существенно повысить объемы межпоездных перетоков полезной энергии рекуперации [2].

К числу таких мероприятий относится оптимизация графика движения поездов на участках с большим потенциальным объемом рекуперативной энергии для обеспечения тяговой нагрузки в пределах участка питания одной тяговой подстанции при рекуперативном торможении встречного поезда. Кроме того, выполнен большой объем работ по ремонту и наладке оборудования электровозов, обеспечивающих рекуперативное торможение с возможностью возврата в контактную сеть полезной части энергии рекуперации. Также периодически проводится обучение машинистов правилам действий при рекуперативном торможении, разрабатываются мероприятия по распространению опыта передовых бригад, стимулированию повышения объемов рекуперативной энергии и организации режимов ведения поезда [3].

Однако все эти меры имеют свои естественные пределы, главный из которых – отсутствие одновременности движения на одном участке питания тяговой подстанции поезда в режиме рекуперативного торможения и встречного поезда в тяге, обеспечивающего достаточную нагрузку для приема энергии рекуперации. При отсутствии тяговой

нагрузки на участке питания тяговой подстанции у рекуперированного электровоза срабатывает защита, и рекуперативное торможение с возвратом полезной энергии рекуперации в контактной сети завершается, что приводит к запуску схемы реостатного торможения [4]. В этом случае энергия электрического торможения из рекуперативной превращается в реостатную (становится избыточной), т. е. направляется на собственные тормозные резисторы электровоза, где рассеивается теплом в атмосфере без возможности вторичного полезного применения.

Один из способов повысить полноту использования энергии электрического торможения на выполнение полезной транспортной работы – обеспечить участки питания тяговых подстанций с большим потенциалом рекуперации стационарными системами накопления энергии высокой мощности (маховичными, аккумуляторными, теплоаккумулирующими и др.).

Такие системы при отсутствии в контактной сети тяговой нагрузки для приема избыточной энергии рекуперации (энергии реостатного торможения) позволяют запасать избыточную энергию электрического торможения поезда. Причем они не забирают полезную энергию рекуперации при наличии в контактной сети поезда в режиме тяге, а также не способны принимать энергию тяговой подстанции. После приема избыточной энергии электрического торможения накопитель может использоваться в энергетической сети как вторичный источник питания тяговой и нетяговой сети и снижать тем самым потребление мощностей от тяговой подстанции. Этот процесс можно считать регенеративным.

Для расчета экономического эффекта от использования систем накопления энергии высокой мощности необходимо предварительно определить потенциал избыточной энергии электрического торможения электровозов в сети тяговых подстанций постоянного тока каждого отдельного участка обращения поездов.



В настоящее время техническое оснащение тягового подвижного состава и энергетической инфраструктуры позволяет осуществить это при минимальных затратах практически на всех тяговых подстанциях постоянного тока российских железных дорог. В связи с этим цель исследования, представленного в статье, – разработка способа определения объемов избыточной энергии электрического торможения подвижного состава для участков обращения поездов постоянного тока.

### Распределение потоков рекуперативной энергии при торможении поездов

При электрическом торможении состава, управляемого электровозом (далее – Элв1), когда машинист переключает систему управления тяговыми электромашинами в позицию «рекуперативное торможение», тяговая электрическая машина переходит в генераторный режим (Г1) (рис. 1). На выходных клеммах возникает напряжение, превышающее напряжение, формируемое от тяговой подстанции в точке взаимодействия токоприемника и контактной сети. На выходных клеммах Г1 электрический ток начинает протекать в направлении к контактной сети (обратный ток). После клемм электромашин мгновенный рекуперативный ток

идет по цепи в направлении контактной сети в тяговую сеть.

Рассмотрим варианты реализации рекуперативной энергии на участках обращения постоянного тока.

**Вариант 1.** На участке имеется встречный электровоз (далее – Элв 2), идущий в тяге. При наличии в контактной сети нагрузки Элв2, мгновенная мощность которой равна или превышает мгновенную мощность рекуперировавшей электромашин Г1 электровоза Элв1, схема управления тягой в позиции «рекуперативное торможение» сохраняется (ключ К1 замкнут на контактную сеть), поскольку имеющаяся в ней уставка по допустимому верхнему напряжению контактной сети  $U_{\text{верх-элв}}$  не превышена сетевым напряжением  $U_{\text{сети}}$  (т. е.  $U_{\text{сети}} < U_{\text{верх-элв}}$ ).

Вся энергия рекуперации, создаваемая Элв1, уходит в контактную сеть на полезную тяговую нагрузку Элв2, имеющуюся на участке обращения. Объемы распределенной в контактной сети полезной рекуперации фиксируются входными двунаправленными счетчиками рекуперировавшего электровоза (Сч1) как обратная энергия. Топливо-энергетические центры и Трансэнерго учитывают эти объемы в качестве возвращенной на полезную работу рекуперации, формируя планы и нормы энергии рекуперации на уровне эксплуатационного локомотивного депо. Также фидерные

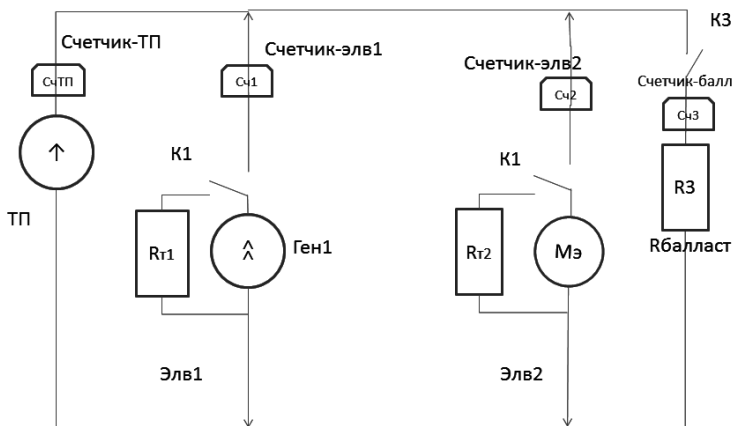


Рис. 1. Обобщенная схема распределения энергии рекуперировавшего электровоза

счетчики тяговой подстанции ( $S_{ч_{тп}}$ ) фиксируют часть полезной рекуперации, которая перетекает между двумя фидерами подстанции, когда Элв2 идет на тяге по другому фидеру относительно Элв1. Организация еще одной точки учета этой полезной энергии рекуперации на шинах тяговой подстанции или в любом другом месте не имеет экономического смысла ни для одного структурного подразделения ОАО «РЖД».

Поскольку энергия полезной рекуперации  $E_{рек-полезн}$  в полном объеме распределяется на полезную нагрузку, то ее перенаправление на иного стороннего потребителя (например, для отопления объектов инфраструктуры) также экономически нецелесообразно. В этом случае энергия рекуперации уже полезная, т. е. утилизируется сетевой нагрузкой (главным образом на тягу других поездов), а перенаправление ее части на другого потребителя снизит ее поступление на тяговую нагрузку. Даже если организовать такой отбор части полезной рекуперации от тяговой нагрузки, то в целом ее общий объем при этом не изменится.

**Вариант 2.** На участке нет идущего в тяге электровоза Элв2 либо ключ К2 разомкнут от контактной сети, балластного сопротивления тоже нет (ключ К3 разомкнут). При отсутствии в контактной сети нагрузки мгновенная мощность сети существенно ниже, чем мгновенная мощность рекуперировавшей электромашины Г1 электровоза Элв1. В силу этого напряжение на клеммах Г1 растет. При  $U_{сети} > U_{верх-элв}$  схема управления тягой электровоза в позиции «рекуперативное торможение» не реализуется.

Сразу после этого автоматически реализуется схема «реостатное торможение», К1 переключается с сети на тормозные резисторы  $Rt1$ , и ток с клемм Г1 электровоза Элв1 направляется на них. При этом контактная сеть электрически не связана с контуром  $Rt1 - Г1$ . Вся энергия с Г1 утилизируется на тормозных резисторах  $Rt1$ , являясь реостатным торможением  $E_{реостат}$  (так как не утилизируется на полезную нагрузку).

Счетчики  $S_{ч1}$  и  $S_{ч_{тп}}$  не могут учитывать энергию  $E_{реостат}$ , поскольку не находятся в электрической цепи с тормозным резистором  $Rt1$ .

Полный объем рекуперативной энергии поезда (суммы поездов)  $E_{рек}$  за период (день, месяц, год) складывается из объемов его полезной рекуперации  $E_{рек-полезн}$  и избыточной энергии реостатного торможения  $E_{реостат}$  (т. е.  $E_{рек} = E_{рек-полезн} + E_{реостат}$ ).

Чтобы достичь экономического эффекта для ОАО «РЖД» по утилизации избыточной рекуперации, необходимо перенаправить  $E_{реостат}$  с  $Rt1$  на иную полезную нагрузку, например на накопитель.

### Решение проблемы перераспределения избыточной энергии рекуперации в полезную

В данном случае используются в том числе стационарные накопители энергии (теплоаккумуляторы, маховичные, суперконденсаторные и т. п.). В составе оборудования накопителей есть модули управления, подключающие ключом КЗ свои агрегаты к контактной сети в качестве нагрузки при достижении значения напряжения в контактной сети уровня верхней уставки накопителя  $U_{нак-верх}$ . При этом для уставок электровоза Элв1 и накопителя должно выполняться условие  $U_{верх-элв} > U_{сети} > U_{нак-верх}$ .

Счетчики энергии, рассмотренные в варианте 1 [5, 6], неприменимы для определения объемов избыточной энергии рекуперативного торможения  $E_{рекуп}$  прямым инструментальным способом, так как они не входят во внутренний контур между Г1 и  $Rt1$ , по которому идет избыточный рекуперативный ток.

Для реализации инструментального измерения объемов всей избыточной энергии рекуперативного торможения  $E_{рекуп}$  на участках исследуемой тяговой подстанции было разработано решение, позволяющее проводить измерения без вмешательства в электрическую схему электровозов.

Конструктивно схема решения представляет собой мобильную нагрузочную станцию, способную принимать избыточную энергию, создаваемую в процессе рекуперативного торможения подвижного состава, находящегося на расстоянии от тяговой подстанции, на которой устанавливается сам комплекс.

В схему нагрузочной станции включены нормально разомкнутый ключ, система учета энергии, набор блоков сопротивления, коммутационные аппараты (рис. 2).

Нормально разомкнутый ключ представляет собой соединенные в последовательную цепь реле пониженного и повышенного напряжения с регулирующим резистором, предназначенным выставлять на испытательном стенде входное и выходное напряжения для замыкания и размыкания контактной сети с блоками реостатов соответственно. При достижении напряжения выше отметки напряжения тяговых нужд (3500–4000 кВ) происходит замыкание контактов реле на шунтовую вставку, и избыточная энергия перенаправляется к блокам реостатов. При падении напряжения рекуперации (3800 кВ) происходит размыкание цепи. Этот способ замыкания не позволяет перенаправлять

тяговые мощности на стационарную нагрузочную станцию.

Система учета в этом случае предназначена для определения остаточной избыточной мощности, приходящей на нагрузочную станцию. На основании полученных результатов можно говорить о потенциале и эффективности рекуперативного торможения на участке, оснащённом такой нагрузочной станцией. В дальнейшем использование этих данных позволит с высокой точностью определять требуемые мощности системы накопления и составлять технико-экономические обоснования целесообразности проектов модернизации. Показания с системы учета можно снимать и периодически при обслуживании, и постоянно в дистанционном онлайн-режиме, так как система может быть оснащена модулями передачи цифровых данных на заранее подготовленные рабочие места. Данные хранятся на виртуальных серверах неограниченное время, а в модуле памяти – до 30 календарных дней.

Конструкция нагрузочной станции включает блоки сопротивлений, которые выполнены в виде шкафов. Каждый шкаф оснащён резисторами типа КФП-10Л, собранными из отдельных

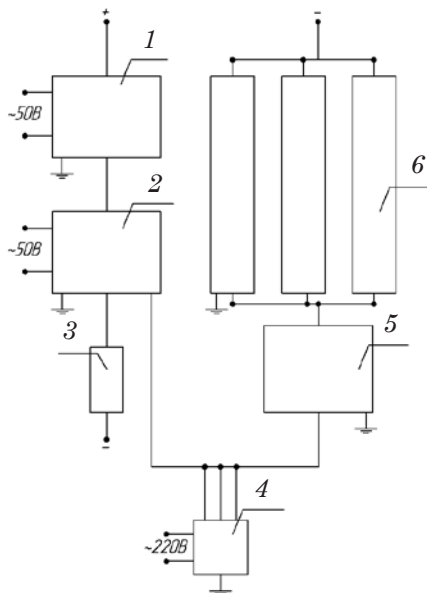


Рис. 2. Принципиальная схема нагрузочной станции:

1 – реле повышенного напряжения (типа РПН-496); 2 – реле пониженного напряжения (типа РНН-497); 3 – балластное регулируемое сопротивление; 4 – система учета энергии, оснащенная трансформаторами тока и напряжения; 5 – коммутационный аппарат дуальных тиристоров; 6 – шкафы резисторов

элементов резисторов КФ, которые установлены на шпильках, изолированных слюдопластовыми трубками, и прикреплены к раме шкафа, представляющей собой сварную конструкцию из стальных полос. Элементы резисторов КФ изолированы от рамы фарфоровыми шайбами и состоят из держателя, на который надеты ребристые кордиеритовые изоляторы с канавками, спирали из фехралевой ленты, намотанной на ребро высокого активного сопротивления ХІЗ104. К концам спирали припаяны выводы. Число шкафов определяется максимальным расчетным током рекуперации для данного участка.

Коммутационные аппараты выполнены в виде дуальных тиристоров, предназначенных для замыкания шкафов с резисторами при превышении токовых значений рекуперации. В схеме предусмотрено три дуальных силовых тиристора для трехступенчатого перераспределения избыточного тока рекуперации на шкафах резисторов: первая ступень тока – до 1000 А, вторая – от 1000 до 1800 А, третья – от 1800 до 2400 А.

Иные способы измерить объемы избыточного рекуперативного торможения поезда  $E_{\text{рекуп}}$  по варианту 2, кроме описанных выше (на бортовых тормозных резисторах электровозов или на балластных стационарных резисторах), на участках тяговых подстанций, не оснащенных инверторными преобразователями DC/AC, невозможны. Все ранее разработанные способы учета рекуперативной энергии в контактной сети (кроме применения инверторных

преобразователей) касаются лишь учета полезной энергии  $E_{\text{рек-полезн}}$  [7], данные по которой для питания стационарной тяговой нагрузки не имеют значения, поскольку не раскрывают объемы энергии избыточного торможения  $E_{\text{рекуп}}$ .

