№ 4 (51) / 2016 октябрь–декабрь

ISSN 1815-9400

ТРАНСПОРТ УРАЛА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

О ЗАГРУЗКЕ СТРЕЛОК И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ГОРЛОВИН

РАСЧЕТ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ОТКРЫТИИ МАРШРУТОВ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЕ СВЯЗИ ЗАГРУЖЕННОСТИ ГРУЗОВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ

СНИЖЕНИЕ КОНТАКТНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ В ПОДШИПНИКАХ БУКС ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ МЕТОДОМ ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ НА СТЕНДЕ С ИМИТАЦИЕЙ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

TRANSPORT OF THE URALS
SCIENTIFIC JOURNAL



В сентябре 2016 года главным редактором журнала «Транспорт Урала» стал Александр Геннадьевич Галкин, ректор Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), доктор технических наук, профессор, председатель Уральского отделения Российской академии транспорта.

Александр Геннадьевич — выпускник нашего вуза: в 1983 году он с отличием окончил Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта (сейчас — УрГУПС) по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта».

Александр Геннадьевич Галкин работает в УрГУПС с 1989 года: был старшим научным сотрудником, потом доцентом, заведующим кафедрой «Электроснабжение транспорта», на должность ректора университета избран 7 февраля 2008 года.

В 1989 году диссертационным советом при Московском институте инженеров железнодорожного транспорта им. Ф. Э. Дзержинского Александру Геннадьевичу Галкину присуждена ученая степень кандидата технических наук, а в 2003 году решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации — ученая степень доктора технических наук.

Область научных интересов Александра Геннадьевича Галкина — повышение надежности и эффективности электроснабжения электрифицированных железных дорог. Среди его разработок — методология расчетов контактных подвесок на основе конечно-элементного моделирования, система автоматизированного проектирования контактной сети, устройства и способы измерения износа контактных проводов, конструкция контактной подвески с термокомпенсированными струнами, способ удаления гололеда с двойных контактных проводов и многое другое.

Редколлегия журнала «Транспорт Урала» поздравляет Александра Геннадьевича Галкина с избранием на пост главного редактора и желает ему на этом поприще больших творческих успехов.

#4 (51) / 2016 October – December

TRANSPORT OF THE URALS

SCIENTIFIC JOURNAL

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Александр Галкин, д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала «Транспорт Урала», Екатеринбург, Россия
2. Александер Сладковски, д-р техн. наук, профессор, Силезский технический университет, Польша
3. Эдуард Горкунов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, Екатеринбург, Россия
4. Аксель Шмидер, д-р, «Сименс АГ», отраслевой сектор, департамент транспорта «Железнодорожное строительство», Эрланген, Германия
5. Эрки Хамалайнен, д-р экон. наук, университет Аалто, Школа экономики, Финляндия
6. Валерий Доманский, д-р техн. наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Alexander Galkin, DSc, professor, editor-in-chief of the journal "Transport of the Urals", Ekaterinburg, Russia
2. Alexander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, academician of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
4. Axel Schmieder, DSc, Siemens AG, Industry Sector, Mobility Division, Transportation Engineering, Erlangen, Germany
5. Erkki Hamalainen, DSc, Aalto University School of Economics, Finland
6. Valeriy Domansky, DSc, professor of National technical University "Kharkiv politechnical institute", Kharkiv, Ukraine

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Булаев Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Грицык Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Ростов
5. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
6. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
7. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
8. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
9. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
10. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
11. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
12. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
13. Туранов Хабибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Умняшкин Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Ижевск
15. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
16. Шароглазов Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, Челябинск

EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Bulaev Vladimir Grigorievich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Gritsyk Valeriy Ivanovich, DSc, professor, Rostov
5. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
6. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
7. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
8. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, professor, Moscow
9. Ledyaev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
10. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
11. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
12. Smolyaninov Alexander Vasiliyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
13. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Umnyashkin Vladimir Alexeyevich, DSc, professor, Izhevsk
15. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
16. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин. **О загрузке стрелок и пропускной способности горловин 3**

М. Р. Якимов. **Расчет инфраструктурных ограничений при открытии маршрутов городского пассажирского транспорта общего пользования 8**

Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко. **Исследование движения вагона в стрелочной зоне сортировочной горки при умеренных климатических условиях 13**

Н. В. Купцов. **Бенчмаркинг и эффективность современных морских терминалов по экспортной перевалке угля 18**

В. М. Воронин, З. А. Наседкина, С. А. Свердлов. **Принципы построения адаптивных транспортных тренажеров 27**

В. Е. Кошкаров, Д. Г. Неволин, Е. В. Кошкаров, С. Е. Бурмистров. **Организационно-технологические особенности обеспыливания поверхности угля при его перевозках железнодорожным транспортом 33**

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

А. А. Антонов, М. Е. Бакин. **Методика расчета уровня гармоник тягового тока в рельсовых цепях без изолирующих стыков 41**

Б. В. Рожкин, А. В. Паранин. **Расчет нагрева дроссель-трансформатора при обращении поездов повышенной массы и длины 47**

Д. В. Седых. **Интеграционные решения на основе отраслевого формата технической документации 52**

Ю. В. Могильников. **Система автоматической регулировки обогрева устройств СЦБ 58**

ПУТЬ И ПУТЕВОЕ ХОЗЯЙСТВО

Б. Э. Глюзберг, Н. В. Рессина, С. П. Кузнецов, И. Н. Старухин. **Новые виды конструкций железобетонного основания для стрелочных переводов 62**

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

А. Э. Александров, А. В. Сурин. **Методика использования имитационных моделей поездообразования и продвижения поездов в оперативном планировании 66**

Д. В. Осипов, А. А. Климов. **Влияние продольного профиля перевальной части сортировочной горки на перерабатывающую способность 71**

Е. Д. Псеровская, И. Н. Кагадий. **Причинно-следственные связи загруженности грузовых железнодорожных станций с позиции теории системной динамики 77**

О. П. Югрина, Ю. А. Танайно. **Особенности формирования тяжеловесных поездов на Западно-Сибирской железной дороге 83**

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

А. В. Бородин, Д. Б. Гриц. **Снижение контактной напряженности в подшипниках букс грузовых вагонов 87**

ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Б. А. Шароглазов, О. Г. Машков. **Моделирование рабочего цикла и параметров, характеризующих работу комбинированной энергетической установки, на стадии предпроектных и проектных исследований 91**

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Ю. А. Кочунов. **Эксплуатационные испытания полимерного кронштейна 98**

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

А. В. Гриценко, С. С. Куков, О. Н. Ларин, К. В. Глемба. **Диагностирование автомобильных генераторов методом осциллографирования на стенде с имитацией неисправностей 101**

Д. А. Дрючин, А. Ф. Фаттахова, С. В. Баловнев. **Повышение качества транспортного обслуживания населения на основе анализа скоростных режимов движения на регулярных автобусных маршрутах 108**

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

В. Е. Кошкаров, Д. Г. Неволин, Е. В. Кошкаров. **Организация производственного процесса обеспыливания карьерных автодорог и техногенных отвалов эмульсионными профилактическими связующими 113**

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

P. A. Kozlov, V. S. Kolokolnikov, N. A. Tushin. **On the loading of points and station neck capacity 3**

M. R. Yakimov. **Calculation of infrastructure limitations for establishment of general purpose city passenger commuting routes 8**

Kh. T. Turanov, A. A. Gordienko. **Research of railway car movement in the points area of the hump in moderate climatic conditions 13**

N. V. Kuptsov. **Benchmarking and performance of sea terminals for export coal transshipment 18**

V. M. Voronin, Z. A. Nasedkina, S. A. Sverdlov. **Prinicples of building adaptive transport training systems 27**

V. E. Koshkarov, D. G. Nevolin, E. V. Koshkarov, S. E. Burmistrov. **Organization and technical aspects of coal surface dedusting during railway transporting 33**

AUTOMATION, TELEMECHANICS AND COMMUNICATION

A. A. Antonov, M. E. Bakin. **The methodology of calculation of the level of traction current harmonics in the jointless track circuits 41**

B. V. Rozhkin, A. V. Paranin. **Calculation of impedance bond heating during circulation of increased weight and length trains 47**

D. V. Sedykh. **Integration solutions based on the industrial format of technical documentation 52**

Yu. V. Mogilnikov. **Automated heating edjustment system for signals and interlocking devices 58**

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

B. E. Glyuzberg, N. V. Ressina, S. P. Kuznetsov, I. N. Starukhin. **New types of reinforced concrete foundations for points 62**

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

A. E. Alexandrov, A. V. Surin. **Method of using imitation models of train formation and movement in operation planning 66**

D. V. Osipov, A. A. Klimov. **Impact of longitidunal profile of gravity part of hump on processing capacity 71**

E. D. Pserovskaya, I. N. Kagadiy. **Relationships of cause and effect of loading of cargo railway stations from the position of the theory of system dynamics 77**

O. P. Yugrina, Yu. A. Tanaino. **Specifics of heavyweight trains forming on the West Siberian railway 83**

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

A. V. Borodin, D. B. Grits. **Decreasing contact stress in bearings of freight car boxes 87**

TRANSPORT MACHINERY

B. A. Sharoglazov, O. G. Mashkov. **Modeling the working cycle and parameters influencing the operation of a combined power plant at the pre-project and project research stages 91**

ELECTRIC SUPPLY

Yu. A. Kochunov. **Operational testing of a polymer bracket 98**

MOTOR TRANSPORT

A. V. Gritsenko, S. S. Kukov, O. N. Larin, K. V. Glemba. **Daignosting automobile generators by oscillography on a testbed with imitation of failures 101**

D. A. Dryuchin, A. F. Fattakhova, S. V. Balovnev. **Imroving the quality of population transport services on the basis of analysing speed modes of movement on scheduled bus routes 108**

TECHNOSPHERIC SAFETY

V. E. Koshkarov, D. G. Nevolin, E. V. Koshkarov. **Organization of strip mine roads and technogenic dumps de-dusting process using preventive emulsion binding substances 113**

УДК 656.21:004.94

Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ, Москва, Россия,
Виталий Сергеевич Колокольников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Николай Андреевич Тушин, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

О ЗАГРУЗКЕ СТРЕЛОК И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ГОРЛОВИН

Petr Alexeyevich Kozlov, DSc in Engineering, Professor, President of Research & Production Holding STRATEG (Modern National Transportation Technologies), Moscow, Russia,
Vitaliy Sergeyevich Kolokolnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Nikolay Andreyevich Tushin, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

On the loading of points and station neck capacity

Аннотация

В существующих инструкциях расчета железнодорожных станций предполагается, что стрелка может быть полностью загружена технологическими операциями. На основе этого положения рассчитывается пропускная способность горловины. Более предметный анализ показывает, что в периоде расчета кроме полезной занятости присутствуют технологические и структурные потери. Использование неверной основы вызывает большие сомнения в корректности соответствующих методов расчета.

В статье исследуются технологические и структурные потери, определяющие максимально возможную загрузку стрелок, и связанные с этим последствия для расчета пропускной способности горловин.

Ключевые слова: стрелка, время занятости, структурные и технологические потери, пропускная способность.

Summary

In the existing instructions for calculating railway stations it is presumed that a point may be fully loaded by technological operations. Based from that proposition, capacity of station neck is calculated. A more in-depth analysis shows that in the structure of calculations, beside useful loads, there exist structural and technological losses. Using a wrong foundation causes serious doubts concerning the validity of the corresponding calculation methods.