## Выводы

Одним из наиболее эффективных вариантов увеличения энергоэффективности перевозочной работы является повышение в контактной сети объемов полезной рекуперативной энергии при торможении поездов. Если в сети достаточно нагрузки, то увеличение объемов полезной рекуперации обеспечивается за счет организационных мероприятий по включению таких режимов торможения и за счет технических мероприятий по повышению готовности электровозов к таким режимам. Для случаев отсутствия одновременности электрического торможения и достаточной сетевой нагрузки отложенное перенаправление избыточной рекуперативной энергии возможно при использовании стационарных буферных накопителей. Определить требуемые параметры этих устройств можно на основе измерения объемов избыточной энергии рекуперативного торможения. Наилучший способ такого измерения для единичной тяговой подстанции – использование стационарного нагрузочного комплекса с управляемым ключом. Предложенное устройство позволяет провести полное измерение потенциала избыточной энергии электрического торможения поездов на всех тяговых подстанциях постоянного тока ОАО «РЖД». ■

## Литература

1. Об энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 25.11.2011 г. № 2718. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=35> (дата обращения: 27.02.2024).
2. Андреев В. Е. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» и актуальные вопросы ее реализации // Евразия Вести. XI 2021. С. 3.
3. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте. Москва : Издательский дом МИСиС, 2012. 620 с.
4. Плакс А. В. Системы управления электрическим подвижным составом. Москва : Маршрут, 2005. 360 с.

5. Об утверждении методики планирования и нормирования энергии рекуперации на уровне эксплуатационного локомотивного депо : распоряжение ОАО «РЖД» от 15.01.2013 г. № 44р. Москва : ОАО «РЖД», 2014. 14 с.
6. Незевак В. Л., Шатохин А. П. Мониторинг выполнения норм удельной рекуперации в границах произвольной зоны мониторинга участка постоянного тока // Известия Транссиба. 2015. № 2 (22). С. 87–96. ISSN 2220-4245.
7. Незевак В. Л., Шатохин А. П. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии // Мир транспорта. 2018. Т. 16. № 2 (75). С. 84–94. ISSN 1992-3252.

#### References

1. On the energy strategy of JSC «Russian Railways» for the period up to 2015 and for the future up to 2030 : approved by the Order of JSC «RZD» dated 25.11.2011 No. 2718. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=35> (access date: 27.02.2024). (In Russian).
2. Andreev V. E. The energy strategy of JSC «Russian Railways» and current issues of its implementation. *Eurasia News*. XI 2021. P. 3. (In Russian).
3. Gapanovich V. A. Energy saving in railway transport. Moscow, 2012. 620 p. (In Russian).
4. Plaks A. V. Electric rolling stock control systems. Moscow : Route, 2005. 360 p. (In Russian).
5. On approval of the methodology for planning and rationing energy recovery at the level of an operational locomotive depot : the Order of JSC «RZD» dated 15.01.2013 No. 44r. Moscow : JSC «RZD», 2014. 14 p. (In Russian).
6. Nezevak V. L., Shatokhin A. P. Monitoring of compliance with specific recovery standards within the boundaries of an arbitrary monitoring zone of a DC section. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2015. No. 2 (22). Pp. 87–96. ISSN 2220-4245. (In Russian).
7. Nezevak V. L., Shatokhin A. P. Features of the traction load for determining the parameters of the electric energy storage device. *World of Transport and Transportation*. 2018. Vol. 16. No. 2 (75). Pp. 84–94. ISSN 1992-3252. (In Russian).

*Статья сдана в редакцию 14 марта 2024 года*

# Механика машин и роботов

УДК 629.4.043.2

А. Э. Павлюков, М. В. Жуйков

## Оценка прочности каркаса кабины машиниста грузового локомотива при аварийных столкновениях

UDK 629.4.043.2

A. E. Pavlyukov, M. V. Zhuykov

## Assessment of a strength of a driver's cabin frame in a freight locomotive during emergency collisions

### Аннотация

В статье проанализированы последствия аварийных столкновений грузовых локомотивов на железнодорожных переездах и дана оценка прочности каркаса кабины машиниста, в конструкции которой применяются стандартные прокатные и гнутосварные профили из низколегированной стали. В ходе исследований при помощи метода конечных элементов выполнены расчеты в двух программных комплексах – зарубежном ANSYS WORKBENCH 2023R1 и российском ЛИРА 10.12. Разработаны две КЭ-модели с применением балочных и оболочечных конечных элементов, позволившие оценить прочность напряженно-деформированного состояния каркаса кабины машиниста. По результатам расчетов сделаны выводы о применимости каждой из моделей и предложены возможные направления дальнейших исследований в области моделирования аварийных столкновений грузовых локомотивов с препятствиями различного рода.

**Ключевые слова:** аварийное столкновение, грузовой локомотив, система пассивной безопасности, каркас кабины машиниста, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние  
DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-93-101

### Abstract

The article is based on an analysis of consequences after emergency collisions of freight locomotives at railway crossings. It assesses the strength of the driver's cabin frame the design of which uses standard rolled and bent-welded profiles made of low-alloy steel. During the research calculations were performed using the finite element (FE) method in two software systems – foreign system ANSYS WORKBENCH 2023R1 and domestic system LIRA 10.12. Two FE models were developed using beam and shell finite elements which made it possible to evaluate the strength of the stress-strain state of the driver cabin frame. Based on the calculation results conclusions were drawn about the applicability of each of the models and possible directions for further research in the field of modeling emergency collisions of freight locomotives were proposed.

**Keywords:** emergency collision, freight locomotive, passive safety system, driver cabin frame, finite element method, stress-strain state  
DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-93-101

Статья рекомендована к публикации А. В. Смольяниновым, д-ром техн. наук, профессором, Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: ASmolyaninov@usurt.ru.

**Александр Эдуардович Павлюков**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, Россия. E-mail: apavlukov@mail.ru. ORCID 0000-0003-1735-6532.

**Михаил Владимирович Жуйков**, аспирант кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, Россия. E-mail: zhuykov\_ulkm@mail.ru. ORCID 0000-0002-7659-8497.

© А. Э. Павлюков, М. В. Жуйков, 2024

The article is recommended for publication by A. V. Smolyaninov, DSc in Engineering, Professor, Ural State University of Railway Transport. E-mail: ASmolyaninov@usurt.ru.

**Alexander Eduardovich Pavlyukov**, DSc in Engineering, Professor of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia. E-mail: apavlukov@mail.ru. ORCID 0000-0003-1735-6532.

**Mikhail Vladimirovich Zhuykov**, postgraduate student of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia. E-mail: zhuykov\_ulkm@mail.ru. ORCID 0000-0002-7659-8497.

© A. E. Pavlyukov, M. V. Zhuykov, 2024

На железнодорожных переездах ежегодно происходят аварийные столкновения локомотивов с разного рода препятствиями (в большинстве случаев – с грузовыми автомобилями), что не только приводит к серьезным повреждениям подвижного состава, в частности кабин машинистов, но и создает угрозу жизни и здоровью пассажиров и работников транспорта. Например, в период с 2001 по 2008 г., согласно данным, приведенным в работе [1], на путях общего пользования более 72 % всех столкновений произошло на неохраняемых железнодорожных переездах. Последствия одного из подобных случаев аварийного столкновения представлены на рис. 1 (23 октября 2021 г. на железнодорожном переезде локомотив столкнулся с грузовым автомобилем, помощник машиниста скончался от полученных травм) [2].

Анализ статистических данных доказывает актуальность и необходимость в разработке и реализации мер, направленных на минимизацию травматичности и на исключение возможной гибели членов локомотивных бригад. Например, в статье [3] предложена система активной безопасности, позволяющая

предотвращать столкновения на железнодорожном переезде при вынужденной остановке автотранспорта. Вместе с тем требуется совершенствовать не только системы активной безопасности, но и элементы систем пассивной безопасности, и одним из путей достижения этих целей является проектирование кабины машиниста, обеспечивающей требуемый уровень прочности.

В частности, в статье [4] на основании выполненных расчетов выявлены слабые места конструкции кабины, сформулировано приближенное представление о взаимодействии ее элементов при наезде на препятствие, даны рекомендации по усилению этих элементов. В работах [5, 6] определены предельные значения нагрузок, при которых в случае аварийного столкновения локомотива с препятствием силовой каркас кабины не будет разрушен.

Для повышения безопасности локомотивных бригад и снижения ущерба, причиняемого подвижному составу в результате аварийных столкновений с разного рода препятствиями, в 2022 г. в России были утверждены и введены в действие технические требования [7]. В них в том числе приведены режимы



Рис. 1. Последствия столкновения локомотива с грузовым автомобилем

нагрузки каркаса кабины машиниста, разработанные с учетом европейского и американского опыта [8, 9] и отражающие наиболее вероятные случаи аварийных столкновений.

Прочность каркаса кабины машиниста грузового локомотива, согласно техническим требованиям [7], должна быть обеспечена для пяти режимов нагружения (рис. 2). В режиме нагружения 1 предусматривается приложение равномерно распределенного усилия 500 кН на всю ширину подоконной рамы каркаса. В режимах нагружения 2, 3 и 4 к передней угловой стойке прикладываются усилия в 450, 200 и 1300 кН соответственно. В режиме нагружения 5 усилие 100 кН прикладывается вертикально вниз к передней угловой стойке кабины управления в уровне соединения с элементами конструкции крыши (или с конструкцией над лобовым стеклом кабины

управления, что определяется в зависимости от силовой схемы ее каркаса). В режимах нагружения 2 и 3 допускается прикладывать усилия от продольного до поперечного направления, в продольном направлении против хода локомотива, а также в поперечном (к ходу локомотива) направлении извне к срединной вертикальной плоскости локомотива. В режиме нагружения 4 усилие прикладывается в продольном направлении против хода локомотива в уровне соединения трех рам: рамы пола, подоконной рамы и стеновых рам. В режиме нагружения 2 усилие прикладывается к угловой стойке на высоте 500 мм от уровня рамы пола. Для режима нагружения 3 предусматривается приложение усилия к угловой стойке на любой высоте от уровня соединения с подоконной балкой до уровня соединения с элементами конструкции крыши.

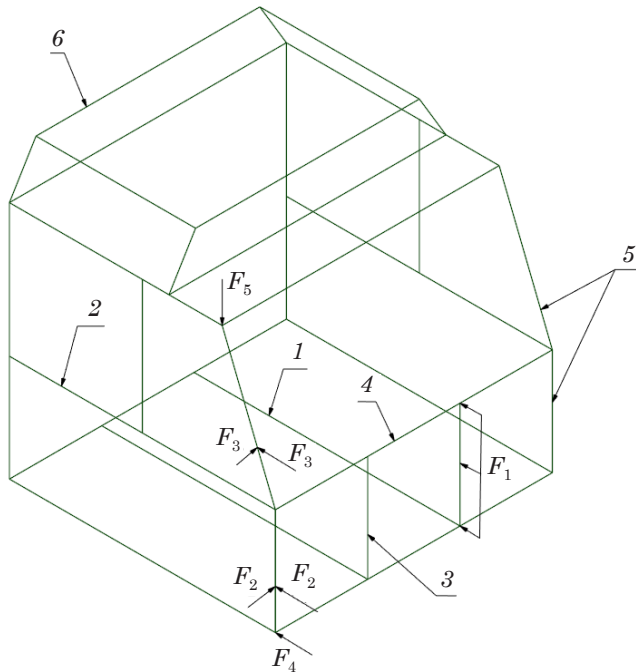


Рис. 2. Схема каркаса кабины машиниста и места приложения нагрузок:  
1 – рама пола; 2 – стеновая рама; 3 и 4 – стойка и балка подоконной рамы;  
5 – угловая стойка; 6 – рама крыши;  $F_1$  –  $F_5$  – приложение нагрузки по соответствующему режиму нагружения



Для оценки прочности каркаса кабины машиниста применяется метод конечных элементов. В расчетной модели задаются граничные условия закрепления каркаса кабины, назначаются механические характеристики используемого материала, выбираются типы конечных элементов.

Граничные условия закрепления каркаса кабины машиниста в расчетных схемах соответствуют его реальному закреплению на раме кузова грузового локомотива. В наших исследованиях в качестве материала каркаса использовалась низколегированная сталь со следующими механическими характеристиками: плотность  $7850 \text{ кг/м}^3$ , модуль упругости  $2,14 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , коэффициент Пуассона  $0,3$ , предел текучести  $345 \cdot 10^6 \text{ Па}$ , предел прочности  $490 \cdot 10^6 \text{ Па}$ .

Каркас выполнен из стандартных прокатных и гнутосварных профилей. При этом учитывалось, что если в твердом теле один размер (длина) больше двух других размеров, характеризующих поперечное сечение, то такое твердое тело можно заменить стержнем (балкой). В случае если в твердых телах один размер (толщина) значительно меньше остальных размеров, то такое твердое тело можно заменить оболочкой или пластиной. В соответствии с этим исходная трехмерная твердотельная геометрическая модель каркаса была преобразована в стержневую, представленную совокупностью отрезков и кривых, определяющих в пространстве форму каркаса, и в оболочечную, представленную множеством ограниченных поверхностей и оболочек.

В расчетной модели, представленной с помощью поверхностей и оболочек, сосредоточенные силы заменялись распределенной нагрузкой по площади элементов конструкции, не выходящей за пределы области  $200 \times 200 \text{ мм}$ .

Конечно-элементные (КЭ) модели каркаса были построены в двух программных комплексах – зарубежном ANSYS WORKBENCH 2023R1 и российском ЛИРА 10.12.

В ANSYS использовались балочные двухузловые конечные элементы BEAM188, а также оболочечные трех- и четырехузловые конечные элементы SHELL181 [10]. В ЛИРА 10.12 применялись балочные двухузловые КЭ № 10 и оболочечные КЭ № 42 [11]. Количественные характеристики КЭ составили: для стержневой модели – 759 узлов и 822 элемента, для оболочечной – 125 123 узла и 128 001 элемент. Средний размер элемента стержневой модели – 100, оболочечной – 20 мм.

Твердотельная геометрическая модель каркаса представлена на рис. 3. Конечно-элементная сетка в месте соединения вертикальной стойки и рамы пола каркаса для оболочечной КЭ-модели показана на рис. 4а, для стержневой – на рис. 4б.

Расчеты выполнены для всех пяти режимов нагружения кабины машиниста в линейной постановке, геометрическая и физические нелинейности не учитывались. Для каждого режима получены распределения полей перемещений и эквивалентных напряжений. В качестве примера на рис. 5 показано распределение полей перемещений для первого режима.

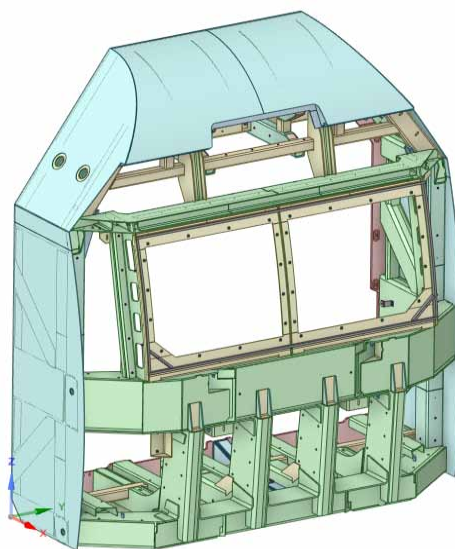


Рис. 3. Твердотельная геометрическая модель каркаса кабины

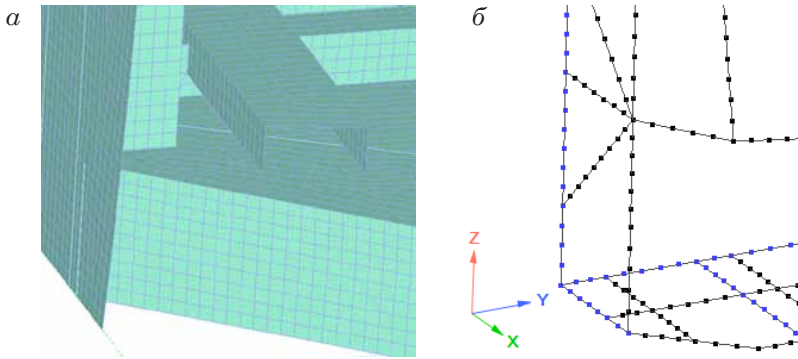


Рис. 4. Фрагменты конечно-элементной оболочечной (а) и стержневой (б) моделей

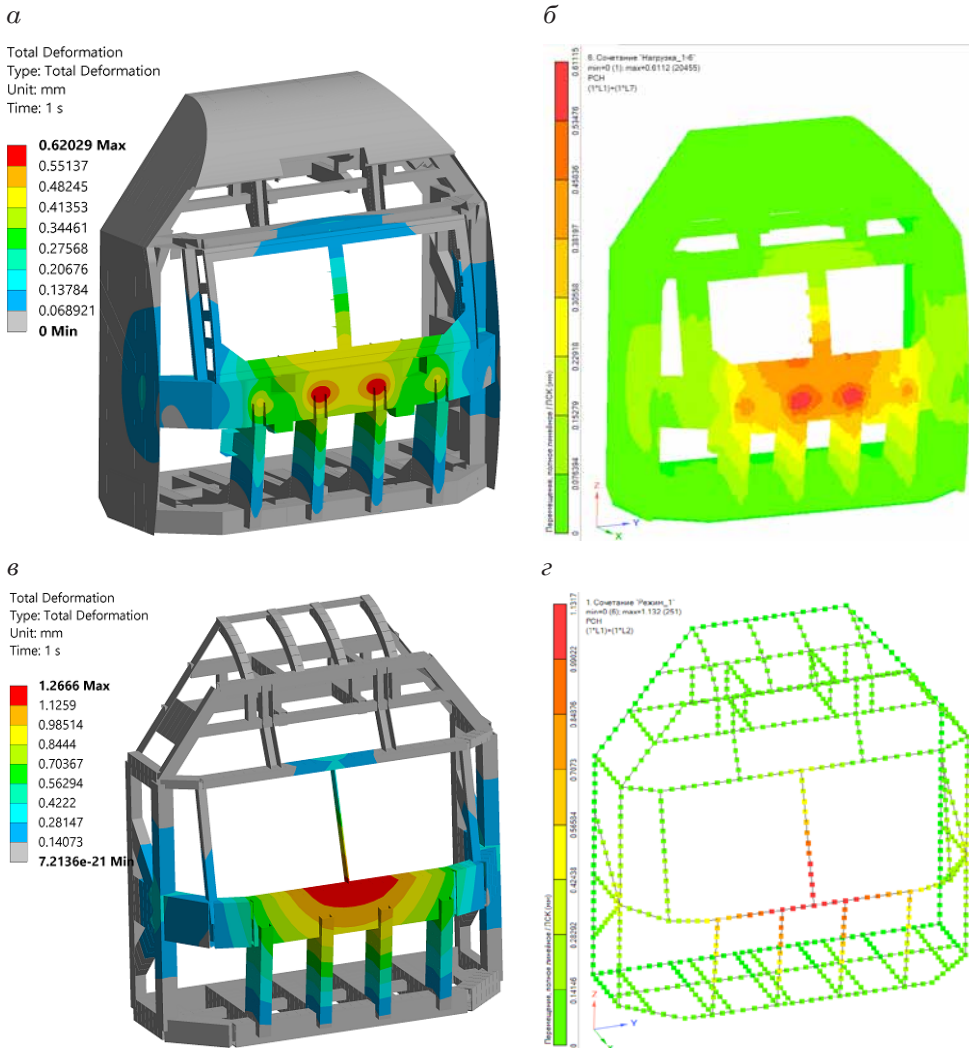


Рис. 5. Распределение полей перемещений для первого режима нагружения, мм:  
а и б – оболочечная КЭ-модель (ANSYS и ЛИРА 10.12 соответственно);  
в и г – стержневая КЭ-модель (ANSYS и ЛИРА 10.12)

Численные значения результатов распределения полей перемещений и эквивалентных напряжений по всем режимам нагружения приведены в табл. 1.

Сравнительный анализ расчетов, выполненных в программных комплексах ANSYS и ЛИПА 10.12, показал незначительные расхождения. Так, по перемещениям для стержневой КЭ-модели результаты отличаются в пределах от 0,17 до 8,34 %, для оболочечной – от 1,47 до 9,43 %; по эквивалентным напряжениям для стержневой КЭ-модели – от 0,19 до 3,02 %, для оболочечной – от 1,03 до 3,58 %.

Для первого режима нагружения наибольшие эквивалентные напряжения возникают в стойках подоконной рамы: в стержневой КЭ-модели они составляют 120,10 МПа (ANSYS) и 123,84 МПа (ЛИПА 10.12), в оболочечной – 100,71 и 98,06 МПа соответственно. Разница значений для стержневой и оболочечной КЭ-моделей 16,14 % (ANSYS) и 20,81 % (ЛИПА 10.12).

Для режимов нагружения 2 и 3 наибольшие эквивалентные напряжения возникают в угловой стойке: в стержневой КЭ-модели для режима 2 они составляют 205,24 МПа (ANSYS) и 205,90 МПа (ЛИПА 10.12),

Таблица 1

Результаты распределения полей перемещений и эквивалентных напряжений

Режим нагружения	ANSYS	ЛИПА 10.12	Расхождение, %
Стержневая КЭ-модель (перемещения, мм)			
1	1,1506	1,1317	1,64
2	1,0079	1,0127	0,47
3	0,5315	0,5324	0,17
4	0,2489	0,2341	5,95
5	0,5826	0,5340	8,34
Оболочечная КЭ-модель (перемещения, мм)			
1	0,6203	0,6112	1,47
2	0,3601	0,3349	7,00
3	0,9552	0,8651	9,43
4	3,5389	3,4066	3,74
5	0,6975	0,6437	7,71
Стержневая КЭ-модель (эквивалентные напряжения, МПа)			
1	120,10	123,84	3,02
2	205,24	205,90	0,32
3	110,06	109,85	0,19
4	289,88	286,11	1,30
5	103,76	105,64	1,78
Оболочечная КЭ-модель (эквивалентные напряжения, МПа)			
1	100,71	98,06	2,63
2	234,75	237,20	1,03
3	358,29	371,60	3,58
4	1499,40	1463,00	2,43
5	246,72	250,60	1,55

для режима 3 – соответственно 110,06 и 109,85 МПа; в оболочечной КЭ-модели для режима нагружения 2 – 234,75 МПа (ANSYS) и 237,20 МПа (ЛИРА 10.12), для режима 3 – соответственно 358,29 и 371,60 МПа. Разница значений стержневой и оболочечной КЭ-моделей составляет для второго режима 12,57 % (ANSYS) и 13,20 % (ЛИРА 10.12), для третьего – соответственно 69,28 и 70,44 %.

При режиме нагружения 4 наибольшие эквивалентные напряжения возникают в балке рамы пола и составляют для стержневой КЭ-модели 289,88 МПа (ANSYS) и 286,11 МПа (ЛИРА 10.12), для оболочечной – соответственно 1499,40 и 1463,00 МПа. Разница значений в стержневой и оболочечной КЭ-моделях 80,67 % (ANSYS) и 80,44 % (ЛИРА 10.12).

Для режима нагружения 5 наибольшие эквивалентные напряжения возникают в балке рамы крыши: в стержневой КЭ-модели их значения составляют 103,76 МПа (ANSYS) и 105,64 МПа (ЛИРА 10.12), в оболочечной – соответственно 246,72 и 250,60 МПа. Разница значений стержневой и оболочечной КЭ-моделей составляет 57,94 % (ANSYS) и 57,85 % (ЛИРА 10.12).

Прочность каркаса оценивалась по допускаемым напряжениям, т. е. расчетные значения эквивалентных напряжений не должны быть выше допускаемых. Для режимов нагружения 1, 2, 3 и 5 допускаемые напряжения составляют  $0,9 \cdot \sigma_{0,2}$  ( $\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала, из которого изготовлен элемент конструкции каркаса кабины машиниста), для режима 4 –  $0,55 \cdot \sigma_{0,2}$ . Согласно техническим требованиям [7], при сравнении расчетных напряжений с допускаемыми из рассмотрения можно исключить: сварные швы и зоны, прилегающие к сварным швам ближе чем на 20 мм (кроме зон около продольных сварных швов несущих стоек и балок, в которых сварные швы используются для формирования профиля замкнутого поперечного сечения или составного профиля); зоны,

прилегающие к отверстиям в несущих элементах каркаса кабины ближе чем на 20 мм; зоны, прилегающие ближе чем на 100 мм к сварным соединениям угловых стоек каркаса кабины с другими несущими элементами каркаса (кроме несущей обшивки кабины).

Согласно результатам расчетов, выполненных для пяти режимов нагружения, каркас кабины машиниста грузового локомотива обладает достаточной прочностью (при сравнении расчетных напряжений с допускаемыми были исключены описанные выше зоны).

Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния каркаса кабины машиниста грузового локомотива показал, что данные, полученные для стержневой и оболочечной КЭ-моделей, существенно отличаются: по перемещениям разница составляет от 16 до 93 %, по напряжениям – от 13 до 81 %. Стержневую КЭ-модель допустимо использовать для предварительного выбора сечений профилей, из которых будет состоять каркас, а оболочечную – для уточнения напряженно-деформированного состояния.

Максимальные расхождения для режима нагружения 4, составляющие по перемещениям 93 %, а по напряжениям 81 %, обусловлены следующим: расчет выполнен только в области упругих деформаций – упругопластические деформации не учитывались; нагрузка 1300 кН в оболочечной КЭ-модели воспринималась только поверхностью размером 200×200 мм, в то время как в стержневой конечно-элементной модели нагрузка прикладывалась к одному узлу, соединявшему три стержня.

## Выводы

При аварийных столкновениях железнодорожного подвижного состава на путях общего пользования значительным повреждением подвергается кабина машиниста локомотива. Поэтому необходимо не только оценивать ее прочность при помощи линейного квазистатического расчета, но также определять

деформации, ускорения в местах установки кресел машиниста, количество поглощенной кинетической энергии на основе численного моделирования методами явной динамики [12, 13].

Результаты выполненных нами расчетов показали, что значения, полученные в программном комплексе ЛИРА 10.12 (включен Минкомсвязи России в реестр отечественных программных средств для инженерного анализа), незначительно отличаются от данных, полученных с помощью ANSYS WORKBENCH 2023R1. Таким образом, ЛИРА 10.12 может быть

рекомендована как альтернатива иностранным расчетным комплексам в качестве инструмента конечно-элементного анализа для оценки прочности конструкций подвижного состава в статической постановке.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на оценку деформаций и энергоемкости кабины машиниста грузового локомотива в результате столкновений с грузовыми полувагонами, моторвагонным подвижным составом при учете идентификации упруго-пластических свойств низколегированной стали каркаса кабины. ■

### Литература

1. Красюков Н. Ф. Моделирование нагруженности конструкции локомотива при лобовом столкновении с препятствием на железнодорожном пути : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2020. 152 с.
2. Авария на переезде. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1583899&archive=2021.10.25> (дата обращения: 01.03.2024).
3. Попов А. Н. Система для предотвращения столкновений на железнодорожном переезде при вынужденной остановке автотранспорта // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 75–81. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-75-81.
4. Емельянов И. Г., Кузнецов А. В., Миронов В. И. Математическая модель, описывающая напряженное состояние кабины газотурбовоза при встрече с препятствием // Транспорт Урала. 2013. № 4 (39). С. 71–74. ISSN 1815-9400.
5. Emel'yanov I. G., Mironov V. I., Kuznetsov A. V. On an approach to the evaluation of the strength of a spatial rod system under impact loading // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. Issue 2. Pp. 16–23. ISSN 2410-9908.
6. Емельянов И. Г., Миронов В. И., Кузнецов А. В. Определение области безопасной эксплуатации кабины локомотива // Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур (SAFETY2016) : сборник тезисов II международной конференции, Екатеринбург, 26–27 июня 2016 г. Екатеринбург : УрФУ, 2016. С. 94–98.
7. Технические требования к системе защиты локомотивной бригады при аварийном столкновении локомотива с препятствием : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 10.01.2022 г. № 7/п. URL: <https://urizdat.ru/books/zheleznodorozhnyy-transport/bezopasnost-dvizheniya-crb/tehnicheskie-trebovaniya-k-sisteme-zaschity-lokomotivnoy-brigady-pri-avariynom-stolknovenii-lokomotiva-s-prepyatstviem.-utverzhdny-rasporyazheniem-oao-rzhd-ot-10.01.2022-n-7-r.html> (дата обращения: 01.03.2024).
8. Code of federal regulation. Title 49 – Transportation (CFR 49). Subtitle B – Other Regulations Relating to Transportation (Continued). Chapter II – Federal railroad administration. Department of transportation. Part 229 – Railroad locomotive safety standards. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-II/part-229?toc=1> (дата обращения: 01.03.2024).
9. Code of federal regulation. Title 49 – Transportation. Subtitle B – Other Regulations Relating to Transportation (Continued) Chapter II – Federal railroad administration. Department of transportation. Part 238 – Passenger equipment safety standards. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-II/part-238?toc=1> (дата обращения: 01.03.2024).
10. ANSYS Mechanical APDL Element Reference. URL: <https://pdfslide.net/documents/ansys-mechanical-apdl-element-reference.html?page=1> (дата обращения: 01.03.2024).
11. Программный комплекс ЛИРА 10.12. Руководство пользователя. URL: [https://lira-soft.com/upload/iblock/7b9/an6bai2i3shhypwx4gdz9f0lly5daoqv/Rukovodstvo\\_pol\\_zovatelya\\_LIRA\\_10.12.pdf](https://lira-soft.com/upload/iblock/7b9/an6bai2i3shhypwx4gdz9f0lly5daoqv/Rukovodstvo_pol_zovatelya_LIRA_10.12.pdf) (дата обращения: 01.03.2024).

12. Study of deformations and energy intensity of the driver's cabin of a freight electric locomotive during emergency collisions based on numerical simulation / M. Zhuykov, A. Pavlyukov, K. Kolyasov, D. Duvanov // *Railway Transport and Technologies (RTT-2021)* : International scientific and practical conference. AIP Conf. Proc. 2624, 020015 (2023). URL: <https://doi.org/10.1063/5.0132278> (дата обращения: 01.03.2024).
13. Simulation of an Emergency Collision of an Electric Locomotive with a Truck / M. V. Zhuykov, A. E. Pavlyukov, K. M. Kolyasov, D. V. Duvanov // *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference on Transport: Logistics, Construction, Maintenance, Management – TLC2M*. 2023. Pp. 253–259. DOI: 10.5220/0011582500003527.