The article is devoted to a study of technological and structural losses that define the maximal possible loading of points and the related consequences for calculation of station neck capacity.

Keywords: points, loaded time, structural and technological losses, capacity.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7

1. ПРОБЛЕМА

Усложнение и повышение интенсивности связей экономического взаимодействия в рыночных условиях требует соответствующего развития сети железных дорог. По сравнению с западноевропейскими странами российская сеть значительно менее густая, однако ее структурное развитие нуждается в весьма существенных инвестициях. Скажем, затраты на реконструкцию крупной станции начинаются, как правило, уже с миллиарда. А таких станций на сети несколько сотен. Поэтому инвестиции должны опираться на солидное обоснование, на корректный расчет будущей пропускной и перерабатывающей способности станций. Однако с этим пока возникают большие проблемы. В публикациях последних лет неоднократно утверждалось, что наилучший метод технологической оценки инвестиций — это имитационная экспертиза проекта [1–3]. Тем не менее официальные инструкции, основанные на весьма упрощенных подходах, продолжают существовать. Поэтому необходимы дополнительные обоснования.

С позиции структуры станция состоит из парков, соединенных горловинами. С парками все более или менее ясно. Кроме места для выполнения технологических операций парк играет роль некоторого бункера, где входной поток со случайными всплесками превращается в управляемый выходной, удобный для последующего канала [4]. Если рассуждать логически, очевидно, что парк с десятью путями имеет большие технологические возможности, чем с пятью.

Горловина трудно поддается формализованной оценке. Она представляет собой множество стрелок, на которые наложена «паутина» связей. И здесь уже нельзя сказать, что 40 стрелок лучше, чем 30. Все зависит от того, какая она — эта «паутина».

e-mail: laureat_k@mail.ru, kolokvital@gmail.ru, ntushin@zde.ru
Дата поступления: 27.11.2016

2. НАИБОЛЕЕ ЗАГРУЖЕННАЯ СТРЕЛКА И ЕЕ РОЛЬ В ГОРЛОВИНЕ

Предлагаемая статья является развитием предыдущих публикаций [5, 6]. Напомним, что из-за невозможности дать формализованную оценку горловины со сложной структурой в существующих инструкциях горловину представляет одна, наиболее загруженная, стрелка [7, 8]. Соответственно пропускная способность горловины рассчитывается из условия 100 %-й полезной ее загрузки. Некорректность этих подходов попробуем обосновать на примере реконструируемой станции Карымской.

Наиболее загруженной здесь является группа стрелок 19–29 (табл. 1).

Таблица 1

Полезная загрузка стрелок

название	графически	технологией
Стр.19,23,25,29		16:30
Стр.95,97		14:49
Стр.107,109		10:58
Стр.152,154,156, 158		10:55

Загрузка осуществляется на одну треть операциями отправления и на две трети — перестановками локомотивов и составов (рис. 1).



***Рис. 1*. Операционная загрузка группы стрелок**

Но эта группа стрелок не может быть адекватным представителем всей горловины при расчете ее пропускной способности. Во-первых, загрузка следующей за ней в таблице группы стрелок отличается всего на 10 %, а во-вторых, маршруты ряда других операций отправления и прибытия осуществляются без ее участия (рис. 2).

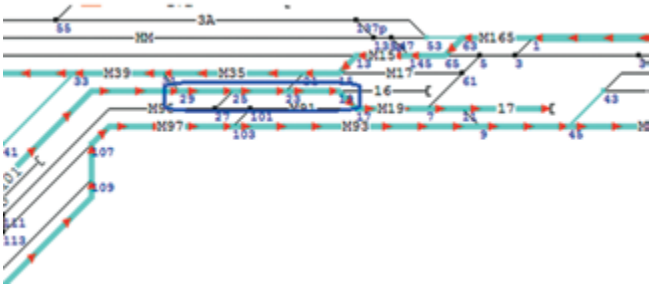


***Рис. 2*. Параллельные маршруты в горловине**

Функционально стрелки работают в рамках «виртуальных» каналов, которые можно рассматривать не просто как структурные, а как структурно-технологические единицы [9]. Каждый канал имеет функциональное содержание, он обеспечивает одно независимое передвижение. В этой горловине их пять (рис. 3).

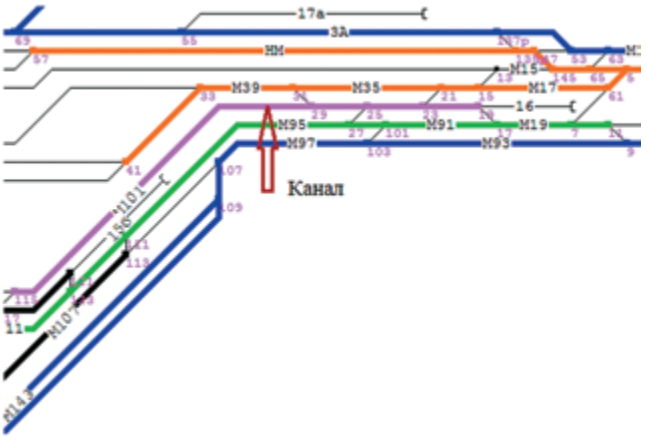


***Рис. 3*. «Виртуальные» каналы в горловине**

Модель позволяет увидеть, в какой мере используются отдельные части канала. Канал, в который входит рассматриваемая группа стрелок, занимается практически всегда полностью (рис. 4), но иногда используется только его часть (рис. 5).

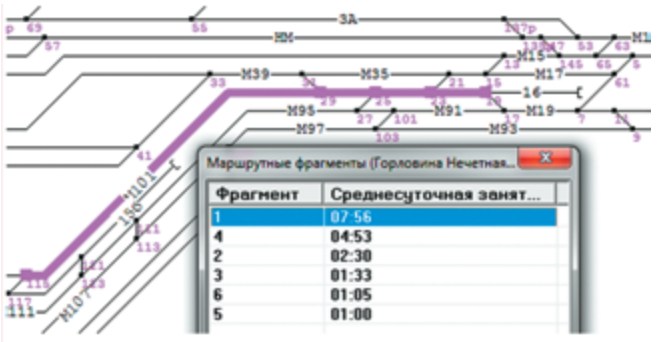


***Рис. 4*. Полная занятость канала**

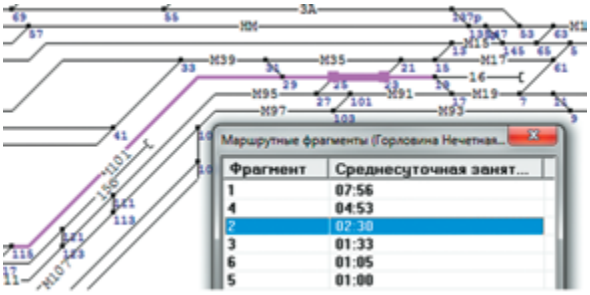


***Рис. 5*. Частичное использование канала**

Во втором случае стрелки 23 и 25 заняты, а стрелки 19 и 29 — нет. То есть по ним дополнительное передвижение проходить не может. Но в других случаях такое возможно. Поэтому канал, как правило, занят больше, чем входящие в него отдельные группы стрелок. Но так как канал является функциональной единицей, его загрузка никак не может превышать 100 %.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ПОТЕРЬ

Реконструкция рассматриваемой станции вызвана тем, что она работает на пределе своих возможностей, поэтому возникают слишком большие задержки. Но, как видно из табл. 1, даже при полном использовании ее пропускной способности максимальная загрузка стрелок не превышает 70 %. Значит, на оставшиеся 30 % приходятся какие-то потери. Как будет показано далее, это потери технологические и структурные. При технологических потерях стрелка не может быть занята из-за того, что нет готовой технологической операции. В технологическом процессе операции выполняются в определенной последовательности и с заданной продолжительностью. При структурных потерях возникает перерыв в ее использовании, если происходит задержка из-за других стрелок в этом же канале.

Система моделирования ИСТРА позволяет проводить эксперименты по определению величины этих потерь. В результате выдается протокол выполнения операций (табл. 2).

Предлагается следующая технология устранения технологических потерь — из протокола выбираются только операции с использованием выбранной группы стрелок (табл. 3).

Здесь последовательность выполнения операций по-прежнему определяется заданной технологией. Но операции эти запускаются максимально часто. То есть после выполнения одной операции уже готова следующая. Тем самым технологические потери устраняются. Эксперименты показали, что занятость максимально загруженной группы стрелок повышается до 80 % (табл. 4).

Однако 100 %-й загрузки достичь не удается — мешают структурные потери.

Приведем пример. В реально использованном варианте отправления поезда маршрут проходит через обе наиболее загруженные группы стрелок, соответственно через 19–29 и 95–97 (рис. 6).

Таблица 2

Протокол выполнения операций по технологическому процессу

№	Операция	$T_{пост}$	$\Sigma\Delta T$
417	Вспомогательная операция 142	[0] 03:58	
418	Выставка сформир Иркутск на 8, 9, 10 «А» часть 1**	[0] 03:58	56
419	Закрепление в парке А нечетного с востока	[0] 03:53	
420	Следование резервом с пути парка А на М35**	[0] 03:57	4
421	Перестановка состава с М35 на 13а МПРВ	[0] 04:03	
422	Следование резервом с 13а МПРВ в тупик	[0] 04:05	
423	Вспомогательная операция больной в А	[0] 04:08	
424	Закрепление состава и отц лок транзит Чит-Хаб, б/больн, отсутствие готовых лок Б	[0] 03:54	
425	Вспомогательная операция транзит Чит-Хаб, б/больн, Б	[0] 03:54	
426	Уборка поездного локомотива транзит Чит-Хаб, б/больн, отсутствие готовых лок Б **	[0] 03:54	4
427	Индексная операция чет1	[0] 03:54	
428	Смена кабина в туп транзит Чит-Хаб, б/больн, Б	[0] 03:06	19
429	Следование резервом с тупика в район	[0] 04:08	3
430	Осмотр разборк из Читы	[0] 03:09	
431	Вытяжка из В на 22,23 выт **	[0] 03:09	6

Таблица 3

Протокол с выбранными операциями

№	Операция	$T_{пост}$	$\Sigma\Delta T$
389	Подача поездного локомотива через тупики транзит Чит-Хаб, б/больн, Б**	[0] 02:25	33
418	Выставка сформир Иркутск на 8, 9, 10 «А» часть 1**	[0] 03:58	56
421	Перестановка состава с М35 на 13а МПРВ	[0] 04:03	
422	Следование резервом с 13а МПРВ в тупик	[0] 04:05	
426	Уборка поездного локомотива транзит Чит-Хаб, б/больн, отсутствие готовых лок Б**	[0] 03:54	4
429	Следование резервом с тупика в район	[0] 04:08	3
449	Отправление транз Чита-Хабаровск, Забайкальск, б/больн, Б**	[0] 03:32	105
460	Подача поездного локомотива к своему форм на Хаб**	[0] 03:23	65
474	Заезд локомотива на путь парка А с востока**	[0] 04:34	32
476	Отправление транз Чита-Хабаровск, Забайкальск, б/больн, Б** Уборка поездного локомотива транзит	[0] 03:41	137

Таблица 4

Загрузка стрелок без технологических потерь

название	графически	технологией
Стр.19,23,25,29		19:13
Стр.95,97		17:34
Стр.107,109		14:26
Стр.15,21		14:16

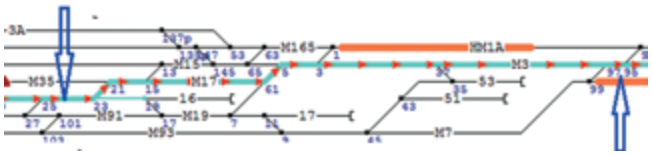
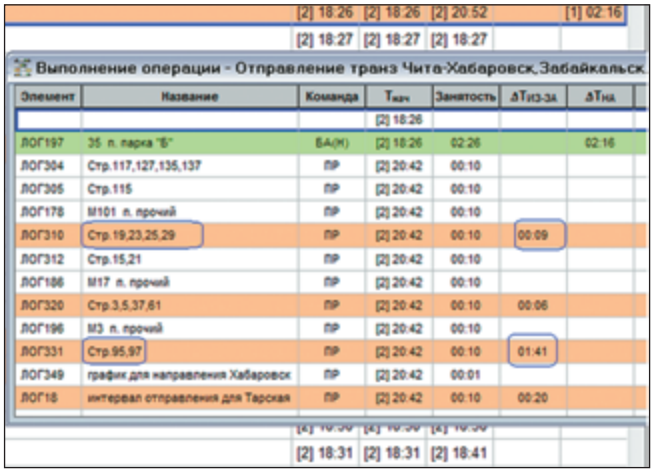


***Рис. 6*. Маршрут отправления поезда**

При выполнении операции возникла небольшая задержка из-за стрелок 19–29 и большая — из-за стрелок 95–97 (табл. 5).