#### References

1. Krasnyukov N. F. Modeling the loading of a locomotive frame during a head-on collision with an obstacle on the railway track : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2020. 152 p. (In Russian).
2. Accident at a crossing. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1583899&archive=2021.10.25> (access date: 01.03.2024). (In Russian).
3. Popov A. N. System for prevention from collisions at railway crossing at forced stop of motor transport. *Transport of the Urals*. 2023. No. 1 (76). Pp. 75–81. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-75-81. (In Russian).
4. Emelyanov I. G., Kuznetsov A. V., Mironov V. I. Mathematical model describing the stressed state of a gas turbine locomotive cabin when encountering an obstacle. *Transport of the Urals*. 2013. No. 4 (39). Pp. 71–74. ISSN 1815-9400. (In Russian).
5. Emel'yanov I. G., Mironov V. I., Kuznetsov A. V. On an approach to the evaluation of the strength of a spatial rod system under impact loading. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. Issue 2. Pp. 16–23. ISSN 2410-9908.
6. Emelyanov I. G., Mironov V. I., Kuznetsov A. V. Determination of the area of safe operation of the locomotive cabin. *Security problems of construction critical infrastructures (SAFETY2016)* : collection of abstracts from the International conference, Yekaterinburg, June 26–27, 2016. Yekaterinburg : UrFU, 2016. Pp. 94–98. (In Russian).
7. Technical requirements for the locomotive crew protection system in the event of an emergency collision of a locomotive with an obstacle : approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated 10.01.2022 No. 7/r. URL: <https://urizdat.ru/books/zheleznodorozhnyy-transport/bezopasnost-dvizheniya-crb/tehnicheskie-trebovaniya-k-sisteme-zaschity-lokomotivnoy-brigady-pri-avariynom-stolknovenii-lokomotiva-s-prepyatstviem-utverzhdenny-rasporjazheniem-oao-rzhd-ot-10.01.2022-n-7-r.html> (access date: 01.03.2024). (In Russian).
8. Code of federal regulation. Title 49 – Transportation (CFR 49). Subtitle B – Other Regulations Relating to Transportation (Continued). Chapter II – Federal railroad administration. Department of transportation. Part 229 – Railroad locomotive safety standards. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-II/part-229?toc=1> (access date: 01.03.2024).
9. Code of federal regulation. Title 49 – Transportation. Subtitle B – Other Regulations Relating to Transportation (Continued) Chapter II – Federal railroad administration. Department of transportation. Part 238 – Passenger equipment safety standards. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-II/part-238?toc=1> (access date: 01.03.2024).
10. ANSYS Mechanical APDL Element Reference. URL: <https://pdfslide.net/documents/ansys-mechanical-apdl-element-reference.html?page=1> (access date: 01.03.2024).
11. LIRA 10.12 software complex. User's guide. URL: [https://lira-soft.com/upload/iblock/7b9/an6bai2i3shhypwx4gdz9f0lly5daoqv/Rukovodstvo\\_pol\\_zovatelya\\_LIRA\\_10.12.pdf](https://lira-soft.com/upload/iblock/7b9/an6bai2i3shhypwx4gdz9f0lly5daoqv/Rukovodstvo_pol_zovatelya_LIRA_10.12.pdf) (access date: 01.03.2024). (In Russian).
12. Zhuykov M., Pavlyukov A., Kolyasov K., Duvanov D. Study of deformations and energy intensity of the driver's cabin of a freight electric locomotive during emergency collisions based on numerical simulation. *Railway Transport and Technologies (RTT-2021)* : International scientific and practical conference. AIP Conf. Proc. 2624, 020015 (2023). URL: <https://doi.org/10.1063/5.0132278> (access date: 01.03.2024).
13. Zhuykov M. V., Pavlyukov A. E., Kolyasov K. M., Duvanov D. V. Simulation of an Emergency Collision of an Electric Locomotive with a Truck. *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference on Transport: Logistics, Construction, Maintenance, Management – TLC2M*. 2023. Pp. 253–259. DOI: 10.5220/0011582500003527.

Статья сдана в редакцию 17 апреля 2024 года

# Аспирантская тетрадь

УДК 629.052.9

А. А. Корсун

## Математическое моделирование адаптивного торможения высокоскоростного поезда с дисковым тормозом

УДК 629.052.9

A. A. Korsun

## Mathematical modeling of adaptive braking of a high-speed train with the disc type brake

### Аннотация

На основе анализа зависимости коэффициента запаса нажатия тормозной колодки от скорости движения подвижного состава выполнено имитационное компьютерное моделирование адаптивной системы управления процессом торможения высокоскоростного поезда. Найдена зависимость давления в тормозном цилиндре от заданного значения коэффициента. Результаты моделирования показали, что использование алгоритма адаптивного торможения позволяет сократить тормозной путь, снизить вероятность заклинивания колесных пар и обеспечить уровень комфорта пассажиров при торможении поезда.

Исследование выполнено в рамках задания по государственной работе «Адаптивная система автоматического управления с повышенной эффективностью тормозами пассажирских и высокоскоростных поездов» № 121050600026-9 от 06.05.2021.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, пассажирский подвижной состав, электропневматические тормоза, двухпроводная схема управления электропневматическими тормозами, адаптивное торможение

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-102-110

### Abstract

Based on the analysis of the dependence of the brake pad pressure reserve coefficient on the speed of movement of the rolling stock, a simulation computer simulation of the adaptive braking control system of a high-speed train was performed. The dependence of the pressure in the brake cylinder on the set value of the coefficient is found. The simulation results showed that the use of the adaptive braking algorithm makes it possible to shorten the braking distance, reduce the likelihood of wheelsets jamming and ensure the comfort level of passengers when braking a train.

The study was carried out within the framework of the state-sponsored project «Adaptive automatic control system with increased efficiency for passenger and high-speed trains» No. 121050600026-9 dated 06.05.2021.

**Keywords:** mathematical modeling, passenger rolling stock, electro-pneumatic brakes, two-wire control circuit for electro-pneumatic brakes, adaptive braking

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-102-110

Статья рекомендована к публикации А. М. Худоговым, д-ром техн. наук, профессором, Иркутский государственный университет путей сообщения. E-mail: a.hudonogov@yandex.ru.

Антон Александрович Корсун, аспирант кафедры «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия. E-mail: korsunanton1998@gmail.com. ORCID 0000-0002-7117-0985.

© А. А. Корсун, 2024

The article is recommended for publication by A. M. Khudonogov, DSc in Engineering, Professor, Irkutsk State Transport University. E-mail: a.hudonogov@yandex.ru.

Anton Alexandrovich Korsun, postgraduate student of Electric Rolling Stock Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: korsunanton1998@gmail.com. ORCID 0000-0002-7117-0985.

© A. A. Korsun, 2024

## Введение

Тормозные характеристики подвижного состава играют определяющую роль в обеспечении безопасности движения поездов. Несмотря на то что существующие способы и средства торможения доказали свою надежность, все же они располагают большим потенциалом для повышения тормозной эффективности. Применяемый сегодня штатный принцип управления тормозной системой не учитывает изменение запаса силы сцепления колеса с рельсом над силой торможения в процессе снижения скорости. Нередко и регулировочное, и остановочное торможения реализуются в одну ступень. Из-за того что нет четкой регламентации рекомендуемого давления в тормозных цилиндрах в зависимости от фактической скорости, в одних случаях может значительно повышаться вероятность заклинивания колесных пар в результате недостаточной величины ступени отпуска либо ее отсутствия. В других случаях из-за слишком глубокой разрядки тормозного цилиндра машинистом запас по сцеплению колеса с рельсом может использоваться неполноценно, как следствие, техническая скорость будет снижаться, что особенно критично при отставании пассажирского поезда от установленного расписания следования. В настоящее время простейшая адаптация тормозного нажатия по скорости движения реализована на воздухораспределителе KES, применяемом на пассажирских вагонах международного сообщения. Однако двухступенчатая адаптация не обеспечивает требуемой точности регулирования давления в тормозном цилиндре в зависимости от изменяющихся в процессе торможения параметров и не позволяет использовать полный потенциал тормозной системы по сцеплению колеса с рельсом для обеспечения эффективного и безюзового торможения.

В трудах [1, 2] разработан принцип адаптивного управления тормозным нажатием пассажирских поездов. В [3]

рассмотрено математическое моделирование адаптивного торможения пассажирского поезда со скорости 100 км/ч. Так как в Российской Федерации развивается высокоскоростное движение, то моделирование торможения поезда, оснащенного дисковыми тормозами, со скорости движения 200 км/ч представляется чрезвычайно важной задачей.

Параметры, принятые для моделирования: электровоз ЭП20, 6 колесных пар, масса электровоза 130 т, вес электровоза 1274 кН, 20 четырехосных пассажирских вагонов весом по 60 т каждый. Коэффициент вращающихся масс для поездов 0,06 (типовое значение).

Максимальное давление в тормозном цилиндре 0,38 МПа. Минимальная ступень торможения 0,02 МПа. Полное заполнение сжатым воздухом тормозных цилиндров занимает около 5 с. Расчетная сила нажатия цельнометаллических пассажирских вагонов с дисковыми тормозами для скоростей движения до 200 км/ч в перерасчете на стандартные чугунные колодки, согласно ПТР, составляет 80 кН, а в локомотиве ЭП20 – 130 кН (будем считать, что используется только первая ступень нажатия).

Моделирование осуществлялось с использованием известного уравнения движения поезда [4–6] и теории автоматических тормозов подвижного состава [7].

### Определение зависимости давления в тормозном цилиндре от заданного коэффициента запаса по нажатию

Коэффициент трения  $\varphi_k$  для металло-керамического дискового тормоза типа ФМК-11 при скоростях движения  $V$  менее 90 км/ч рассчитывается по формуле

$$\varphi_k = 3 \cdot 10^{-5} V^2 - 5,6 \cdot 10^{-3} V + 0,648. \quad (1)$$

Для скоростей движения более 90 км/ч коэффициент трения принимается постоянным  $\varphi_k = 0,386$  ввиду устойчивости материала накладок дискового тормоза к высоким температурам.



Тормозная сила для дискового тормоза определяется следующим образом:

$$B_{\tau} = \sum K \varphi_k \frac{r_d}{r_k}, \quad (2)$$

где  $K$  – нажатие накладок на тормозной диск, кН;  $r_d$  и  $r_k$  – радиусы диска и колеса соответственно (0,530 и 0,625 м для локомотива, 0,310 и 0,475 м для пассажирского вагона).

С учетом (1) и (2) для локомотива коэффициент запаса по нажатию рассчитывается так:

при скоростях движения менее 90 км/ч

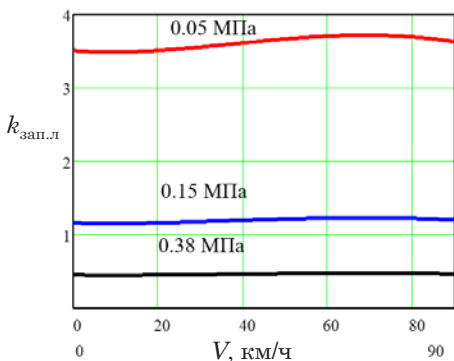
$$k_{\text{зап.л}}(p, V) = \frac{0,21 \frac{V+200}{3V+200} \cdot \frac{0,1q_l+100}{0,4q_l+100} q_l}{K_l(p)(3 \cdot 10^{-5}V^2 - 5,6 \cdot 10^{-3}V + 0,648) \frac{0,530}{0,625}}, \quad (3)$$

при скоростях движения более 90 км/ч

$$k_{\text{зап.л}}(p, V) = \frac{0,21 \frac{V+200}{3V+200} \cdot \frac{0,1q_l+100}{0,4q_l+100} q_l}{K_l(p) 0,386 \frac{0,530}{0,625}}, \quad (4)$$

где  $q_l$  – нагрузка колесной пары локомотива на рельс, кН (для ЭП20 равна 106 кН);  $K_l(p)$  – сила нажатия накладок на тормозной диск локомотива в зависимости от давления в тормозном цилиндре, кН.

а



Для вагона коэффициент запаса по нажатию определяется следующим образом:

при скоростях движения менее 90 км/ч

$$k_{\text{зап.в}}(p, V) = \frac{0,21 \frac{V+200}{3V+200} \cdot \frac{0,1q_b+100}{0,4q_b+100} q_b}{K_b(p)(3 \cdot 10^{-5}V^2 - 5,6 \cdot 10^{-3}V + 0,648) \frac{0,310}{0,475}}, \quad (5)$$

при скоростях движения более 90 км/ч

$$k_{\text{зап.в}}(p, V) = \frac{0,21 \frac{V+200}{3V+200} \cdot \frac{0,1q_b+100}{0,4q_b+100} q_b}{K_b(p) 0,386 \frac{0,310}{0,475}}, \quad (6)$$

где  $q_b$  – нагрузка колеса вагона на рельс, кН (для пассажирского вагона составляет 73,5 кН);  $K_b(p)$  – сила нажатия накладок на тормозной диск вагона в зависимости от давления в тормозном цилиндре, кН.

На рис. 1 представлены коэффициенты запаса по нажатию для локомотива, рассчитанные в соответствии с уравнениями (3) и (4), а на рис. 2 – коэффициенты запаса по нажатию для вагона, рассчитанные в соответствии с (5) и (6).

Как показывает опыт эксплуатации, заклинивание колесных пар электровоза практически невозможно из-за больших значений момента инерции

б

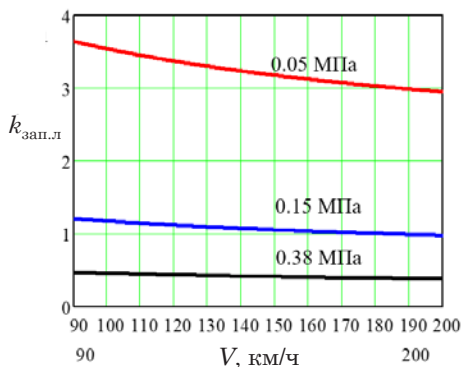


Рис. 1. Зависимость  $k_{\text{зап.л}}$  от скоростей движения 0–90 (а) и 90–200 км/ч (б)

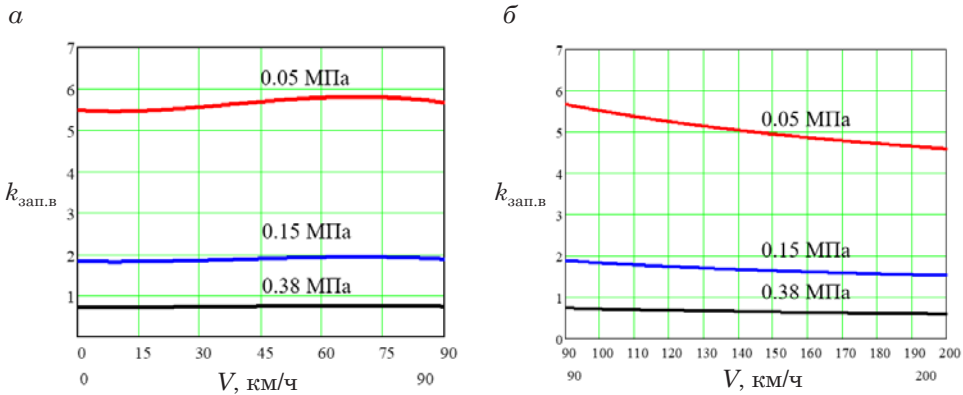


Рис. 2. Зависимость  $k_{\text{зап.в}}$  от скоростей движения 0–90 (а) и 90–200 км/ч (б)

вращающихся масс, поэтому дальнейшее моделирование осуществлялось по критерию  $k_{\text{зап.в}}$ . Моделирование выполнено в программном комплексе MathCad, использовались методы численного решения и аппроксимации.