Таблица 5

Задержки при выполнении операции отправления



По этой причине произошел сдвиг во времени выполнения операции с 18 ч 26 мин до 20 ч 42 мин (см. табл. 5 и рис. 7).

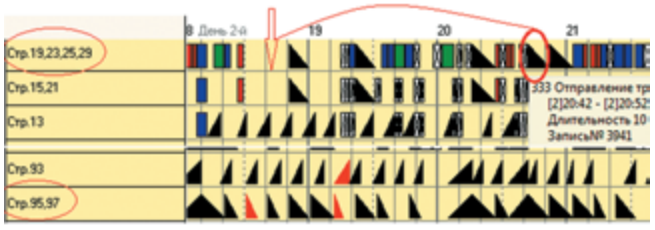


***Рис. 7*. Сдвиг во времени выполнения операции отправления**

В образовавшемся окне смогли выполняться другие операции, но некоторые потери все же остались. В общем случае такого рода структурные потери дополнительно ограничивают максимально возможную загрузку стрелок.

Подобные эксперименты были проведены еще с двумя горловинами на других станциях, и получены аналогичные результаты — возникают технологические и структурные потери (рис. 8 и 9).

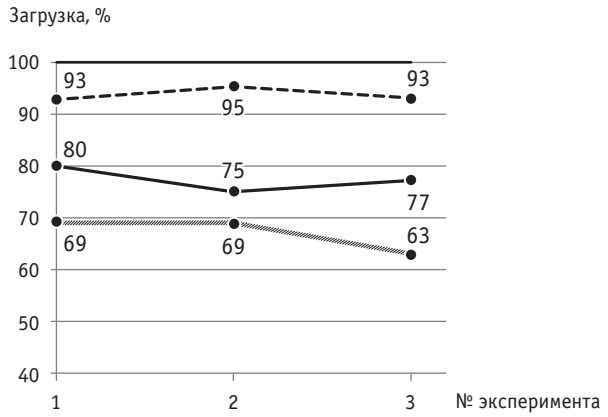


***Рис. 8*. Максимальная загрузка стрелок и соответствующих им каналов:**
— максимальная загрузка канала;
— максимальная загрузка стрелок; — загрузка стрелок с технологическими и структурными потерями

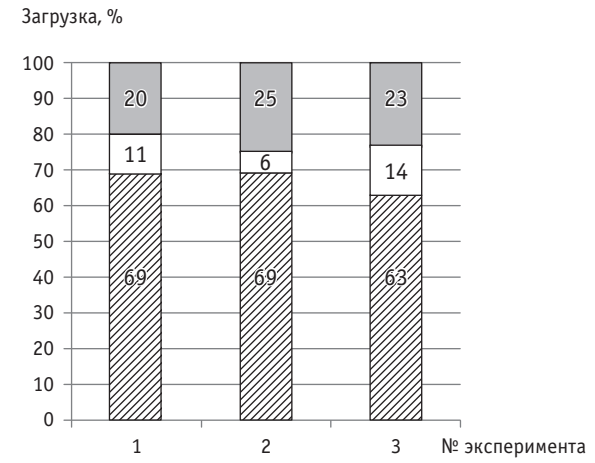


***Рис. 9*. Полезная загрузка стрелок и структурно-технологические потери:**
— структурные потери; — технологические потери;
— загрузка стрелок с технологическими и структурными потерями

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать однозначный вывод — полезное использование даже самых загруженных стрелок не может быть 100%-м. Противоположное положение, которое лежит в основе расчета пропускной способности горловин в существующих инструкциях, некорректно. Значит, некорректен и сам метод расчета.

Литература

1. Козлов П. А., Тушин Н. А. Имитационная экспертиза проектов развития инфраструктуры // Мир транспорта. 2011. № 2. С. 22–25. ISSN 1992-3252.
2. Мишарин А. С., Козлов П. А. Имитационная экспертиза проектов развития транспортной инфраструктуры // Железнодорожный транспорт. 2014. № 4. С. 52–54. ISSN 0044-4448.
3. Козлов П. А. О методах расчета систем железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2014. № 12. С. 28–32. ISSN 0044-4448.
4. Козлов П. А., Пермикин В. Ю. Преобразование потока в транспортных процессах // Наука и техника транспорта. 2013. № 2. С. 50–56. ISSN 2074-9325.
5. О пропускной способности станционных горловин / П. А. Козлов, Е. Н. Тимухина, В. Ю. Пермикин, Н. Е. Окулов // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 47–49. ISSN 1815-9400.
6. Козлов П. А., Колокольников В. С., Сорокин В. И. Совместное использование аналитических методов и имитационных моделей // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-3-8. ISSN 1815-9400.
7. Проектирование железнодорожных станций и узлов: справ. и метод. руководство / Под ред. А. М. Козлова, К. Г. Гусевой; 2-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1981. 594 с.
8. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. М. : РЖД, 2010.
9. Козлов П. А., Пермикин В. Ю., Колокольников В. С. Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов // Транспорт Урала. 2013. № 2 (37). С. 3–5. ISSN 1815-9400.

References

1. Kozlov P. A., Tushin N. A. Imitacionnaya ekspertiza proektov razvitiya infrastruktury [Simulation appraisal of infrastructure development projects] // Mir transporta. 2011. № 2. S. 22–25. ISSN 1992-3252.
2. Misharin A. S., Kozlov P. A. Imitacionnaya ekspertiza proektov razvitiya transportnoj infrastruktury [Imitation expertise of infrastructure sites development] // Zheleznodorozhnyj transport. 2014. № 4. S. 52–54. ISSN 0044-4448.
3. Kozlov P. A. O metodakh raschyota sistem zheleznodorozhnogo transporta [On methods of railway transport systems calculation] // Zheleznodorozhnyj transport. 2014. № 12. S. 28–32. ISSN 0044-4448.
4. Kozlov P. A., Permikin V. Yu. Preobrazovanie potoka v transportnykh processakh [Flow transformation in transport processes] // Nauka i tekhnika transporta. 2013. № 2. S. 50–56. ISSN 2074-9325.
5. O propusknoj sposobnosti stancionnykh gorlovin / P. A. Kozlov, E. N. Timukhina, V. Yu. Permikin, N. E. Okulov [Station neck capacity] // Transport Urala. 2014. № 2 (41). S. 47–49. ISSN 1815-9400.
6. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Sorokin V. I. Sovmestnoe ispolzovanie analiticheskikh metodov i imitacionnykh modelej [Shared use of analytical methods and simulation models] // Transport Urala. 2016. № 3 (50). S. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-3-8. ISSN 1815-9400.
7. Proektirovanie zheleznodorozhnykh stancij i uzlov : sprav. i metod. rukovodstvo / Pod red. A. M. Kozlova, K. G. Gusevoj ; 2-e izd., pererab. i dop. [Designing railway stations and nodes : a reference and methodical guide / Ed. by A. M. Kozlov, K. G. Guseva ; 2 ed., revised and expanded]. M. : Transport, 1981. 594 s.
8. Instrukciya po raschyotu nalichnoj propusknoj sposobnosti zheleznykh dorog [Instruction on calculation railways capacity]. M. : RZhD, 2010.
9. Kozlov P. A., Permikin V. Yu., Kolokolnikov V. S. Avtomatizirovannoe postroenie imitacionnykh modelej krupnykh transportnykh obyektov [Computer aided construction of simulation models of major transport facilities] // Transport Urala. 2013. № 2 (37). S. 3–5. ISSN 1815-9400.

УДК 654.1/5(470.53–25)

Михаил Ростиславович Якимов, доктор технических наук, профессор кафедры «Экономика и управление промышленным производством» Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), Пермь, Россия

РАСЧЕТ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ОТКРЫТИИ МАРШРУТОВ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Mikhail Rostislavovich Yakimov, DSc in Engineering, Professor, Industrial Production Economics and Management Department, Perm National Research Polytechnic University (PNRPU), Perm, Russia

Calculation of infrastructure limitations for establishment of general purpose city passenger commuting routes

Аннотация

В статье представлены методики расчета ограничений на количество маршрутных транспортных средств, единовременно прибывающих на остановочный пункт, и на количество маршрутных транспортных средств, единовременно находящихся на площадках отстоя, организованных на конечных точках маршрутов городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТОП). Предлагаемые методики позволяют определить параметры функционирования ГПТОП, возможности действующей дорожно-транспортной инфраструктуры по удовлетворению потребностей населения через сложившуюся в городе единую маршрутную сеть, а также оценить резервы функционирования инфраструктуры при открытии новых маршрутов ГПТОП.

Ключевые слова: транспорт, маршрутная сеть, инфраструктурные ограничения, городской пассажирский транспорт общего пользования.

Summary

The article presents methods of calculation the limitations on the number of vehicles serving a route, simultaneously arriving at a stop point, and on the number of vehicles simultaneously waiting at pools organized at the terminuses of general purpose city passenger commute transport (GPCPCT) routes. The proposed methods allow for evaluating the GPCPCT operating parameters, the capability of the existing road transport infrastructure for satisfying the population demands through the united network of routes in the city as well as evaluate the reserve capability of the infrastructure functioning at opening new GPCPC routes.

Keywords: transport, route network, infrastructure limitations, general purpose city passenger commute transport.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-8-12

Одно из важнейших условий повышения качества жизни в городах — наличие эффективной транспортной системы. Инструментами ее создания являются транспортное планирование (в первую очередь), а также организация дорожного движения, формирование маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТОП) и парковочная политика.

Особое внимание следует уделять качеству проектирования системы ГПТОП, в частности техническим показателям дорожно-транспортной инфраструктуры и способности этой инфраструктуры удовлетворять закладываемые в единой маршрутной сети параметры движения подвижного состава, а также распределению пассажиропотоков.

Развитие и улично-дорожной сети, и инфраструктуры ГПТОП ограничивается имеющимися территориями общего пользования. Расширение таких территорий, особенно в исторических и центральных частях городов, приводит к снижению качества жизни населения в прилегающих районах, а иногда и просто невозможно в силу объективных ограничений, связанных с исторической застройкой культурных, природно-ландшафтных и других охраняемых зон. Развитие системы ГПТОП, как и транспортной системы города в целом, сталкивается с этими ограничениями. Эксплуатация инфраструктуры системы ГПТОП в режиме перегрузки ведет к снижению общей эффективности и безопасности функционирования системы, росту транспортных издержек перевозчиков и пассажиров [1, 2].