Сначала были определены массивы корней уравнения нелинейного вида относительно искомого давления:

$$k_{\text{зап.в}}(p, V_{k1}) = k_{\text{зап.в зад } j}, \quad (7)$$

где  $V_{k1}$  – массив значений скорости в диапазоне от 0 до 90 км/ч с дискретностью 10 км/ч;  $k_{\text{зап.в зад } j} = \{1, 5, 2, 3, 4\}$  – массив заданных значений коэффициента запаса нажатия.

Полученные массивы корней для заданных значений коэффициента запаса по нажатию аппроксимированы следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} k_{\text{зап.в зад}} = 1,5: & p = -1,043 \cdot 10^{-7} \cdot V^3 + \\ & + 1,219 \cdot 10^{-5} \cdot V^2 - 1,847 \cdot 10^{-4} \cdot V + \\ & + 0,1825; \\ k_{\text{зап.в зад}} = 2: & p = -7,824 \cdot 10^{-8} \cdot V^3 + \\ & + 9,141 \cdot 10^{-6} \cdot V^2 - 1,385 \cdot 10^{-4} \cdot V + \\ & + 0,137; \\ k_{\text{зап.в зад}} = 3: & p = -5,216 \cdot 10^{-8} \cdot V^3 + \\ & + 6,094 \cdot 10^{-6} \cdot V^2 - 9,234 \cdot 10^{-5} \cdot V + \\ & + 0,0912; \\ k_{\text{зап.в зад}} = 4: & p = -3,912 \cdot 10^{-8} \cdot V^3 + \\ & + 4,57 \cdot 10^{-6} \cdot V^2 - 6,926 \cdot 10^{-5} \cdot V + \\ & + 0,0685. \end{aligned} \quad (8)$$

На рис. 3 показаны значения полученных корней (отмечены точками) и аппроксимационная кривая (непрерывная линия) для  $k_{\text{зап.в зад}} = 3$ . Как видно из рис. 3, погрешность аппроксимации минимальна (для других значений  $k_{\text{зап.в зад}}$  аппроксимация имеет аналогичную погрешность).

Далее была выполнена аппроксимация коэффициентов функций (8): коэффициента при переменной  $V^3$  и свободного члена. Все – в зависимости от значения  $k_{\text{зап.в зад}}$ . На рис. 4 представлены линейная интерполяция при переменной  $V^3$  (показана точками) и плавная аппроксимация (сплошная линия). Для других коэффициентов точность аппроксимации была подобной.

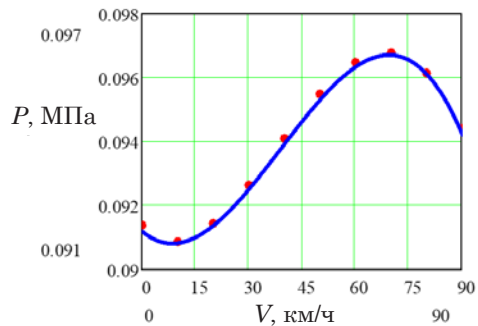


Рис. 3. Значения корней для  $k_{\text{зап.в зад}} = 3$  и их аппроксимация

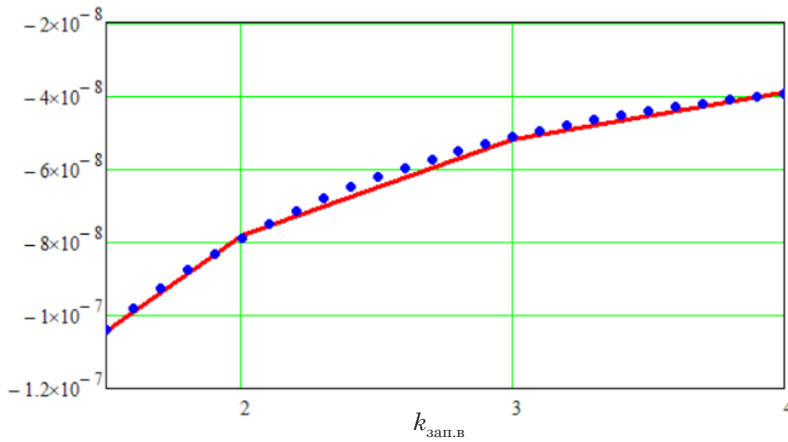


Рис. 4. Линейная интерполяция коэффициента функций (8) при  $V^3$  и плавная аппроксимация

В результате получена зависимость давления в тормозных цилиндрах вагона от заданного значения коэффициента запаса по нажатию накладок на тормозные диски и от скорости движения поезда

$$p(k_{\text{зап.в зад}}, V) = \alpha_3(k_{\text{зап.в зад}})V^3 + \alpha_2(k_{\text{зап.в зад}})V^2 + \alpha_1(k_{\text{зап.в зад}})V + \alpha_0(k_{\text{зап.в зад}}), \quad (9)$$

где:

$$\alpha_0(k_{\text{зап.в зад}}) = 0,452e^{-0,836 k_{\text{зап.в зад}}} + 0,053;$$

$$\alpha_1(k_{\text{зап.в зад}}) = -4,579 \cdot 10^{-4} e^{-0,837 k_{\text{зап.в зад}}} - 5,385 \cdot 10^{-5};$$

$$\alpha_2(k_{\text{зап.в зад}}) = 3,021 \cdot 10^{-5} e^{-0,837 k_{\text{зап.в зад}}} + 3,552 \cdot 10^{-6};$$

$$\alpha_3(k_{\text{зап.в зад}}) = -2,582 \cdot 10^{-7} e^{-0,836 k_{\text{зап.в зад}}} - 3,038 \cdot 10^{-8}.$$

На следующем этапе была выполнена проверка решения (9) путем его подстановки в исходную зависимость (5) при разных значениях  $k_{\text{зап.в зад}}$ . Результаты представлены на рис. 5.

Полученная зависимость позволяет поддерживать заданное значение коэффициента запаса по нажатию на постоянном уровне за счет регулирования давления в тормозном цилиндре

с учетом текущей скорости. Уравнения (9) описывают зависимость требуемого давления в тормозных цилиндрах от заданного значения коэффициента запаса по нажатию в диапазоне скоростей движения 0–90 км/ч.

Далее были выполнены аналогичные действия для поиска зависимости требуемого давления в тормозных цилиндрах от заданного коэффициента запаса по нажатию для диапазона скоростей выше 90 км/ч. В результате аппроксимаций получена следующая зависимость:

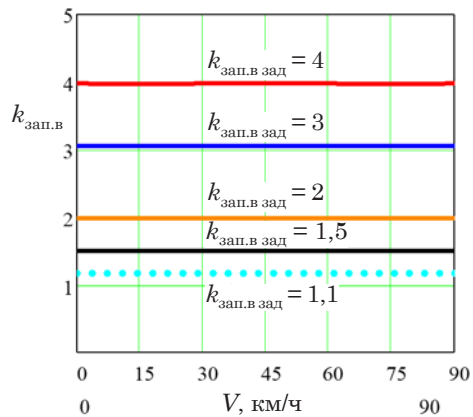


Рис. 5. Реализация коэффициента запаса нажатия накладок на тормозной диск вагона с помощью зависимости (9) в диапазоне скоростей 0–90 км/ч

$$p(k_{\text{зап.в зад}}, V) = \alpha_2(k_{\text{зап.в зад}})V^2 + \alpha_1(k_{\text{зап.в зад}})V + \alpha_0(k_{\text{зап.в зад}}), \quad (10)$$

где:

$$\alpha_0(k_{\text{зап.в зад}}) = 0,6e^{-0,828 k_{\text{зап.в зад}}} + 0,071;$$

$$\alpha_1(k_{\text{зап.в зад}}) = -1,898 \cdot 10^{-3}e^{-0,836 k_{\text{зап.в зад}}} - 2,232 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha_2(k_{\text{зап.в зад}}) = 3,815 \cdot 10^{-6}e^{-0,836 k_{\text{зап.в зад}}} + 4,485 \cdot 10^{-7}.$$

На рис. 6 показаны результаты подстановки зависимости (10) в зависимость (6).

### Математическое моделирование торможения в среде MatlabSimulink

В процессе математического моделирования рассматривалось торможение высокоскоростного поезда со скорости 200 км/ч, движущегося по участку с нулевым уклоном.

Для поддержания значения коэффициента запаса нажатия накладки на диск вагона на заданном уровне реализован следующий алгоритм управления:

$$\begin{cases} u_i = 0, \text{ если } |p - p(k_{\text{зап.в зад}}, V)| < \frac{\Delta p}{2}; \\ u_i = 1, \text{ если } p < [p(k_{\text{зап.в зад}}, V) - 1,5\Delta p]; \\ u_i = -1, \text{ если } p > [p(k_{\text{зап.в зад}}, V) + 1,5\Delta p]; \\ u_i = u_{i-1} \text{ при других условиях,} \end{cases} \quad (11)$$

где  $i$  и  $i - 1$  – текущий и предыдущий моменты времени;  $p(k_{\text{зап.в зад}}, V)$  вычисляется по зависимостям (9) и (10);  $\Delta p = 0,02$  МПа – минимальное изменение давления по ступеням торможения.

На рис. 7 представлены результаты математического моделирования адаптивного торможения высокоскоростного поезда при  $k_{\text{зап.в зад}} = 1,5$ . Как видно из графиков, система управления отслеживает заданное значение коэффициента запаса нажатия накладки на тормозной диск путем регулирования давления в тормозных цилиндрах. Торможение поезда до полной остановки со

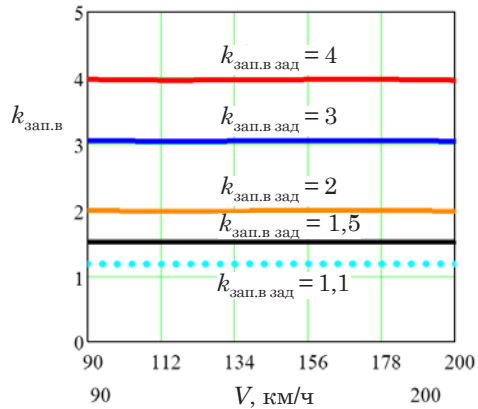


Рис. 6. Реализация коэффициента запаса нажатия накладок на тормозной диск вагона с помощью зависимости (10) в диапазоне скоростей выше 90 км/ч

скорости 200 км/ч составило приблизительно 80,7 с.

На рис. 8 представлены сравнительные результаты исследования обычной системы торможения поезда с постоянным давлением в тормозных цилиндрах, равным 0,162 МПа. В данном случае полное торможение поезда, движущегося со скоростью 200 км/ч, произошло за 84,2 с.

### Выводы

Как показали результаты математического моделирования, коэффициент запаса по нажатию накладки на тормозной диск изменяется незначительно по сравнению с колодочным тормозом [8]. Коэффициент трения накладки о диск изменяется более плавно и в большей степени коррелирует с коэффициентом сцепления колеса с рельсом. Это обусловлено тем, что накладки выполнены из металлокерамики – искусственного материала, представляющего собой гетерогенную композицию металлов или сплавов с неметаллами (керамикой). Керамика, как известно [9], устойчива к высоким температурам, используемым при литье металлов. Поэтому в отличие от чугунных колодок металлокерамические накладки в процессе трибологического

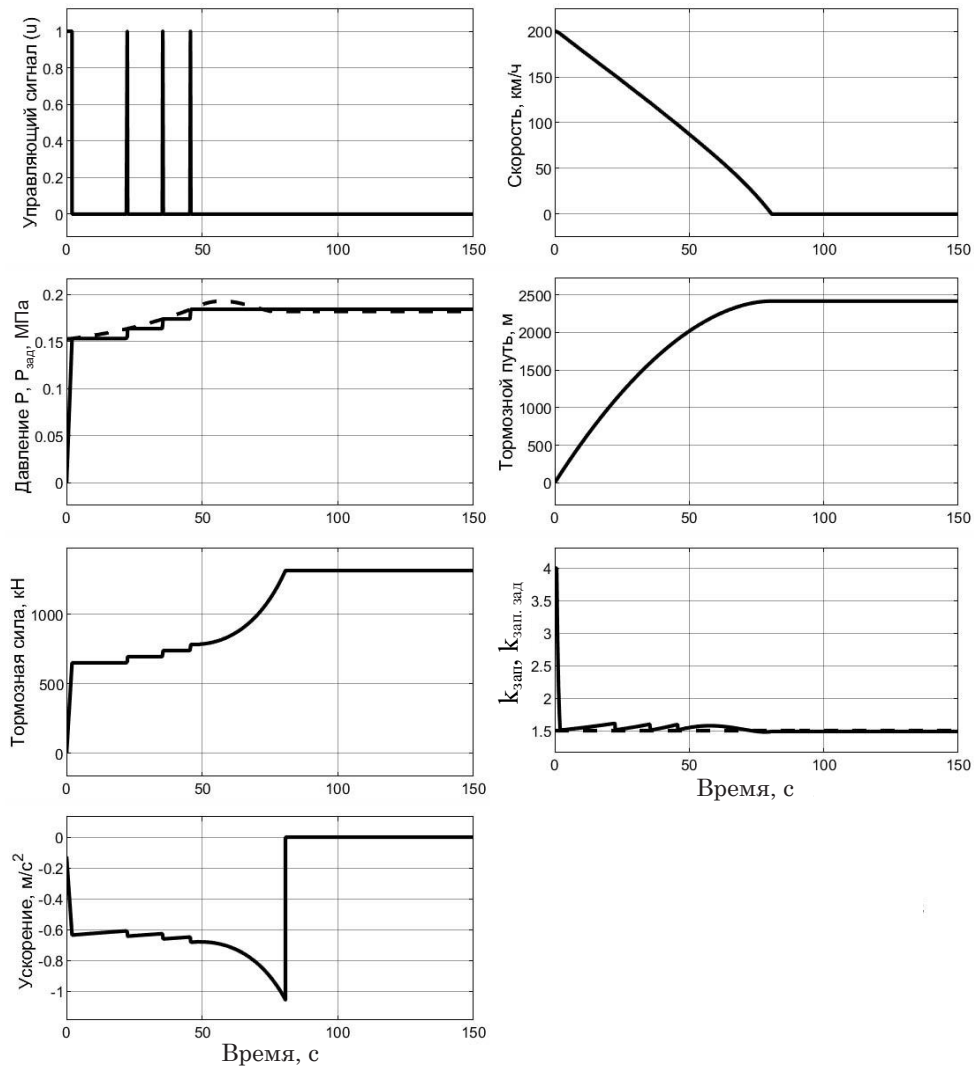


Рис. 7. Результаты исследования адаптивного торможения при  $k_{\text{зап.в зад}} = 1,5$

взаимодействия с тормозными дисками обладают более схожими физическими свойствами при различных температурных режимах.