Для эффективной эксплуатации инфраструктуры системы городского пассажирского транспорта общего пользования необходимо учитывать ряд параметров, накладывающих ограничения на развитие этой системы. Один из важнейших параметров — ограничения на количество единовременно прибывающих на остановочный пункт единиц подвижного состава маршрутных транспортных средств. Детальный расчет этого параметра необходим для комплексного исследования возможности открытия новых маршрутов.

e-mail: road-auto@mail.ru

Дата поступления: 09.11.2016

При обустройстве остановочных пунктов следует учитывать интенсивность движения единиц подвижного состава ГПТОП. Для обоснования минимальной вместимости остановочного пункта необходимо определять такой параметр, как количество автобусов, единовременно осуществляющих на данном остановочном пункте посадку и высадку пассажиров.

Для расчета минимальной вместимости остановочного пункта используем следующие параметры:

N — количество маршрутов, проходящих через остановочный пункт;

T — время остановки транспортного средства на посадку и высадку пассажиров, с;

T_i — интервал движения i-го маршрута ГПТОП, проходящего через остановочный пункт, с;

M — вместимость остановочного кармана, т.е. число автобусов, которые единовременно могут осуществлять посадку и высадку пассажиров, ТС.

Чтобы определить необходимую вместимость остановочного кармана, требуется оценить вероятность прибытия на остановку единовременно 1, 2, …, N автобусов, осуществляющих посадку и высадку пассажиров.

Рассмотрим примеры расчета вероятности единовременной посадки пассажиров одной, двумя и т.д. единицами подвижного состава маршрутных транспортных средств. Для этого введем параметры:

p_i — вероятность прибытия на остановку единицы подвижного состава i-го маршрута ГПТОП;

q_i — вероятность неприбытия на остановку единицы подвижного состава i-го маршрута ГПТОП, т.е. событие, обратное событию, описываемому вероятностью p_i.

Данные параметры рассчитываются следующим образом:

$$p_i = \frac{T_i}{3600}; \quad (1)$$

$$q_i = 1 - p_i. \quad (2)$$

Тогда вероятность того, что на остановке будет находиться одна единица подвижного состава только i-го маршрута ГПТОП, т.е. p_i^1, равна

$$p_i^1 = p_i \cdot \prod_{j=1,\, j\neq i}^{N} q_j. \quad (3)$$

Таким образом, вероятность того, что на остановке будет находиться одна единица подвижного состава только i-го маршрута, есть произведение вероятности нахождения на остановке единицы подвижного состава i-го маршрута ГПТОП p_i и вероятностей ненахождения на остановке остальных маршрутов ГПТОП, проходящих через рассматриваемую остановку. Вместе данные события образуют полную группу событий [2].

Далее определим вероятность нахождения на остановке одной единицы подвижного состава одного из N маршрутов ГПТОП, проходящих через рассматриваемую остановку, т.е. p^1:

$$p^1 = \sum_{i=1}^{N} p_i^1. \quad (4)$$

Аналогичным образом определим вероятность того, что на остановке одновременно будут находиться одна единица подвижного состава только i-го маршрута ГПТОП и одна единица подвижного состава только j-го маршрута ГПТОП, т.е. p_{ij}^2:

$$p_{ij}^2 = p_i \cdot p_j \cdot \prod_{k=1,k\neq i,k\neq j}^{N} q_k. \quad (5)$$

Отметим, что формула (5) справедлива, если $N > 2$, если $N = 2$, то формула (5) имеет вид $p_{ij}^2 = p_i \cdot p_j$.

Вероятность нахождения на остановке по одной единице подвижного состава каких-либо двух из N маршрутов ГПТОП, проходящих через рассматриваемую остановку, т.е. p^2, составит

$$p^2 = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} p_{ij}^2,\ i \neq j. \quad (6)$$

Вероятность того, что на остановке одновременно будет находиться только по одной единице подвижного состава i-го, j-го и k-го маршрутов ГПТОП, т.е. p_{ijk}^3, равна

$$p_{ijk}^3 = p_i \cdot p_j \cdot p_k \cdot \prod_{l=1,l\neq i,l\neq j,l\neq k}^{N} q_l. \quad (7)$$

Отсюда вероятность нахождения на остановке по одной единице подвижного состава каких-либо трех из N маршрутов ГПТОП, проходящих через рассматриваемую остановку, т.е. p^3, составит

$$p^3 = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{N} p_{ijk}^3,\ i \neq j \neq k. \quad (8)$$

Аналогичным образом определяются вероятности прибытия на остановку четырех, пяти и более единиц подвижного состава каких-либо из N маршрутов, проходящих через остановку.

После расчета приведенных выше параметров можно перейти к расчету минимальной вместимости остановочного кармана. Для этого будем последовательно определять вероятности прибытия на остановку разного количества подвижного состава.

Сначала определим вероятность того, что на остановку в какой-то момент не приедет ни одной единицы подвижного состава, т.е. p^0:

$$p^0 = \prod_{i=1}^{N} q_i = \prod_{i=1}^{N} (1 - p_i). \quad (9)$$

Используя полученную величину p^0, определим вероятность единовременной посадки и высадки пассажиров на остановке как минимум одной единицей подвижного состава ГПТОП, т.е. p^{1+}:

$$p^{1+} = 1 - p^0 = 1 - \prod_{i=1}^{N} q_i. \quad (10)$$

Интерпретация формулы (10) заключается в том, что вероятность единовременной посадки и высадки пассажиров

как минимум одной единицей подвижного состава ГПТОП — это событие, обратное событию одновременного неприбытия на остановку единиц подвижного состава всех маршрутов ГПТОП, проходящих через остановку.

Аналогичным образом вероятность единовременной посадки и высадки пассажиров как минимум двумя единицами подвижного состава ГПТОП будет событием, обратным событию одновременного неприбытия на остановку единиц подвижного состава всех маршрутов ГПТОП, проходящих через остановку, и событию нахождения на остановке только одной единицы подвижного состава i-го маршрута ГПТОП. Таким образом, вероятность единовременной посадки и высадки пассажиров как минимум двумя единицами подвижного состава каких-либо маршрутов ГПТОП, т.е. p^{2+}, можно рассчитать по формуле

$$p^{2+} = 1 - p^0 - p^1 = 1 - \prod_{i=1}^{N} q_i - p^1. \qquad (11)$$

Аналогично вероятность единовременной посадки пассажиров как минимум M единицами подвижного состава каких-либо маршрутов ГПТОП, т.е. p^{M+}, составит

$$p^{M+} = 1 - p^0 - \sum_{j=1}^{M-1} p^j = 1 - \prod_{i=1}^{N} q_i - \sum_{j=1}^{M-1} p^j. \qquad (12)$$

Для расчета минимальной вместимости остановочного кармана необходимо определить предельное значение вероятности единовременного прибытия нескольких единиц подвижного состава.

На основании п. 72 приказа Минавтотранса РСФСР от 31.12.1981 г. № 200 «Об утверждении правил организации пассажирских перевозок на автомобильном транспорте» [3] определяется допустимое отклонение от расписания на маршрутах ГПТОП. Несмотря на то что этот нормативный акт уже не действует, организаторы перевозок до сих пор используют его требования при составлении расписаний движения и мониторинге исполнения перевозчиками расписаний. Прежде всего это связано с тем, что до сих пор нет нормативного документа, который заменил бы приказ [3].

Итак, согласно п. 72 приказа [3], на городских автобусных маршрутах допускается отклонение от расписания на ±2 мин, т.е. диапазон, на который возможно отклонение от расписания за один рейс, составляет 4 мин, или 240 с. Обозначим время, на которое единица подвижного состава ГПТОП может отклониться от расписания за один рейс, как $T_{\text{отк}}$, с.

Отсюда время $t_{\text{ожид}}$, которое единица подвижного состава ГПТОП может затратить на ожидание остановки на посадку и высадку пассажиров, составит, с:

$$t_{\text{ожид}} = \frac{T_{\text{отк}}}{k}, \qquad (13)$$

где k — среднее количество остановочных пунктов на маршрутах ГПТОП в действующей единой маршрутной сети.

Обозначим время, которое единица подвижного состава ГПТОП в среднем тратит на остановку, как $t_{\text{ост}}$, тогда возможная вероятность ожидания единицей подвижного состава ГПТОП остановки для посадки и высадки пассажиров $p_{\max}$ составит

$$p_{\max} = \frac{t_{\text{ожид}}}{t_{\text{ост}}}. \qquad (14)$$

Сформулируем условие бесконфликтного использования остановочной площадки несколькими единицами пассажирского транспорта: вероятность p^{M+} единовременной посадки пассажиров как минимум M единицами подвижного состава маршрутов ГПТОП не должна превышать вероятности ожидания единицей подвижного состава ГПТОП остановки для посадки и высадки пассажиров $p_{\max}$.

Алгоритм расчета минимальной вместимости остановочного кармана сводится к последовательному расчету для разных значений M вероятностей p^{M+} единовременной посадки пассажиров как минимум M единицами подвижного состава каких-либо маршрутов ГПТОП и сравнению получившейся вероятности с вероятностью ожидания единицей подвижного состава ГПТОП остановки для посадки и высадки пассажиров. То значение M, которое превысит вероятность ожидания единицей подвижного состава ГПТОП остановки для посадки и высадки пассажиров, будет минимальной вместимостью остановочного кармана.

Таким образом, ограничение на количество единовременно прибывающих на остановочный пункт единиц подвижного состава при открытии нового маршрута ГПТОП можно сформулировать следующим образом: при открытии нового маршрута ГПТОП значение минимальной вместимости остановочного кармана M не должно увеличиваться. Если это значение увеличивается, то необходимо реконструировать остановочный карман, иначе из-за большего времени ожидания подъезда к остановке для посадки и высадки пассажиров возрастут задержки в движении остальных маршрутов ГПТОП.

Другим важным параметром является ограничение на количество единовременно находящихся единиц подвижного состава маршрутных транспортных средств на площадках отстоя, организованных на конечных точках маршрутов ГПТОП. Ниже изложена подробная методика расчета этого ограничения. Полученные в результате расчета данные позволяют также сделать вывод о возможности открытия нового экспериментального маршрута или дополнительных графиков на действующем маршруте.

Для каждого конечного остановочного пункта необходимо знать количество мест отстоя общественного транспорта, предназначенных для перерыва на отдых и питание. Обозначим количество мест для отстоя общественного транспорта переменной M(ТС). Физические ограничения в виде этого параметра для инфраструктуры известны [4, 5].

Таким образом, для рассматриваемого конечного пункта необходимо знать следующие параметры:

M(ТС) — количество мест для отстоя общественного транспорта;

N(ТС) — суммарное количество графиков для всех маршрутов, прибывающих на рассматриваемый остановочный пункт.

Для каждого определенного i-го графика, где $i = 1...N$, следует задать:

время начала выхода на рейс $T0_i$, ч;

время окончания работы TK_i, ч;

количество рейсов на графике k;

оборачиваемость маршрута $T_{\text{об}i}$, мин;

среднее время, затрачиваемое на краткосрочный отдых на рассматриваемом остановочном пункте, Δt_i, мин;

время, затрачиваемое на обед на рассматриваемом остановочном пункте, $T_{\text{обед_ост}}i$, мин;

время, затрачиваемое на смену водителей на рассматриваемом остановочном пункте, $T_{\text{пер}}i$, мин.

Все параметры для рассматриваемого конечного остановочного пункта необходимо свести в общую таблицу (табл. 1).

Каждый представленный в табл. 1 график выполняется для одной единицы транспортного средства общего пользования. Общее число графиков соответствует количеству автобусов, прибывающих в течение дня на исследуемый конечный остановочный пункт. В течение дня график разбивается на 2 смены. Для разных графиков время на пересменку $T_{\text{пер}}i$ различно по продолжительности. Примем следующие допущения: если $T_{\text{пер}}i$ > 120 мин, то смена водителей происходит вне места отстоя на конечном остановочном пункте, если $T_{\text{пер}}i \le 120$ мин, то смена осуществляется на месте отстоя на рассматриваемом конечном остановочном пункте.

Для i-го автобуса введем понятие i-го события. В терминах теории вероятности i-м назовем событие, когда i-й автобус находится на месте отстоя на исследуемом конечном остановочном пункте. Индекс $i = 1...N$ — индекс номера графика маршрута, прибывающего на конечный остановочный пункт. Тогда вероятность появления i-го события в любой момент рабочего времени обозначим как p_i и будем его рассчитывать в зависимости от продолжительности $T_{\text{пер}}i$ по следующим соотношениям.

1. Если $T_{\text{пер}}i$ > 120 мин, то

$$p_i = \frac{T_{\text{обед_ост}}i + k \cdot \Delta t_i}{(TK_i - T0_i) - T_{\text{пер}}i}. \quad (15)$$

2. Если $T_{\text{пер}}i \le 120$ мин, то

$$p_i = \frac{T_{\text{обед_ост}}i + k \cdot \Delta t_i + T_{\text{пер}}i}{(TK_i - T0_i)}. \quad (16)$$

Далее найдем сумму вероятностей i-х событий, обозначим ее переменной PM. Если PM будет превышать количество мест для отстоя общественного транспорта на перерыв для отдыха и питания M, то необходимо увеличивать количество мест или запрещать открытие дополнительных графиков маршрутов для рассматриваемого конечного пункта. Данное условие имеет вид

$$PM = \sum_{i=1}^{N} p_i \le M, \quad (17)$$

где p_i — вероятность i-го события, рассчитанная по формулам (15) или (16).

Чтобы определить возможность открытия дополнительных графиков движения, необходимо по формулам (15) или (16) рассчитать вероятность того, что дополнительный график маршрута ГПТОП в любой момент своего рабочего времени будет находиться на месте отстоя на исследуемом конечном остановочном пункте. Далее следует добавить рассчитанную вероятность к сумме вероятностей, а затем проверить условие (17).

Таким образом, полученные в результате расчета данные позволяют сделать вывод об обоснованности или необоснованности открытия нового экспериментального маршрута или дополнительного графика уже существующего маршрута. При этом учитывается, выполняется или не выполняется ограничение на количество единовременно находящихся единиц подвижного состава маршрутных транспортных средств на площадках отстоя, организованных на конечных остановочных пунктах ГПТОП.

Таблица 1

Сведения о маршруте общественного транспорта на конечном остановочном пункте

№ графика	Начало работы $T0_i$	Окончание работы TK_i	Количество рейсов k	Оборачиваемость маршрута $T_{\text{об}i}$	Среднее время на отдых Δt_i	Время обеда на конечном остановочном пункте $T_{\text{обед_ост}}i$	Время пересменки $T_{\text{пер}}i$
1							
…							
N							

Литература

1. Трофименко Ю. В., Якимов М. Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов : моногр. М. : Логос, 2013. 464 с.
2. Ларин О. Н., Кажаев А. А. Совершенствование маршрутных сетей крупных городов : моногр. Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2013. 148 с.
3. Об утверждении правил организации пассажирских перевозок на автомобильном транспорте : приказ Минавтотранса РСФСР от 31.12.1981 г. № 200 [Электронный ресурс]. URL: http://www.6pl.ru/transp/pMt_200_paks1.htm (дата обращения: 19.10.2016).
4. Якимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов : моногр. М. : Логос, 2013. 188 с.
5. Якимов М. Р., Попов Ю. А. Транспортное планирование. Практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в программном комплексе PTV Vision® VISUM : моногр. М. : Логос, 2014. 200 с.

References

1. Trofimenko Yu. V., Yakimov M. R. Transportnoe planirovanie: formirovanie effektivnykh transportnykh sistem krupnykh gorodov : monogr. [Transport planning: shaping effective transport systems for major cities : monograph]. M. : Logos, 2013. 464 s.
2. Larin O. N., Kazhaev A. A. Sovershenstvovanie marshrutnykh setej krupnykh gorodov : monogr. [Improvement of routes networks in major cities : monograph]. Chelyabinsk : Izd. centr YuUrGU, 2013. 148 s.
3. Ob utverzhdenii pravil organizacii passazhirskikh perevozok na avtomobilnom transporte : prikaz Minavtotransa RSFSR ot 31.12.1981 g. № 200 [On approval of passenger road vehicle transport regulations : Order of RSFSR Ministry of automobile transport of 31.12.1981 No. 200]. [Electronic resource]. URL: http://www.6pl.ru/transp/pMt_200_paks1.htm (date access: 19.10.2016).
4. Yakimov M. R. Transportnoe planirovanie: sozdanie transportnykh modelej gorodov : monogr. [Transport planning: creating transport models of cities : monograph]. M. : Logos, 2013. 188 s.
5. Yakimov M. R., Popov Yu. A. Transportnoe planirovanie. Prakticheskie rekomendacii po sozdaniyu transportnykh modelej gorodov v programmnom komplekse PTV Vision® VISUM : monogr. [Transport planning. Practical recommendation on creating transport models of cities using the PTV Vision® VISUM software suite : monograph]. M. : Logos, 2014. 200 s.

УДК 656.21.001.2

Хабибулла Туранович Туранов, доктор технических наук, профессор кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Андрей Александрович Гордиенко, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА В СТРЕЛОЧНОЙ ЗОНЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ ПРИ УМЕРЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Khabibulla Turanovich Turanov, DSc in Engineering, Professor, Stations, Junctions and Freight Work Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Andrey Alexandrovich Gordienko, PhD in Engineering, Assistant Lecturer, Stations, Junctions and Freight Work Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Research of railway car movement in the points area of the hump in moderate climatic conditions

Аннотация

По разности сдвигающих и удерживающих сил, возникающих при умеренных климатических условиях, определена сила, способствующая движению вагона в стрелочной зоне сортировочной горки до и после стрелочных переводов. С учетом инерции вращающихся масс рассчитано линейное ускорение вагона. В свою очередь, по величине линейного ускорения и значению начальной скорости вычислены время и скорость скатывания вагона в стрелочной зоне. В результате расчетов установлено, что на этом участке горки при умеренных климатических условиях вагон скатывается быстрее, чем при воздействии проекции встречного ветра, и проходит стрелочную зону без остановки.

Ключевые слова: сортировочная горка, стрелочная зона, вагон, умеренные климатические условия, ускорение вагона, время движения, скорость скатывания.

Summary

From the difference of displacing and retaining forces arising in moderate climatic conditions, a force promoting the railway car movement in the points area of a sorting yard hump before and after the switch points has been determined. Linear acceleration of the car has been calculated accounting for the inertia of rotating masses. In turn, from the linear acceleration and initial speed value, the time and speed of car downhill movement in the points area has been calculated. The results of calculations allow to conclude that in the given section of the hump in moderate climatic conditions the car rolls down faster than under the effects of contrary projection and passes the points area without stopping.

Keywords: sorting yard hump, points area, railway car, moderate climatic conditions, car acceleration, movement time, downhill rolling speed.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-13-17

Авторы продолжают серию публикаций, в которых исследуют динамику скатывания вагона по уклону сортировочной горки [1–12]. В настоящей статье рассматривается характер движения вагона в стрелочной зоне (СЗ) горки при отсутствии воздействия встречного ветра (назовем такой случай «при умеренных климатических условиях»). Движение вагона (аналогично [7]) разделено на четыре этапа: на первом этапе вагон движется до первого стрелочного перевода, на втором — от первого до второго стрелочного перевода по кривому участку пути, на третьем и четвертом — до и после третьего стрелочного перевода (или стрелки).

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

С использованием составленных на основе принципа Д'Аламбера [13] силовых соотношений, возникающих в системе «вагон — путь», вычислить ускорение вагона в стрелочной зоне сортировочной горки при умеренных климатических условиях, а по значению ускорения — время движения и скорость скатывания вагона.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Требуется рассчитать время движения и скорость скатывания вагона в СЗ по упрощенной методике, т.е. по известной длине этого участка горки $l_j = x(t_k)$ вычислить время движения вагона t_k с заданной начальной скоростью до и после стрелочных переводов (соответственно v_{0k} и v_{0kc}), а по величине t_k определить скорость вагона $v_{ek}(t_k)$. Как и в [7], $k = 6$ (где 6 — номер стрелочной зоны в разработанной нами программе расчета и проектирования горки) учитывает только сопротивление среды $F_{\text{ср}}$ до первой стрелки; $k = 6\text{c}$ (где буква «с» означает стрелку или стрелочный перевод) учитывает воздействие сопротивлений всякого рода $F_{\text{с}}$ (среды, стрелок, кривых, снега и инея) до второй стрелки; $k = 6\text{c}1$ учитывает воздействие $F_{\text{с}}$ после третьей стрелки до первого сортировочного пути. Здесь и далее

e-mail: khturanov@yandex.ru, gordiii89@yandex.ru
Дата поступления: 29.09.2016

$j = 6$ соответствует учету воздействия только $F_{ср}$ при $k = 6$; $j = 6с$ — учету воздействия только $F_с$ при $k = 6с1$, $6с2$ и $6с3$.

ОБЩИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Общий подход аналогичен изложенному в [7] и не требует дополнительных пояснений. Например, на основе принципа Д'Аламбера [13] и классических формул движения тела [1–10] определены время t_k и скорость движения вагона $v_{ek}(t_k)$ до первой стрелки, а также время t_{kc} и скорость $v_{ekc}(t_{kc})$ после первой, второй и третьей стрелки до начала первого сортировочного пути.

УПРОЩЕННАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА В СТРЕЛОЧНОЙ ЗОНЕ

Упрощенную последовательность расчета времени и скорости движения вагона до и после стрелочных переводов при умеренных климатических условиях представим в следующем виде.

1. Рассмотрим пример проектирования горочной горловины на 24 пути и исследуем горку повышенной и большой мощности, поскольку в программе расчета и проектирования, разработанной нами, начальная скорость (скорость надвига) вагона, согласно табл. 4.6 [14], принята равной 1,7 м/с. При этом полную длину С3 l_k примем в соответствии с рекомендациями [15]. Например, если уклон горки составляет от 1 до 2,5 ‰, $\psi_{06} = 0{,}001–0{,}0025$ рад. $[\sin(\psi_{06}) = 0{,}001–0{,}0025]$, то длина участка до первой стрелки $l_6 = 15$ м, до второй стрелки $l_{6с1} = 28{,}69$ м, до и после третьей стрелки соответственно $l_{6с2} = 21$ м и $l_{6с3} = 24$ м. Будем иметь в виду, что величина угла поворота кривых в С3 α_6 зависит от числа путей в горочной горловине. Например, для горловины на 24 пути α_6 составляет 24,7°, а на 32 или 40 путей $\alpha_6 = 32{,}27°$ или $13{,}63°$ [15].