При использовании дисковых тормозов особенности изменения коэффициента запаса по нажатию приводят к следующему. Система адаптивного торможения хотя и сокращает в какой-то степени тормозной путь поезда, однако, скорее, выполняет функцию предотвращения ошибки машиниста, связанной с перенаполнением тормозного

цилиндра выше допустимых значений, а значит, минимизирует вероятность заклинивания колесной пары. Помимо этого, адаптивная система, поддерживающая баланс между силой торможения и силой сцепления колеса с рельсом на постоянном уровне, позволяет повысить комфорт поездки для пассажиров. Как видно из рис. 7 и 8, адаптивное торможение выравнивает по горизонтальной оси замедление, а тормозная сила более плавно нарастает в диапазоне 25–50 с. Поскольку предложенная

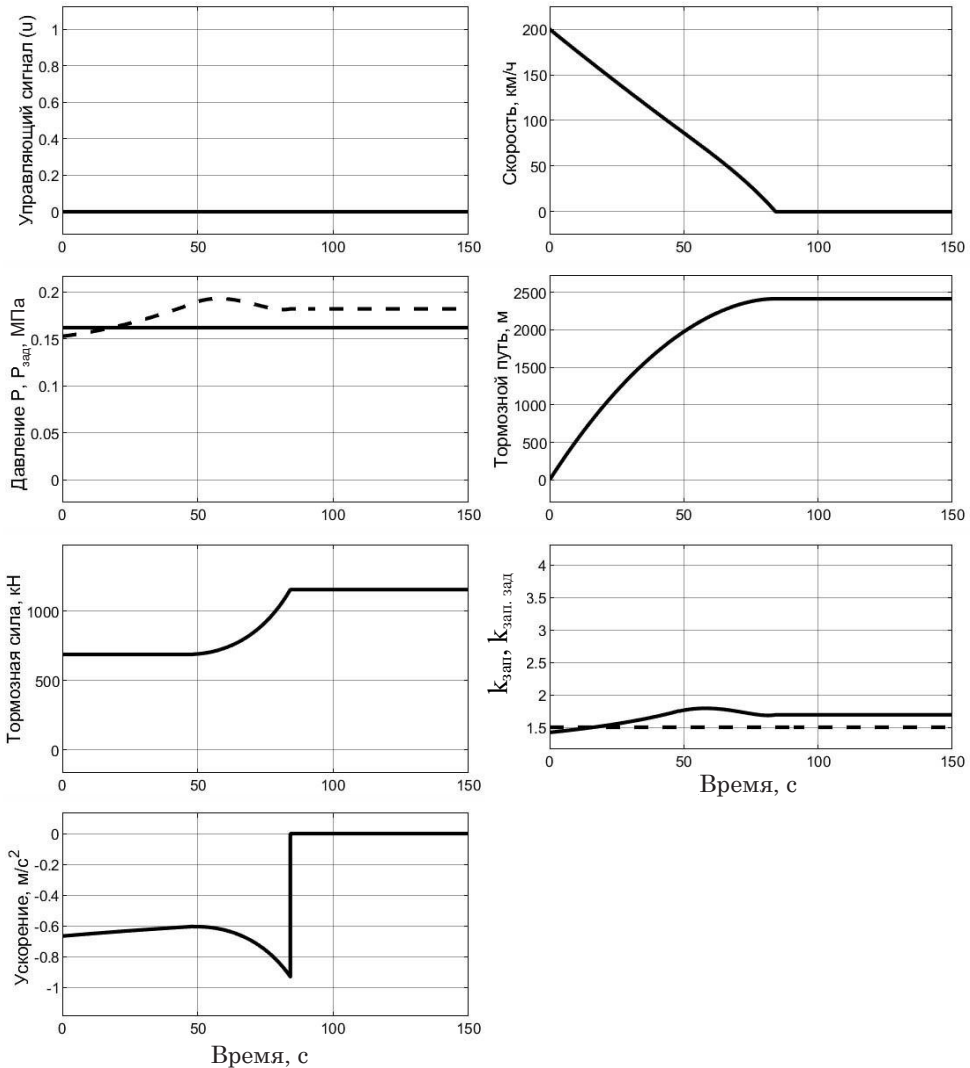


Рис. 8. Результаты исследования торможения при давлении в тормозных цилиндрах  $p = 0,162$  МПа

математическая модель является гибкой, алгоритм служебного остановочного торможения можно доработать в сторону еще большего повышения комфорта

пассажирам, т. е. предусмотреть дополнительные ступени отпуска в диапазоне 60–70 с, чтобы компенсировать увеличение замедления. ■

### Литература

1. Алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием пассажирского подвижного состава / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. А. Корсун, Д. В. Осипов // Транспорт: наука, техника, управление. 2022. № 5. С. 60–64. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-05-11.
2. Повышение эффективности работы тормозной системы пассажирских поездов / П. Ю. Иванов, А. И. Романовский, А. А. Хамнаева [и др.] // Транспорт: наука, техника, управление. 2020. № 3. С. 39–43. DOI: 10.36535/0236-1914-2020-03-6.

3. Математическая модель работы тормозной системы поезда в процессе торможения с учетом динамики коэффициента трения колодки о колесо и сцепления с рельсом в компьютерной среде / А. А. Корсун, П. Ю. Иванов, С. П. Круглов [и др.] // Вестник РГУПС. 2022. № 2 (86). С. 104–113. DOI: 10.46973/0201-727X\_2022\_2\_104.
4. Бабичков А. М., Гурский П. А., Новиков А. П. Тяга поездов и тяговые расчеты. Москва : Транспорт, 1971. 280 с.
5. Кузьмич В. Д., Руднев В. С., Френкель С. Я. Теория локомотивной тяги. Москва : Маршрут, 2005. 448 с.
6. Плакс А. В., Златковский М. Л., Герасенков В. И. Математическое моделирование систем автоматического регулирования скорости поезда // Труды ЛИИЖТ. 1971. Вып. 313. 148 с.
7. Асадченко В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава. Москва : Маршрут, 2006. 392 с.
8. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness / P. Ivanov, A. Khudonogov, E. Dulskiy [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 1614 (2020) 012086. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012086.
9. Попилов Л. Я. Советы заводскому технологу. Ленинград, 1975. 264 с.

#### References

1. Ivanov P. Yu., Dulskiy E. Yu., Korsun A. A., Osipov D. V. Adaptive brake control algorithm for passenger rolling stock. *Transport: science, equipment, management*. 2022. No. 5. Pp. 60–64. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-05-11. (In Russian).
2. Ivanov P. Yu., Romanovskij A. I., Khamnaeva A. A. [et al.]. Increasing efficiency of the airbrake system. *Transport: science, equipment, management*. 2020. No. 3. Pp. 39–43. DOI: 10.36535/0236-1914-2020-03-6. (In Russian).
3. Korsun A. A., Ivanov P. Yu., Kruglov S. P. [et al.]. Mathematical model of the operation of the train braking system in the process of braking according to the dynamics of the friction pad coefficient on the wheel and the rail coupling in a computer environment. *Vestnik RGUPS*. 2022. No. 2 (86). Pp. 104–113. DOI: 10.46973/0201-727X\_2022\_2\_104. (In Russian).
4. Babichkov A. M., Gurskiy P. A., Novikov A. P. Train traction and traction calculations. Moscow : Transport, 1971. 280 p. (In Russian).
5. Kuzmich V. D., Rudnev V. S., Frenkel S. Ya. Theory of locomotive traction. Moscow : Route, 2005. 448 p. (In Russian).
6. Plaks A. V., Zlatkovskiy M. L., Gerasenkov V. I. Mathematical modeling of automatic train speed control systems. *Proceedings of Leningrad Institute of Railway Transport Engineers*. 1971. Issue 313. 148 p. (In Russian).
7. Asadchenko V. R. Automatic brakes of rolling stock. Moscow : Route, 2006. 392 p. (In Russian).
8. Ivanov P., Khudonogov A., Dulskiy E. [et al.] Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness. *Journal of Physics: Conference Series*. 1614 (2020) 012086. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012086.
9. Popilov L. Ya. Tips for the factory technologist. Leningrad, 1975. 264 p. (In Russian).

*Статья сдана в редакцию 26 ноября 2023 года*

УДК 629.46

*С. В. Трескин*

## Классификация способов фиксации тормозных чек в башмаках тормозной рычажной передачи грузовых вагонов

УДК 629.46

*S. V. Treskin*

## Classification of methods for fixing brake checks in the shoes of the brake lever transmission of freight cars

### Аннотация

Статья посвящена обеспечению надежной фиксации тормозных чек в башмаках тормозной рычажной передачи грузовых вагонов. Показано, что в основном выпадения тормозных чек происходят при разгрузке грузовых вагонов вагоноопрокидывателями, что обусловлено несовершенством способа соединения тормозной колодки с башмаком. Проанализированы научные работы, в которых представлены конструкции тормозной чеки, тормозного башмака и колодки, рассмотрены достоинства и недостатки таких конструкций. Автором предложены классификация способов, предотвращающих выпадение тормозных чек, усовершенствование соединения колодки с башмаком путем модернизации базовой конструкции тормозной чеки, а также модернизация тормозной чеки с применением пружинного замка.

**Ключевые слова:** вагоноопрокидыватель, грузовой вагон, полувагон, тормозная система, тормозная колодка, тормозная чека

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-111-120

### Abstract

The article is devoted to ensuring reliable fixation of brake checks in the shoes of the brake lever transmission of freight cars. It is shown that mainly the loss of brake checks occurs when unloading freight cars with car dumpers. The reason for the loss of brake checks is the imperfection of the way the brake pad is connected to the shoe. The scientific works, which present the designs of the brake check, brake shoe and pads, are analyzed, the advantages and disadvantages of such designs are considered. The author of the article proposes a classification of methods to prevent the loss of brake checks, improving the connection of the shoe to the shoe by upgrading the basic design of the brake check, as well as upgrading the brake check using a spring lock.

**Keywords:** car dumper, freight car, gondola car, the braking system, brake pad, brake check

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-111-120

---

Статья рекомендована к публикации О. Л. Маломыжевым, канд. техн. наук, доцентом, Иркутский государственный университет путей сообщения. E-mail: olm@bk.ru.

Сергей Викторович Трескин, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия. E-mail: sergei.treskin@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3590-3843.

© С. В. Трескин, 2024

The article is recommended for publication by O. L. Malomyzhev, PhD in Engineering, Associate Professor, Irkutsk State Transport University. E-mail: olm@bk.ru.

Sergey Viktorovich Treskin, postgraduate student of Railway Cars and Carriage Equipment Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: sergei.treskin@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3590-3843.

© S. V. Treskin, 2024



В структуре грузов, перевозимых железнодорожным транспортом Российской Федерации, значительную долю занимают каменный уголь и различные руды [1]. Анализ основных потребителей этих грузов (морские порты, ТЭЦ, горнодобывающие предприятия) позволяет сделать вывод, что в местах с большим грузопотоком (1 млн т и более) [2, 3] широко используются вагоноопрокидыватели (торцовые, роторные, боковые и комбинированные) [4], поскольку другие способы разгрузки не справляются с такими объемами принимаемых грузов.

Преимущественно вагоноопрокидыватели применяются для разгрузки навалочных грузов. Например, с их помощью разгружаются полувагоны – путем переворачивания на  $170\text{--}175^\circ$  относительно продольной оси. Вагоноопрокидыватели могут использоваться и при разгрузке крытых вагонов. В таком случае происходит наклон вагона относительно поперечной и продольной оси на угол до  $50^\circ$ .

Отечественные грузовые вагоны оснащаются колодочными тормозами.

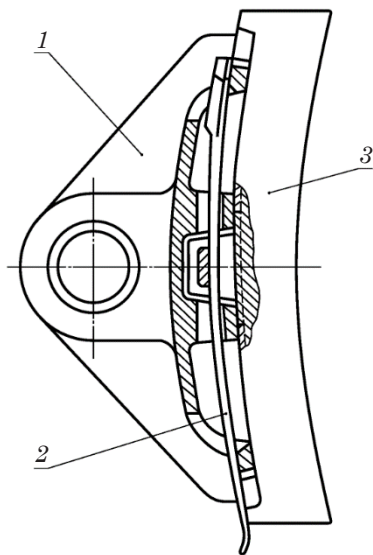


Рис. 1. Соединение тормозной колодки с башмаком тормозной рычажной передачи вагона:  
1 – башмак; 2 – чека; 3 – колодка

Главные элементы этого типа тормозов, реализующие тормозную силу, – композиционные колодки: их устанавливают в башмаки тормозной рычажной передачи и фиксируют с помощью тормозных чек [5, 6]. Схема соединения тормозной колодки с башмаком проиллюстрирована на рис. 1 [6].

Тормозная чека представляет собой выпуклый металлический стержень с площадью сечения, которая уменьшается от верхней части (головки) до заостренной нижней части. Конструкции чек стандартизированы и имеют несколько исполнений для различных видов подвижного состава, но самая распространенная конструкция применяется для грузовых вагонов (рис. 2) [6].

Существенный недостаток закрепления колодки в башмаке с помощью стандартных чек – вероятность выпадения чек и колодок при разгрузке вагоноопрокидывателем, так как конструкция стандартной чеки не предусматривает каких-либо ограничителей от продольных перемещений при ее переворачивании. Возвращение колодок и чек на штатные места требует дополнительных затрат времени, тем самым разгрузка вагонов затягивается. Кроме того, вагоноопрокидыватели используются при разгрузке грузов, которые могут быть направлены на экспорт, соответственно попадание посторонних предметов в эти грузы недопустимо. Устранение рассмотренного недостатка, присущего способу соединения башмака с колодкой, весьма актуально для крупных предприятий (например, для дальневосточных угольных портов), где широко используются роторные вагоноопрокидыватели [7, 8].

При разгрузке полувагонов вагоноопрокидывателями нередки случаи изгиба нижнего конца тормозной чеки (рис. 3) или установки клина из какого-либо материала между чекой и тормозной колодкой для предотвращения их выпадения. Однако эти способы не снимают проблему выпадения тормозных чек и осложняют замену тормозных колодок.

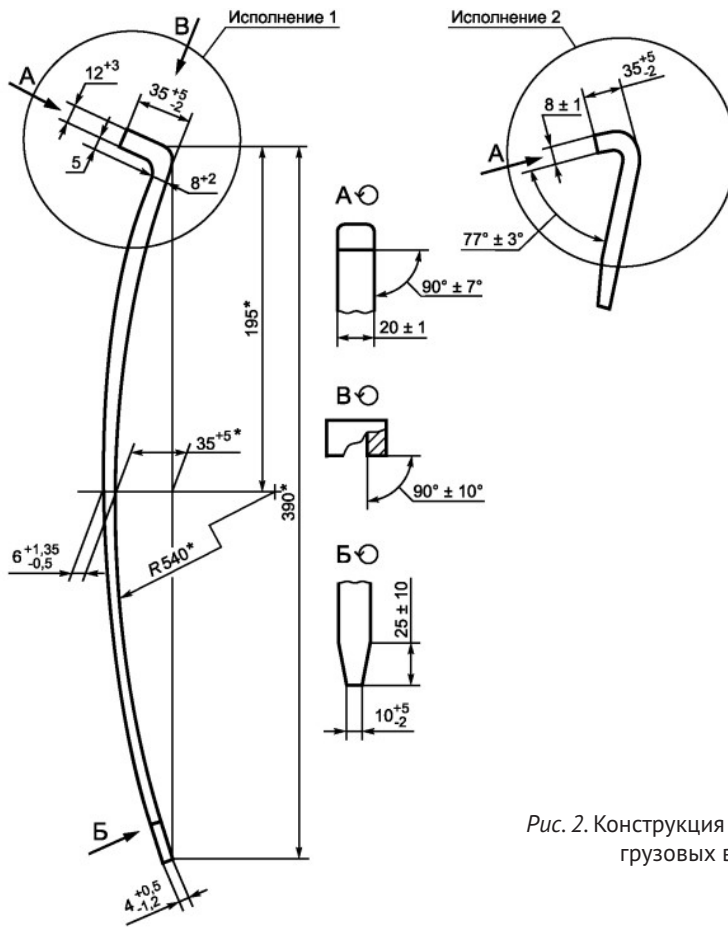


Рис. 2. Конструкция тормозной чеки грузовых вагонов



Рис. 3. Загнутая нижняя часть чеки в башмаке

Цели данной статьи заключаются в рассмотрении различных технических решений, направленных на предотвращение выпадения тормозных чек и колодок при разгрузке грузовых вагонов вагоноопрокидывателями, а также в классификации этих способов и предложении собственного варианта предложения указанной проблемы.

Одним из очевидных решений является усовершенствование конструкции вагоноопрокидывателей. Это объясняется тем, что сегодня парк грузовых вагонов в Российской Федерации составляет более 1,2 млн единиц [9–11], соответственно модернизация конструкций тормозных рычажных передач грузовых вагонов (в основном полувагонов), прежде всего механизма соединения тормозной колодки с башмаком, более дорогостоящее решение.

Усовершенствование конструкции вагоноопрокидывателей может быть реализовано путем внедрения магнитных фиксаторов или механических запорных устройств. В [12] предлагается оснастить вагоноопрокидыватели магнитными блоками на основе ферромагнитных сплавов. Схема магнитного устройства показана на рис. 4. Предполагается, что под действием магнитного поля тормозные чеки будут

примагничиваться к магнитным блокам и башмаку тормозной рычажной передачи, тем самым при опрокидывании вагона будет обеспечена надежная фиксация тормозных чек. Вместе с тем существенным недостатком конструкции может стать остаточная намагниченность элементов тормозной рычажной передачи и колесной пары, поскольку магнитное поле в системе предполагается постоянным. Такая ситуация может привести, например, к дополнительным дефектам на поверхности катания колеса из-за примагничивания к ней различных металлических элементов. Впоследствии это может сказаться, например, на повышении вероятности появления наваров или кольцевых выработок.

Предлагаются варианты конструкций вагоноопрокидывателей с фиксирующими устройствами тормозных чек на основе механических стопоров. Например, известна конструкция вагоноопрокидывателя с использованием П-образной рамы (рис. 5) [13]. При разгрузке вагона приводится в действие устройство фиксации, которое выдвигает стопорные элементы. Фиксация тормозных чек происходит путем прижатия их головок к тормозной колодке или башмаку. При возвращении вагона

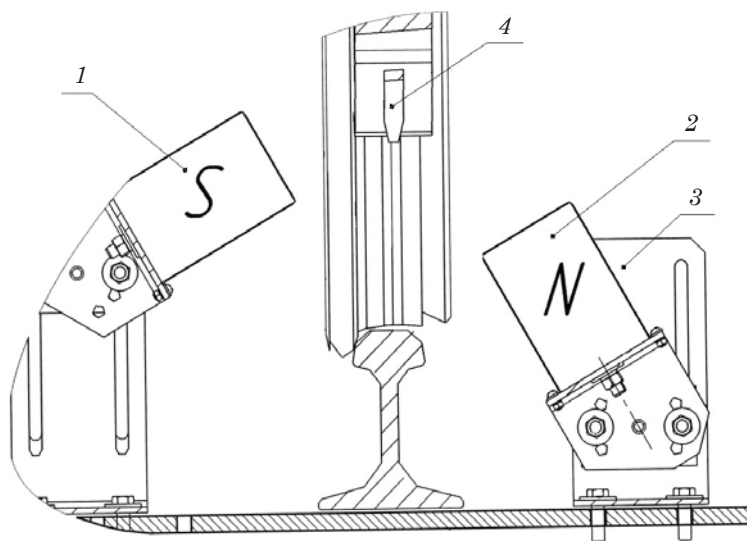


Рис. 4. Магнитное устройство фиксации чек на вагоноопрокидывателе:  
1, 2 – магнитные блоки; 3 – кронштейн; 4 – чека

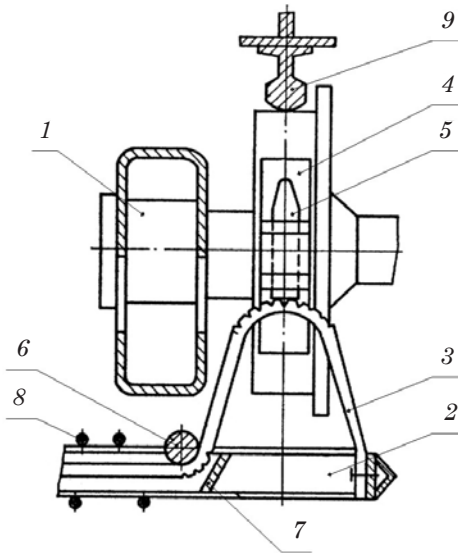


Рис. 5. Конструкция стопорного механизма вагонопрокидывателя, разработанного «Уралтехэнерго»:  
 1 – колесная пара тележки вагона;  
 2 – П-образная рама; 3 – стопорный элемент;  
 4 – тормозная колодка; 5 – тормозная чека;  
 6 – ролик; 7 – направляющий лист;  
 8 – прутки; 9 – рельс

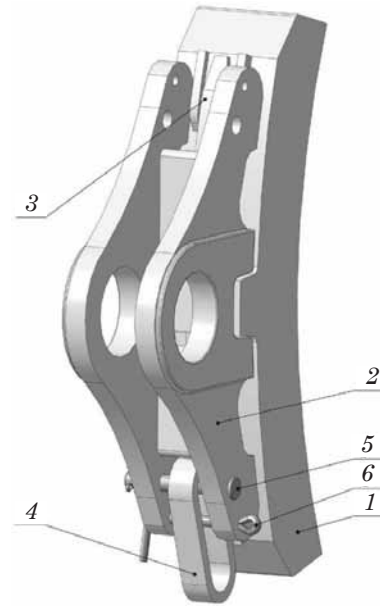


Рис. 6. Устройство крепления тормозной колодки, разработанное в АО «ВНИКТИ»:  
 1 – тормозная колодка; 2 – башмак рычажной передачи; 3 – чека; 4 – головка чеки;  
 5 – предохранительный валик;  
 6 – страховочный шплинт

в начальное положение фиксация тормозных чек прекращается.

Достоинством предлагаемого вагонопрокидывателя является возможное обеспечение надежной фиксации тормозной чеки, однако в данном случае этот процесс осложнен наличием специальных приводов, а также необходимостью центровки подвижного состава в роторе вагонопрокидывателя.

Другим возможным направлением совершенствования способа соединения тормозной колодки и башмака может быть внедрение в конструкцию фиксирующих приспособлений, которые предотвращают выпадение тормозной чеки. Такое устройство крепления тормозной колодки было разработано, например, в АО «ВНИКТИ» [14] (рис. 6). Отличительной чертой предлагаемой конструкции является применение тормозной чеки, которая имеет головку, выполненную в форме петли (рис. 7). В башмаке рычажной передачи сделаны два

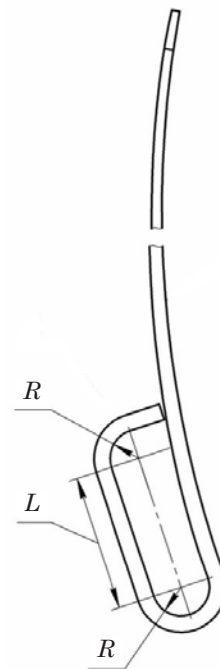


Рис. 7. Схема тормозной чеки, разработанной в АО «ВНИКТИ»

отверстия, одно из которых предназначено для валика, а другое для страховочного шплинта. Валик и шплинт, в свою очередь, служат для фиксации тормозной чеки через ее головку.

Несомненное достоинство этой конструкции – надежная фиксация тормозной чеки и колодки в башмаке. Однако конструкция имеет и недостатки. Например, введение таких элементов, как валик и шплинт, приведет к дополнительным трудовым затратам по замене колодки или чеки в тормозном башмаке. Кроме того, на складах пунктов технического осмотра (ПТО) и текущего ремонта (ТОР) будет необходимо иметь запас шплинтов и валиков на случаи их утери или излома.

В составе конструкции тормозной колодки для надежной фиксации тормозной чеки могут применяться фиксирующие пластины. Известна конструкция приспособления, предотвращающего выпадение тормозных чек, в которой используются тормозные колодки

с фиксирующими пластинами, расположенными с ее тыльной стороны, и тормозные чеки с головкой, направленной в сторону центра ее кривизны (рис. 8) [15]. Такая конфигурация элементов позволяет предотвратить выпадение тормозной чеки при разгрузке вагоноопрокидывателем, но, с другой стороны, могут возникнуть проблемы при замене чеки или колодки, если жесткость фиксирующей пластины будет чрезмерной.

В ООО «ВНИЦТТ» предложен другой способ фиксации тормозной чеки. Он заключается в применении V-образной упругой скобы, одна ветвь которой упирается в поверхность направляющего паза башмака и отогнутым концом цепляется за верхнюю кромку направляющего паза башмака, а другая ветвь прижимается к тормозной чеке, дополнительно ее фиксируя [16]. Этот способ показан на рис. 9. Упругая скоба в башмаке фиксируется шплинтом над местом сгиба.

Достоинства предлагаемой конструкции:

возможность оборудования существующих железнодорожных тормозов V-образной упругой скобой без значительной их переделки;

надежная фиксация тормозной чеки.

Возможные недостатки конструкции:

увеличение времени замены колодки или чеки из-за введения в устройство крепления тормозной колодки к башмаку дополнительных элементов (упругой скобы и шплинта);

необходимость формирования на складах пунктов технического осмотра и текущего ремонта вагонов дополнительных запасов шплинтов и упругих скоб на случаи их замены в результате утери, повреждений, изломов.

Существуют также разработки по модернизации конструкции башмака тормозной рычажной передачи. Например, в [17] предложена конструкция тормозного башмака с напльвами и запорной планкой на опорной поверхности нижнего ребра, однако полностью исключить возможность выпадения тормозной чеки в данном случае достаточно сложно.

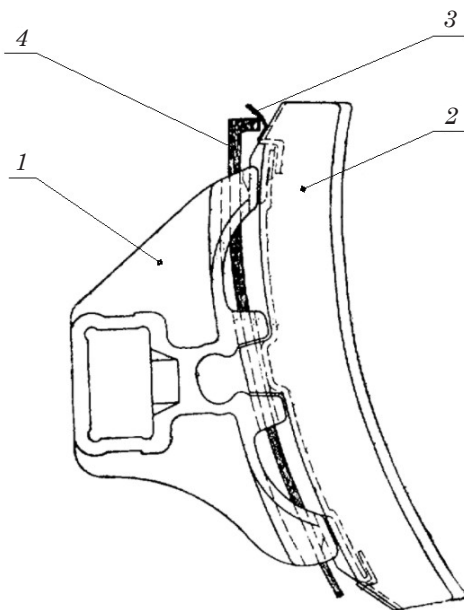


Рис. 8. Соединение тормозной колодки с фиксирующей пластиной и башмаком: 1 – башмак тормозной рычажной передачи; 2 – тормозная колодка; 3 – фиксирующая пластина; 4 – чека с обратной головкой

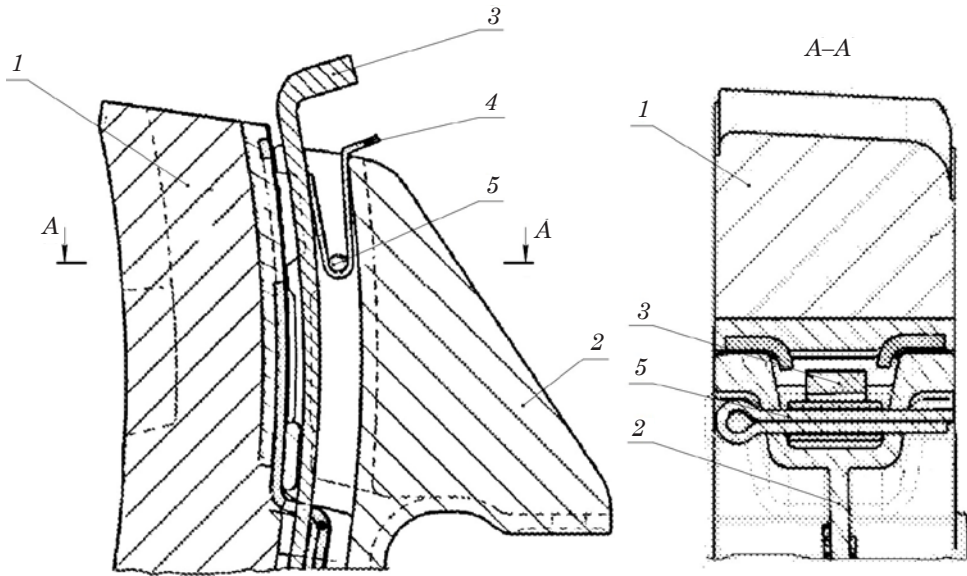


Рис. 9. Способ фиксации тормозной колодки, разработанный в ООО «ВНИЦТТ»: 1 – тормозная колодка; 2 – башмак; 3 – чека; 4 – упругая скоба; 5 – шплинт

Анализ рассмотренных примеров позволил составить схему, на которой отражена классификация основных способов решения проблемы выпадения тормозной чеки (рис. 10).

Еще одним решением может стать модернизация базовой, согласно ГОСТ 34075–2017 [6], конструкции тормозной чеки для грузовых вагонов. Добавим, что важным условием такой модернизации должна быть неизменность

конструкции башмаков, применяемых в тормозной рычажной передаче, и тормозных колодок.

Возможна модернизация конструкции стандартной тормозной чеки за счет использования пружинного замка, вариант такой модернизации защищен патентом [18], конструкция предлагаемой чеки представлена на рис. 11.