2. Вычислим сдвигающую силу $F_{сдх1}$ (т.е. проекцию силы тяжести вагона с грузом G_{x1} на направление скатывания вагона по оси Ox_1) (рис. 1):

$$F_{сдх1} = G\sin(\psi_{06}), \qquad (1)$$

где G — сила тяжести груженого вагона с учетом инерции вращающихся масс, кН.

Например, если $G = 908$ кН, $\sin(\psi_{06}) = 0{,}002$, то $F_{сдх1} = 1{,}816$ кН.

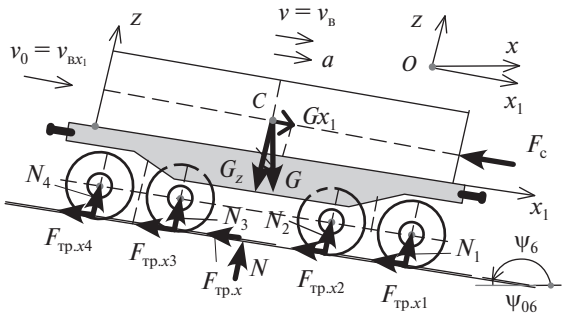


Рис. 1. **Упрощенная расчетная модель движения вагона в стрелочной зоне горки при умеренных климатических условиях**

На рис. 1 используются следующие обозначения: O — начало подвижной системы координат Ox_1yz, жестко связанной с вагоном; Ox — ось по горизонтали; ψ_{06} — угол уклона (спуска) С3 горки; $v_0 = v_{вх1}$ — начальная скорость вагона; $v_в$ — скорость вагона; G, G_{x1}, G_z — сила тяжести вагона с грузом и ее проекции на оси O_{x1} и O_z; $F_с = F_{ср}$ — сила сопротивления среды до первой стрелки, после первой стрелки $F_с$ — сила сопротивления всякого рода; N и $F_{тр.х}$ — нормальная и касательная составляющие реакции связей (рельсовых нитей). Причем $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ и $F_{тр.х} = F_{тр.х1} + F_{тр.х2} + F_{тр.х3} + F_{тр.х4}$ как параллельные силы.

3. Определим силу трения качения $F_{тр.к}$ в зависимости от проекции силы тяжести груженого вагона G_z на направление оси Oz (см. рис. 1) как касательную составляющую реакции связи (рельсовых нитей) $F_т$, которая, согласно закону Кулона, равна

$$F_{тр.к} = f_0 G\cos(\psi_{06}), \qquad (2)$$

где f_0 — некоторый приведенный коэффициент трения качения, учитывающий количество колес в тележках, трение качения по кольцам подшипника и колеса по рельсу (обычно принимают $f_0 = 0{,}0001$).

Например, если $f_0 = 0{,}0001$, $G = 908$ кН — сила тяжести вагона с грузом с учетом инерции вращающихся масс (колесных пар) при силе тяжести груза $G_{гр} = 650$ кН, $\cos(\psi_{06}) = 1$, то $F_{тр.к} = F_{тр.х1} = 0{,}094$ кН.

4. Рассчитаем силы сопротивления среды $F_{ср}$ и силы сопротивления всякого рода $F_с$:

до первого стрелочного перевода при $k = 6$

$$F_{ср} = k_{ср}G; \qquad (3)$$

после первого, второго и третьего стрелочного перевода при $k = 6с1$, $6с2$ и $6с3$

$$F_с = (k_{ср} + k_{стр} + k_{с.и} + k_{кр})G, \qquad (4)$$

где $k_{ср}$ — коэффициент, соответствующий доле силы тяжести G при учете сопротивления среды (обычно до 0,00025 при умеренных климатических условиях);

$k_{стр}$, $k_{с.и}$ и $k_{кр}$ — коэффициенты, соответствующие доле силы тяжести G при учете сопротивления стрелок, кривых, снега и инея. Обычно принимают $k_{стр} = 0{,}00015$, $k_{с.и} = 0{,}00015$ (по данным [16], доходит до 0,00025). Коэффициент $k_{кр}$ вычисляют по формуле $k_{кр} = 0{,}012 \cdot \alpha_6/l_k$ [16, с. 183]. В наших расчетах при $k = 6с1$, $6с2$, $6с3$ $k_{кр}$ равен 0,00018, 0,000246 и 0,00021 соответственно.

Таким образом, при $k = 6$ если $k_{ср} = 0{,}00025$ и $G = 908$ кН, то $F_{ср} = 0{,}227$ кН; при $k = 6с1$ если $k_{кр} = 0{,}00018$, то $F_с = 0{,}663$ кН; при $k = 6с2$ если $k_{кр} = 0{,}000246$, то $F_с = 0{,}723$ кН; при $k = 6с3$ если $k_{кр} = 0{,}00021$, то $F_с = 0{,}695$ кН [17].

5. Вычислим с учетом (2) и (3), (2) и (4) силу трения в продольном направлении вагона как сумму силы $F_{тр.к}$ и сил $F_{ср}$ и $F_с$:

до первого стрелочного перевода при $k = 6$

$$F_{трk.x1} = F_{тр.к} + F_{ср}; \qquad (5)$$

после первого, второго и третьего стрелочных переводов при k = 6с1, 6с2 и 6с3

$$F_{\text{тр}k.x1} = F_{\text{тр.к}} + F_{\text{с}}. \quad (6)$$

Например, при $k = 6$ если $F_{\text{тр.к}} = 0{,}094$, $F_{\text{ср}} = 0{,}227$ кН, то $F_{\text{тр6}.x1} = 0{,}321$ кН; при k = 6с1 если $F_{\text{с}} = 0{,}663$ кН, то $F_{\text{тр6с1}.x1} = 1{,}06$ кН; при k = 6с2 если $F_{\text{с}} = 0{,}723$ кН, то $F_{\text{тр6с2}.x1} = 1{,}0$; при k = 6с3 если $F_{\text{с}} = 0{,}695$ кН, то $F_{\text{тр6с3}.x1} = 0{,}789$ кН.

6. Определим удерживающие силы $F_{\text{уд}k.x1}$ (см. рис. 1), препятствующие движению вагона в стрелочной зоне горки:

до первого стрелочного перевода при $k = 6$ и после первого, второго и третьего стрелочных переводов при k = 6с1, 6с2 и 6с3

$$F_{\text{уд}k.x1} = F_{\text{тр}k.x1}. \quad (7)$$

Таким образом, $F_{\text{удб}.x1} = 0{,}321$ при $k = 6$; $F_{\text{удбс1}.x1} = 0{,}757$ кН при k = 6с1; $F_{\text{удбс2}.x1} = 0{,}817$ кН при k = 6с2; $F_{\text{удбс3}.x1} = 0{,}789$ кН при k = 6с3.

7. По величинам сдвигающей $F_{\text{сд}.x1}$ и удерживающей $F_{\text{уд}k.x1}$ сил вычислим силу F_k, способствующую движению вагона в С3 до и после стрелочных переводов:

$$F_k = F_{\text{сд}.x1} - F_{\text{уд}k.x1}. \quad (8)$$

Например, если $F_{\text{сд}.x1} = 1{,}816$ кН и $F_{\text{удб}.x1} = 0{,}321$ кН при $k = 6$, то величина силы, при воздействии которой происходит движение вагона с ускорением в С3 до первого стрелочного перевода с учетом только сопротивления среды $F_{\text{ср}}$, составит $F_6 = 1{,}495$ кН. После первого стрелочного перевода значения этой силы с учетом только сопротивления всякого рода $F_{\text{с}}$ таковы: при k = 6с1 если $F_{\text{удбс1}.x1} = 0{,}757$ кН, то $F_{6\text{с1}} = 1{,}06$ кН; при k = 6с2 если $F_{\text{удбс2}.x1} = 0{,}817$ кН, то $F_{6\text{с2}} = 1{,}0$ кН; при k = 6с3 если $F_{\text{удбс3}.x1} = 0{,}789$ кН, то $F_{6\text{с3}} = 1{,}027$ кН.

8. По значению силы F_k и массы вагона M с учетом инерции вращающихся частей найдем ускорение вагона a_k при равноускоренном движении в С3:

$$a_k = \frac{F_k 10^3}{M}. \quad (9)$$

Например, если $M = 5{,}484 \cdot 10^4$ кг и $F_6 = 1{,}495$ кН, то ускорение движения вагона до первой стрелки с учетом только сопротивления среды $F_{\text{ср}}$ при $k = 6$ составит $a_6 = 0{,}016$ м/с^2. При движении вагона по кривому участку пути после первой стрелки с учетом сопротивления всякого рода $F_{\text{с}}$ значения ускорения будут такими: при k = 6с1 если $F_{6\text{с1}} = 1{,}06$ кН, то $a_{6\text{с1}} = 0{,}011$ м/с^2; при k = 6с2 если $F_{6\text{с2}} = 1{,}0$ кН, то $a_{6\text{с2}} = 0{,}011$ м/с^2; при k = 6с3 если $F_{6\text{с3}} = 1{,}027$ кН, то $a_{6\text{с3}} = 0{,}011$ м/с^2.

9. Вычислим время t_k, в течение которого происходит прямолинейное равноускоренное движение вагона в стрелочной зоне длиной l_j, по зависимости $t_k(l_j) = f(v_{0k}, a_k, l_j)$ [7], где v_{0k} — начальная скорость (скорость входа вагона в С3), м/с. Например, воспользуясь разработанной нами программой расчета, для умеренных климатических условий (т.е. при $F_{\text{ввх}} = 0$) с учетом только сопротивления среды $F_{\text{ср}}$ при $k = 6$ (т.е. до первой стрелки) примем $v_{06} = 4{,}62$ м/с, что больше, чем при воздействии проекции встречного ветра $F_{\text{ввх}}$ ($v_{06} = 3{,}676$ м/с [7]). Итак, при $k = 6$ если $v_{06} = 4{,}62$ м/с, $a_6 = 0{,}016$ м/с^2 и $l_6 = 15$ м, то время, в течение которого происходит скатывание вагона до первой стрелки при воздействии только сопротивления среды $F_{\text{ср}}$, $t_6 = 3{,}229$ с, т.е. оно меньше, чем время $t_6 = 4{,}132$ с [4] при учете воздействия проекции встречного ветра $F_{\text{ввх}}$. При движении вагона в С3 после первой стрелки с учетом сопротивления всякого рода $F_{\text{с}}$ при k = 6с1 если $v_{06\text{с1}} = 4{,}672$ м/с, $a_{6\text{с1}} = 0{,}011$ м/с^2, $l_{6\text{с1}} = 28{,}69$ м, то $t_{6\text{с1}} = 6{,}119$ с; при k = 6с2 если $v_{06\text{с2}} = 4{,}741$ м/с, $a_{6\text{с2}} = 0{,}011$ м/с^2, $l_{6\text{с2}} = 21$ м, то $t_{6\text{с2}} = 4{,}41$ с; при k = 6с3 если $v_{06\text{с3}} = 4{,}79$ м/с, $a_{6\text{с3}} = 0{,}011$ м/с^2, $l_{6\text{с3}} = 24$ м, то $t_{6\text{с3}} = 7{,}8$ с.

Анализируя полученные результаты расчета, отметим, что после третьего стрелочного перевода при воздействии только сопротивления среды $F_{\text{ср}}$ время движения $t_{6\text{с3}}$ имеет фиксированное значение 7,8 с.