Особенность конструкции пружинного замка предлагаемой тормозной

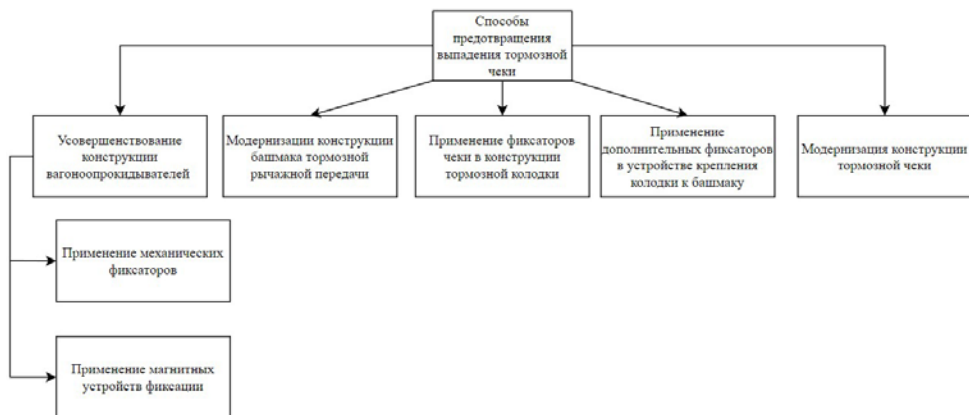


Рис. 10. Классификация способов предотвращения выпадения тормозных чек при разгрузке грузовых вагонов с помощью вагоноопрокидывателя



Рис. 11. Конструкция чеки колодки грузового вагона с пружинным замком:  
1 – основное тело тормозной чеки; 2 – пружинный замок;  
3 – выпуклая наружу пластина; 4 – упорная поверхность

чеки заключается в применении двух выпуклых наружу упругих пластин с упорными поверхностями. Жесткость пружинного замка должна надежно фиксировать тормозную чеку во время разгрузки вагоноопрокидывателем, но при этом должно быть обеспечено легкое извлечение чеки из башмака в случае замены тормозной колодки.

Очевидные достоинства предлагаемой конструкции:

отсутствует необходимость использования механизмов фиксации тормозных чек в вагоноопрокидывателях;

размеры модернизированной чеки не превышают размеры стандартной чеки, поэтому не нужно изменять конструкцию башмака тормозной рычажной передачи и колодки;

отсутствуют дополнительные фиксирующие элементы (валики, шпильки и т. д.).

Основные трудности реализации данной конструкции могут возникнуть только при подборе параметров пружинного замка, обеспечивающих легкое извлечение тормозной чеки.

В заключение необходимо отметить, что каждый рассмотренный способ предотвращения выпадения тормозной чеки имеет и преимущества, и недостатки. Предложенная в [18] модернизация базовой конструкции чеки также может стать одним из вариантов решения проблемы. Однако для поиска наиболее рационального способа потребуются дополнительные изыскания. ■

#### Литература

1. Обзор работы грузового железнодорожного транспорта за 12 месяцев 2023 г. URL: <https://railsovet.ru/upload/iblock/d0c/9b2tx6i2zwc4u7x8slsvwuoqjs6qh1rd.pdf?ysclid=lv2ecrw4vv65508944> (дата обращения: 12.04.2024).
2. Журавлев Н. П., Маликов О. Б. Транспортно-грузовые системы. Москва : Маршрут, 2006. 368 с.
3. Лаврушин Г. А., Катаманов Н. Н. О некоторых подходах к повышению пропускной способности вагоноопрокидывателей // Вологодские чтения. 2008. № 71. С. 176.
4. Чепурченко И. В., Коркина С. В. Анализ процесса разгрузки на вагоноопрокидывателе и расчет напряженно-деформированного состояния кузова полувагона // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 2. С. 534–541. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-534-541.
5. Пархомов В. Т. Устройство и эксплуатация тормозов. Москва : Транспорт, 1994. 208 с.
6. ГОСТ 34075–2017. Башмаки и чеки тормозных колодок железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2019. 36 с.
7. Повреждений вагонов стало меньше. URL: <https://gudok.ru/zdr/171/?ID=1473535&archive=51097> (дата обращения: 10.04.2024).
8. В порту Ванино продолжают повреждать подвижной состав. URL: <https://gudok.ru/zdr/171/?ID=1363894> (дата обращения: 10.04.2024).
9. Макаров А. С. Обновление парка грузовых вагонов // Вагоны и вагонное хозяйство. 2020. № 2. С. 24–26. ISSN 1817-6089.
10. Агафонов М. С. Новые грузовые вагоны в парке России // Вагоны и вагонное хозяйство. 2023. № 1 (73). С. 16–18. ISSN 1817-6089.

11. Игумнов П. В. Причины повреждения вагонного парка в портах востока России // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2013. Т. 1. С. 32–34.
12. Устройство фиксации тормозных чек полувагона / В. В. Долгополов : патент на полезную модель 197322 Рос. Федерация. № 2019106105; заявл. 05.03.2019; опубл. 21.04.2020.
13. Вагоноопрокидыватель / В. С. Тихоньков : патент 2002696 Рос. Федерация. № 05005121; заявл. 08.07.1991; опубл. 15.11.1993.
14. Устройство и способ крепления тормозной колодки железнодорожного транспортного средства / В. Ф. Зубков, А. М. Хохулин, М. Н. Цибизов [и др.] : патент 2779567 Рос. Федерация. № 2022108870; заявл. 04.04.2022; опубл. 09.09.2022, Бюл. № 25.
15. Приспособление для предупреждения выпадения чеки тормозной колодки железнодорожного подвижного состава / А. А. Галкин, Н. А. Перхуров, Р. Л. Полунов : а. с. 147222 СССР. № 743473; заявл. 02.09.1961; опубл. 01.01.1962, Бюл. № 10.
16. Тормоз железнодорожного транспортного средства / Р. А. Савушкин, К. В. Кякк, К. В. Башкиров, А. Л. Ковязин : патент на полезную модель 172302 Рос. Федерация. № 2016137145; заявл. 16.09.2016; опубл. 04.07.2017.
17. Неповоротный башмак / Е. В. Луковников, А. Н. Красов : патент на полезную модель 104524 Рос. Федерация. № 2011102466/11; заявл. 24.01.2011; опубл. 20.05.2011.
18. Чека тормозной колодки грузового вагона / С. В. Трескин : патент на полезную модель 223653 Рос. Федерация. № 2023130084; заявл. 17.11.2023; опубл. 28.02.2024.

#### References

1. Overview of the work of freight rail transport for the 12 months of 2023. URL: <https://railsovet.ru/upload/iblock/d0c/9b2tx6i2zwc4u7x8slsvwuojq6qh1rd.pdf?ysclid=lv2ecrw4v65508944> (access date: 12.04.2024). (In Russian).
2. Zhuravlev N. P., Malikov O. B. Transport and cargo systems. Moscow : Route, 2006. 368 p. (In Russian).
3. Lavrushin G. A., Katamanov N. N. On some approaches to increasing the capacity of car dumpers. *Vologda readings*. 2008. No. 71. P. 176. (In Russian).
4. Chepurchenko I. V., Korkina S. V. Analysis of the unloading process on the car dumper and calculation of the stress-strainstate of the gondola car body. *Proceedings of the TSU. Technical sciences*. 2023. No. 2. Pp. 534–541. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-534-541. (In Russian).
5. Parkhomov V. T. Device and operation of brakes. Moscow : Transport, 1994. 208 p. (In Russian).
6. GOST 34075–2017. Brake block holders and keys for railway rolling stock. General specifications. Moscow : Standardinform, 2019. 36 p. (In Russian).
7. There is less damage to the cars. URL: <https://gudok.ru/zdr/171/?ID=1473535&archive=51097> (access date: 10.04.2024). (In Russian).
8. Rolling stock continues to be damaged in the port of Vanino. URL: <https://gudok.ru/zdr/171/?ID=1363894> (access date: 10.04.2024). (In Russian).
9. Makarov A. S. Updating the fleet of freight cars. *Railway Cars and Carriage Equipment*. 2020. No. 2. Pp. 24–26. ISSN 1817-6089. (In Russian).
10. Agafonov M. S. New freight cars in the Russian fleet. *Railway Cars and Carriage Equipment*. 2023. No. 1 (73). Pp. 16–18. ISSN 1817-6089. (In Russian).
11. Igumnov P. V. Causes of damage to the carriage fleet in the ports of the East of Russia. *Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century*. 2013. Vol. 1. Pp. 32–34. (In Russian).
12. Dolgoplov V. V. Device for fixing the brake checks of a gondola car : patent for utility model 197322 Russian Federation. No. 2019106105; filed 05.03.2019; publ. 21.04.2020. (In Russian).
13. Tikhon'kov V. S. Car dumper : patent 2002696 Russian Federation. No. 05005121; filed 08.07.1991; publ. 15.11.1993. (In Russian).
14. Zubkov V. F., Khokhulin A. M., Tsibizov M. N. [et al.]. The device and method of fastening the brake pad of a railway vehicle : patent 2779567 Russian Federation. No. 2022108870; filed 04.04.2022; publ. 09.09.2022, Bulletin No. 25. (In Russian).



15. Galkin A. A., Perkhurov N. A., Polunov R. L. Device for preventing the loss of the brake pad checks of railway rolling stock : inventor's certificate 147222 USSR. No. 743473; filed 02.09.1961; publ. 01.01.1962, Bulletin No. 10. (In Russian).
16. Savushkin R. A., Kyakk K. V., Bashkirov K. V., Kovyazin A. L. Brake of a railway vehicle : patent for utility model 172302 Russian Federation. No. 2016137145; filed 16.09.2016; publ. 04.07.2017. (In Russian).
17. Lukovnikov E. V., Krasnov A. N. Non-rotating shoe : patent for utility model 104524 Russian Federation. No. 2011102466/11; filed 24.01.2011; publ. 20.05.2011. (In Russian).
18. Treskin S. V. Check of the brake pad of a freight car : patent for utility model 223653 Russian Federation. No. 2023130084; filed 17.11.2023; publ. 28.02.2024. (In Russian).

*Статья сдана в редакцию 16 апреля 2024 года*

## Уважаемые коллеги!

### Информируем вас о требованиях, предъявляемых к оформлению статей.

При наборе используйте Word-2003 или Word-2007; шрифт (по всему тексту, в том числе в рисунках и таблицах) – тип Times, размер шрифта – 14, межстрочное расстояние – 1,5, абзацный отступ – 1,25 (1,27) см, поля – 2 см; расстановка переносов по всему тексту – автоматическая.

Набор формул: простые формулы и сочетания символов ( $x^2 < y^2$ ;  $E = mc^2$ ;  $a^2 + b^2 = c^2$ ;  $Q_{i-1}$ ;  $\psi_j$ ) – только в текстовом режиме, сложные

$$(s^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{j=1}^e x_j^2 n_j - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^e x_j n_j \right)^2 \right]; \left( \frac{\sigma_a}{[n]} \right)$$

или  $S_i^m$ ) – только в редакторе формул Equation или в MathType.

Написание букв: русские (а, б, в, А, Б, В), греческие (Θ, Σ, Ω, Ψ, α, β, δ, ε, λ, π), а также цифры и аббревиатуры (1, 2, 3; I, II, III; max, lg, sin и т. п.) пишутся только прямо; латинские (a, b, n, A, B, N и т. д.) – только курсивом. Исключение – курсив во вспомогательном тексте (слова «Таблица» и «Рис.», примечания в рисунках и ссылки в тексте на эти примечания).

Оформление текста: левый верхний край – инициалы, фамилия; заголовков – все буквы ПРОПИСНЫЕ, жирные, расположение – по центру набора; таблиц и рисунков: в таблицах размер шрифта – на полтора-два размера меньше, чем в основном тексте (11,5–12), расположение текста в «шапке» таблицы – по центру, в столбцах – по ширине; межстрочное расстояние – 1; слово «Таблица» – курсивное начертание, в правый край таблицы; название таблицы – начертание нормальное (прямое), расположение – по

центру таблицы. В рисунках (графиках, диаграммах): размер подрисовочной подписи – 14, расположение – по центру набора, слово «Рис.» – курсив, название рисунка – нормальное начертание, описание рисунка (экспликация) – нормальное начертание, условные обозначения – курсивное начертание, их расшифровка – нормальное. Расположение таблиц и рисунков – строго после ссылки на них.

Кроме того, рисунки обязательно прилагаются к материалу (один рисунок – один файл; формат – \*.jpg).

Ссылки на литературу в тексте пишутся в квадратных скобках ([1], [1, 2] или [3–5]); нумерация сквозная. Список литературы/источников оформляется по ГОСТ 7.0.5–2008.

В конце статьи обязательно ставится дата отсылки материала в редакцию.

Объем статьи – не более 14-ти страниц.

Название файла: Фамилия. Первое слово заголовка. Подчеркивание. Последнее слово заголовка (Сидоров. Синтез\_электроприводом).

К материалу (статье) обязательно прилагаются (отдельным файлом): УДК, сведения об авторе, аннотация, ключевые слова (название файла: УДК 000. Сидоров. Синтез\_электроприводом).

Материалы для очередного номера журнала «Вестник УрГУПС» принимаются до 30 числа первого месяца квартала (до 30-го января, 30-го апреля, до 30-го июля, до 30-го октября). Материалы, поступившие в редакцию после 30-го числа, будут опубликованы только в следующем номере.

Успешной работы!

### Уважаемые читатели и авторы журнала «Вестник УрГУПС»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

**Назначение платежа:** «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

### Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС – это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-25-60

или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusknikov-urgups>

<b>Извещение</b>	<p><b>Получатель:</b> <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> <b>КПП:</b> <u>667001001</u>      <b>ИНН:</b> <u>6670317893</u> <b>ОКТМО:</b> <u>65701000</u>      <b>Р/с.:</b> <u>40703810863010000192</u> <b>в:</b> <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> <b>БИК:</b> <u>046577795</u>      <b>К/с.:</b> <u>30101810900000000795</u> <b>Код бюджетной классификации (КБК):</b> _____ <b>Платеж:</b> <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> <b>Плательщик:</b> _____ <b>Адрес плательщика:</b> _____ <b>ИНН плательщика:</b> _____ <b>№ л/сч. плательщика:</b> _____ <b>Сумма:</b> _____ руб. ____ коп.</p> <p>Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2024 г.</p>
<b>Квитанция</b>	<p><b>Получатель:</b> <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> <b>КПП:</b> <u>667001001</u>      <b>ИНН:</b> <u>6670317893</u> <b>ОКТМО:</b> <u>65701000</u> <b>Р/с.:</b> <u>40703810863010000192</u> <b>в:</b> <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> <b>БИК:</b> <u>046577795</u>      <b>К/с.:</b> <u>30101810900000000795</u> <b>Код бюджетной классификации (КБК):</b> _____ <b>Платеж:</b> <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> <b>Плательщик:</b> _____ <b>Адрес плательщика:</b> _____ <b>ИНН плательщика:</b> _____ <b>№ л/сч. плательщика:</b> _____ <b>Сумма:</b> _____ руб. ____ коп.</p> <p>Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2024 г.</p>

ф. СП-1



**АБОНЕМЕНТ**

на ~~газету~~  
журнал

**70070**

(индекс издания)

**Вестник УргУПС**

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2024 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
						X	X	X	X	X	X

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

**ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА**

ПВ	место	литер

на ~~газету~~  
журнал

**70070**

(индекс издания)

**Вестник УргУПС**

(наименование издания)

Стоимость	подписки	_____ руб. _____ коп.	Количество комплектов:
	переадресовки	_____ руб. _____ коп.	

на 2024 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
						X	X	X	X	X	X

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)