10. Определим скорость вагона в С3 до и после стрелочных переводов v_k по классической формуле равноускоренного движения тела $v_k = f(v_{0k}, a_k, t_k)$. Например, для заданных исходных данных при $k = 6$ если $v_{06} = 4{,}62$ м/с, $a_6 = 0{,}016$ м/с^2, $t_6 = 3{,}229$ с, то с учетом воздействия только сопротивления среды $F_{\text{ср}}$ скорость вагона до первого стрелочного перевода $v(t_6) = 4{,}672$ м/с, т.е. она больше, чем скорость $v(t_6) = 3{,}584$ м/с [7] при учете воздействия проекции встречного ветра $F_{\text{ввх}}$. При движении вагона после первой стрелки с учетом сопротивления всякого рода $F_{\text{с}}$ при k = 6с1 если $v_{06\text{с1}} = 4{,}672$ м/с, $a_{6\text{с1}} = 0{,}011$ м/с^2, $t_{6\text{с1}} = 6{,}119$ с, то $v(t_{6\text{с1}}) = 4{,}741$ м/с; при k = 6с2 если $v_{06\text{с2}} = 4{,}741$ м/с, $a_{6\text{с2}} = 0{,}011$ м/с^2, $t_{6\text{с2}} = 4{,}41$ с, то $v(t_{6\text{с2}}) = 4{,}79$ м/с; при k = 6с3 если $v_{06\text{с3}} = 4{,}79$ м/с, $a_{6\text{с3}} = 0{,}011$ м/с^2, $t_{6\text{с3}} = 4{,}983$ с, то $v(t_{6\text{с3}}) = 4{,}844$ м/с.

При умеренных климатических условиях, как показывает анализ расчетов, скорость скатывания вагона по участкам С3 увеличивается незначительно, например с 4,62 до 4,844 м/с.

11. Вычислим скорость вагона в С3 горки v_{ek} по классической формуле равноускоренного движения тела $v_k(l_j) = f(v_{0k}, a_k, l_j)$. Например, при $k = 6$ если $v_{06} = 4{,}62$ м/с, $a_6 = 0{,}016$ м/с^2, $l_6 = 15$ м, то значение скорости скатывания вагона в С3 до первой стрелки при воздействии только сопротивления среды $F_{\text{ср}}$ будет $v_6 = 4{,}672$ м/с. При движении вагона после первой стрелки под воздействием сопротивления всякого рода $F_{\text{с}}$ значения скорости будут такими: при k = 6с1 если $v_{06\text{с1}} = 4{,}672$ м/с, $a_{6\text{с1}} = 0{,}011$ м/с^2, $l_{6\text{с1}} = 28{,}69$ м, то $v_{6\text{с1}} = 4{,}741$ м/с; при k = 6с2 если $v_{06\text{с2}} = 4{,}741$ м/с, $a_{6\text{с2}} = 0{,}011$ м/с^2, $l_{6\text{с2}} = 21$ м, то $v_{6\text{с2}} = 4{,}79$ м/с; при k = 6с3 если $v_{06\text{с3}} = 4{,}79$ м/с, $a_{6\text{с3}} = 0{,}011$ м/с^2, $l_{6\text{с3}} = 24$ м, то $v_{6\text{с3}} = 4{,}844$ с. Эти результаты полностью совпадают с данными, рассмотренными в п. 10.

Обобщая результаты исследований на примере расчета времени движения и скорости скатывания вагона в С3 горки при умеренных климатических условиях, отметим следующее. Независимо от того, движется ли вагон до стрелочных

переводов при воздействии только сопротивления среды $F_{ср}$ или же после стрелочных переводов при воздействии только сопротивления всякого рода (среды, стрелок, кривых, снега и инея) $F_{с}$, в отличие от случая воздействия проекции встречного ветра малой величины $F_{твх}$ [7] происходит равноускоренное движение вагона. Например, общее время движения вагона от начала участка С3 увеличивается с $t_6 = 3{,}23$ с до $t_{06} = 18{,}74$ с ($t_{06} = t_6 + t_{6c1} + t_{6c2} + t_{6c3} = 3{,}23 + 6{,}12 + 4{,}41 + 4{,}98 = 18{,}74$ с), т.е. до конца С3. Иначе говоря, на этом участке горки при умеренных климатических условиях вагон скатывается быстрее, чем при воздействии проекции встречного ветра $F_{твх}$ (например, $t_{06} = 26{,}61$ с [6]). Полученное значение времени соответствует движению вагона от начала С3 горки до начала первого сортировочного пути (при $k = 6c3$). За это время скорость скатывания вагона увеличивается с $v_{06} = 4{,}62$ м/с (при $k = 6$) до $v(t_{6c3}) = 4{,}84$ м/с (при $k = 6c3$). При этом вагон проходит всю длину С3 ($l_{06} = l_6 + l_{6c1} + l_{6c2} + l_{6c3} = 15 + 28{,}69 + 21 + 24 = 88{,}69$ м) без остановки. В то время как при воздействии проекции встречного ветра $F_{твх}$ он останавливается в промежутке между третьим стрелочным переводом С3 и первым сортировочным путем [7], что подтверждает значительное влияние проекции встречного ветра малой величины $F_{твх}$ на время движения и скорость скатывания вагона с горки.

ВЫВОДЫ

1. Силовые соотношения, возникающие в системе «вагон — путь» в стрелочной зоне до и после стрелочных переводов, при умеренных климатических условиях с учетом различных видов сопротивлений (среды, стрелки, снега и инея, кривых, ветра) позволили определить ускорение вагона при его равноускоренном движении.

2. Упрощенная последовательность расчета, основанная на определении ускорения вагона в стрелочной зоне a_k, позволила по известному значению длины этого участка горки до и после стрелочных переводов l_j вычислить время движения вагона t_k при воздействии сопротивления среды и сопротивлений всякого рода, а по величине t_k — скорость скатывания вагона в конце рассматриваемого участка горки до и после стрелочных переводов $v_k(t_k)$.

3. Расчетами установлено, что при умеренных климатических условиях вагон проходит стрелочную зону горки без остановки, что подтверждает значительное влияние встречного ветра малой величины на время движения и скорость скатывания вагона по профилю горки.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы для расчета последующих участков сортировочной горки, а в дальнейшем — для разработки уточненной программы расчета параметров сортировочных горок.

Литература

1. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Бугров Я. А. Результаты вычислений времени движения и скорости вагона на первом скоростном участке сортировочной горки при воздействии встречного ветра с учетом сопротивлений среды // Вестник УрГУПС. 2016. № 3 (31). С. 29–38. DOI: 10.20291/2079-0392-2016-3-29-38. ISSN 2079-0392.
2. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Расчет времени движения и скорости скатывания вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии встречного ветра малой величины // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 7. С. 38–43. ISSN 0236-1914.
3. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Результаты расчета времени, скорости и пути торможения вагона на участке первой тормозной позиции сортировочной горки при воздействии встречного ветра малой величины // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 6. С. 66–72. ISSN 0236-1914.
4. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Упрощенная математическая модель движения вагона на промежуточном участке сортировочной горки при воздействии встречного ветра малой величины // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 1. С. 13–18. ISSN 0236-1914.
5. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Пример расчета времени движения и скорости вагона на промежуточном участке сортировочной горки при воздействии встречного ветра // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 3. С. 23–28. ISSN 0236-1914.
6. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Пример расчета времени, скорости и пути торможения вагона на участке второй тормозной позиции сортировочной горки при воздействии встречного ветра малой величины // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2016. Т. 75. № 2. С. 123–128. ISSN 2223-9731.

References

1. Turanov Kh. T., Gordienko A. A., Bugrov Ya. A. Rezultaty vychislenij vremeni dvizheniya i skorosti vagona na pervom skorostnom uchastke sortirovochnoj gorki pri vozdejstvii vstrechnogo vetra s uchyotom soprotivlenij sredy [Calculation results in respect of movement time and railcar speed at first speed section of hump under dead wind influence taking into account resistance of ambient environment] // Vestnik UrGUPS. 2016. № 3 (31). S. 29–38. DOI: 10.20291/2079-0392-2016-3-29-38. ISSN 2079-0392.
2. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Raschyot vremeni dvizheniya i skorosti skatyvaniya vagona na vtorom skorostnom uchastke sortirovochnoj gorki pri vozdejstvii vstrechnogo vetra maloj velichiny [The calculation of the movement and speed of rolling the second car on fast lane a hump under the influence of head wind small size] // Transport: nauka, technika, upravlenie. 2016. № 7. S. 38–43. ISSN 0236-1914.
3. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Rezultaty raschyota vremeni, skorosti i puti tormozheniya vagona na uchastke pervoj tormoznoj pozicii sortirovochnoj gorki pri vozdejstvii vstrechnogo vetra maloj velichiny [Calculation ot movement time and railway car speed on the first speed section of sorting hump under the effect of low contrary wind] // Transport: nauka, technika, upravlenie. 2016. № 6. S. 66–72. ISSN 0236-1914.
4. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Uproshhyonnaya matematicheskaya model dvizheniya vagona na promezhutochnom uchastke sortirovochnoj gorki pri vozdejstvii vstrechnogo vetra maloj velichiny [A simplified mathematic model of railway car movement on the intermediate section of sorting hump under the effect of low contrary wind] // Transport: nauka, technika, upravlenie. 2016. № 1. S. 13–18. ISSN 0236-1914.
5. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Primer raschyota vremeni dvizheniya i skorosti vagona na promezhutochnom uchastke sortirovochnoj gorki pri vozdejstvii vstrechnogo vetra [An example of movement time and railway car speed calculation on the intermediate section of sorting hump under the effect of low contrary wind] // Transport: nauka, technika, upravlenie. 2016. № 3. S. 23–28. ISSN 0236-1914.
6. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Primer raschyota vremeni, skorosti i puti tormozheniya vagona na uchastke vtoroj tormoznoj pozicii sortirovochnoj gorki pri vozdejstvii vstrechnogo vetra maloj velichiny [Calculation of movement time, speed and braking path of a railway car speed on the second braking position of sorting hump under the effect of low contrary wind] // Vestnik Nauchno-issledovatelskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2016. T. 75. № 2. S. 123–128. ISSN 2223-9731.

7. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Исследование влияния встречного ветра на движение вагона в стрелочной зоне сортировочной горки // Бюллетень транспортной информации. 2016. № 5 (253). С. 19–28. ISSN 2072-8115.
8. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Результаты исследований влияния встречного ветра на движение вагона на первом участке сортировочного пути // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 16–20. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-16-20. ISSN 1815-9400.
9. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Пример расчета времени движения и скорости вагона на первом участке сортировочного пути при умеренных климатических условиях // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 11. С. 32–35. ISSN 0236-1914.
10. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Исследование движения вагона на участке парковой механизированной тормозной позиции сортировочной горки при умеренном климатическом условии // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 3 (57). С. 53–60. ISSN 1997-0722.
11. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Некоторые проблемы теоретической предпосылки динамики скатывания вагона по уклону сортировочной горки // Бюллетень транспортной информации. 2015. № 3 (237). С. 29–36. ISSN 2072-8115.
12. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. О попытке доказательства корректности существующего метода исследования движения вагона по спускной части сортировочной горки // Бюллетень транспортной информации. 2016. № 10 (256). С. 19–24. ISSN 2072-8115.
13. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики. Т. II. Динамика. М. : Наука, 1983. 640 с.
14. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. М. : Техинформ, 2003. 168 с.
15. Земблинов С. В., Страковский И. И. Альбом схем элементов станций и узлов. М. : Всесоюз. изд.-полигр. об-ние МПС, 1963. 89 с.
16. Образцов В. Н. Станции и узлы. Ч. II. М. : Трансжелдориздат, 1938. 492 с.
17. Кирьянов Д. В. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. СПб. : БХВ-Петербург, 2012. 432 с.

7. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Issledovanie vliyaniya vstrechnogo vetra na dvizhenie vagona v strelochnoj zone sortirovochnoj gorki [Calculation of low contrary wind effect on the movement of railway cars in the points area of a sorting yard hump] // Byulleten transportnoj informacii. 2016. № 5 (253). S. 19–28. ISSN 2072-8115.
8. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Rezultaty issledovanij vliyaniya vstrechnogo vetra na dvizhenie vagona na pervom uchastke sortirovochnogo puti [Results of researching contrary wind effect on the movement of railway car on the first section of a sorting path] // Transport Urala. 2016. № 2 (49). S. 16–20. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-16-20. ISSN 1815-9400.
9. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Primer raschyota vremeni dvizheniya i skorosti vagona na pervom uchastke sortirovochnogo puti pri umerennykh klimaticheskikh usloviyakh [Example calculation of time of movement and speed of the car on first section of the sorting part in moderate climatic conditions] // Transport: nauka, technika, upravlenie. 2016. № 11. S. 32–35. ISSN 0236-1914.
10. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Issledovanie dvizheniya vagona na uchastke parkovoj mehanizirovannoj tormoznoj pozicii sortirovochnoj gorki pri umerennom klimaticheskom uslovii [A research of railway car movement speed in the parking mechanized braking position section of a sorting yard hump in moderate climatic conditions] // Vestnik transporta Povolzhya. 2016. № 3 (57). S. 53–60. ISSN 1997-0722.
11. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Nekotorye problemy teoreticheskoj predposylki dinamiki skatyvaniya vagona po uklonu sortirovochnoj gorki [Certain problems of theoretical proposition for the dynamics of downholl movement of a railway car on a sorting yard hump] // Byulleten transportnoj informacii. 2015. № 3 (237). S. 29–36. ISSN 2072-8115.
12. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. O popytke dokazatelstva korrektnosti sushhestvuyushhego metoda issledovaniya dvizheniya vagona po spusknoj chasti sortirovochnoj gorki [About the attempt to prove the correctness of a new method relating to the research of a car movement on the slope of a marshalling hump] // Byulleten transportnoj informacii 2016. № 10 (256). S. 19–24. ISSN 2072-8115.
13. Loytsyanskiy L. G., Lurie A. I. Kurs teoreticheskoj mehaniki. T. II. Dinamika [Course of theoretical mechanics. Vol. II. Termodynamics]. M. : Nauka, 1983 640 s.
14. Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustrojstv na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm [Rules and regulations for design of sorting devices on 1520 mm railways tracks]. M. : Tekhinform, 2003. 168 s.
15. Zemblinov S. V., Strakovskiy I. I. Albom skhem elementov stancij i uzlov [Album of diagrams of station and junction elements]. M. : Vsesoyuz. izd.-poligr. ob-nie MPS, 1963. 89 s.
16. Obraztsov V. N. Stancii i uzly. Ch. II [Stations and junctions. Part II]. M. : Transzheldorizdat, 1938. 492 s.
17. Kiryanov D. V. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. SPb. : BHV-Peterburg, 2012. 432 s.

УДК 05.22.01

Николай Владимирович Купцов, соискатель степени кандидата наук, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия

БЕНЧМАРКИНГ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ МОРСКИХ ТЕРМИНАЛОВ ПО ЭКСПОРТНОЙ ПЕРЕВАЛКЕ УГЛЯ

Nikolay Vladimirovich Kuptsov, PhD canditate in Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia

Benchmarking and performance of sea terminals for export coal transshipment

Аннотация

Статья посвящена изучению современных морских терминалов, занимающихся экспортной перевалкой угля. Проанализированы характеристики действующих терминалов, сгруппированы показатели и коэффициенты (длина причала, производительность судопогрузочных операций, площадь складской зоны, производительность укладки и расформирования штабеля, производительность выгрузки железнодорожных вагонов) по технологическим зонам, даны предложения относительно классификации характеристик для сравнительного анализа по группам эффективности.

Полученные в исследовании результаты могут служить дополнительным инструментом на начальных стадиях проектирования морских терминалов (предпроектный анализ, предпроектные решения), позволяют более рационально выполнять технологическое проектирование терминалов, сравнивать эффективность технологических зон (морской грузовой фронт, складская зона, железнодорожный грузовой фронт) и терминалов между собой. Кроме того, они могут быть использованы для повышения эффективности существующих терминалов за счет расшивки «бутылочных горлышек» технологической цепочки и ликвидации чрезмерных производственных мощностей.

Ключевые слова: морские порты, угольные перегрузочные комплексы (терминалы), эффективность угольного терминала, технологические зоны угольного терминала, технологическое проектирование портов.

Summary

The article is dedicated to a study of modern sea terminals operating in export coal transshipment. The characteristics of operating terminals are analyzed, values and ratios are grouped together (berthing space, ship loading operations performance, storage zone area, stacking/unstacking performance, railcar unloading performance) by technological zones, with offers on the classification of characteristics for comparative analysis by performance groups.

The results obtained in the research may serve as an additional tool at early stages of sea terminal design (pre-design analysis, pre-design decision making), allow for more rational technological design of terminals, compare the performance of technological areas (seaside loading zone, storage zone, railway side unloading area) and the terminals to each other. Also, those can be used for improving the performance of existing terminals by expanding the «bottlenecks» of the technological chain of operations and dismantling superfluous production assets.

Keywords: sea ports, coal transshipment suites (terminals), coal terminal performance, coal terminal technological zones, technological design of ports.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-18-26

Для ранних стадий проектирования морских портов (предпроектный анализ, предпроектные решения) большой научный и практический интерес представляет выделение эмпирических закономерностей (зависимости, основанные на экспериментальных данных и позволяющие получить результат, близкий к точному) и эвристик (методы, способные приводить к цели в условиях неполноты исходной информации) на основе бенчмаркинга. Данный способ исследования в мировой науке явно не сформирован в связи со своей новизной, а российскими учеными пока не делалось попыток выявления таких зависимостей.

В мировой практике частичный анализ усредненных характеристик терминалов предпринимался в 2010-е гг. в работах [1, 2]. До этого минимальные, причем достаточно устаревшие рекомендации были приведены в справочнике UNCTAD [3], изданном в 1985 г. Вопросами сравнения показателей также начали заниматься на уровне правительственных регуляторов и министерств отдельных стран. Так, в ЮАР в 2016 г. выпущен официальный отчет, в котором сравниваются характеристики и эффективность портов этой страны и прочих мировых [4].

Сегодня наибольшее количество публикаций посвящено характеристикам и увеличению производительности контейнерных терминалов, навалочным терминалам уделено меньшее внимание, а экспортным угольным — минимальное. Настоящее исследование направлено на пополнение научных знаний о терминалах, выполняющих экспортную перевалку угольных грузов.

С помощью открытых источников (официальные сайты терминалов, годовые отчеты компаний, отраслевые обзоры и др.) и профессиональных наработок автора (референции поставщиков оборудования, проектная документация и технологические схемы отдельных терминалов) сделан анализ существующих в мире терминалов. В итоге идентифицировано 26 современных морских терминалов по экспортной перевалке угля [5], из которых три («Ростерминалуголь», ППК-3 порта Восточный, «Дальтрансуголь») находятся в России (табл. 1).

e-mail: kuptsov.nikolay@gmail.com

Дата поступления: 01.10.2016

Таблица 1

Современные морские терминалы по экспортной перевалке угля

№ п/п	Терминал	Страна, порт (регион)
1	Abbot Point Coal Terminal	Австралия, Abbot Point
2	RG Tanna Coal Terminal	Австралия, Gladstone
3	Dalrymple Bay Coal Terminal	Австралия, Hay Point
4	Hay Point Coal Terminal	Австралия, Hay Point
5	Port Kembla Coal Terminal	Австралия, Kembla
6	NCIG Coal Export Terminal	Австралия, Newcastle
7	Carrington Coal Terminal	Австралия, Newcastle
8	Kooragang Coal Terminal	Австралия, Newcastle
9	Richard Bay Coal Terminal	ЮАР, Richards Bay
10	Balikpapan Coal Terminal	Индонезия, Восточный Калимантан
11	North Pulau Laut Coal Terminal	Индонезия, Южный Калимантан
12	Tanjung Bara Coal Terminal	Индонезия, Восточный Калимантан
13	Westshore Terminal (Roberts Bank Superport)	Канада, Ванкувер
14	Neptune Bulk Terminal Canada	Канада, Ванкувер
15	Ridley Coal Terminal	Канада, Prince Rupert Port
16	Puerto Bolivar Coal Export Terminal	Колумбия, La Guajira
17	Puerto Drummond Coal Port	Колумбия, Magdalena
18	Puerto Nuevo Coal Terminal	Колумбия, Magdalena
19	CNX Marine Terminal	США, Baltimore
20	Dominion Terminal	США, Hampton Roads Virginia
21	Quinhuandao Coal Terminals	Китай, Quinhuandao
22	Caofeidian Coal Terminal	Китай, Tangshan
23	Rizhao Coal Terminal	Китай, Rizhao
24	«Ростерминалуголь»	Россия, Усть-Луга
25	Восточный (ППК-3)	Россия, порт Восточный
26	«Дальтрансуголь»	Россия, Ванино

Примечание. Детализация полученных характеристик терминалов приведена в работе [6, прил. 1], условия и терминалы, отсеченные из выборки, — в [6, прил. 2], компоновки характеристик — в [6, прил. 3].

При отнесении терминалов к современным учитывалось следующее: только экспортные операции с углем, использование новейшего оборудования (вагоноопрокидыватели, судопогрузочные машины, стакеры, реклаймеры), стабильный грузооборот более 5 млн т/год на протяжении 3–5 лет. Большинство из этих терминалов находятся в Австралии, Китае, Колумбии, ЮАР, России, Канаде, Индонезии и США (рис. 1).

Помимо выделенных нами, в мире существует достаточное количество прочих угольных терминалов. В частности, из выборки были отсечены крупные терминалы Тяньцзинь (Китай, грузооборот 90 млн т/год) и Парадип (Индия, 24 млн т/год), причина в том, что они обеспечивают экспортно-импортную перевалку угля, поэтому нет возможности определить долю экспортного грузопотока и занятость оборудования только под экспортные операции.

Следует отметить, что не существует аналогичных терминалов. Для каждого терминала характерен индивидуальный набор, состоящий из компоновки, комплекта оборудования, технологических характеристик. Для сопоставления с виду похожих, но при этом весьма различающихся терминалов выполнен детализированный анализ отраслевых усредненных характеристик (бенчмаркинга) и подготовлены предложения по систематизации характеристик по группам эффективности. Основные характеристики для анализа:

грузооборот;

характеристики технологических зон:

— морского грузового фронта (далее — МГФ) — длина причальной линии, производительность судопогрузочных машин (далее — СПМ);
— складской зоны (далее — СЗ) — площадь открытых складских площадок под штабелирование угля, производительность укладки штабеля (stacking), производительность расформирования штабеля (reclaiming);
— железнодорожного грузового фронта (далее — ЖГФ) — производительность выгрузки железнодорожных вагонов.



Рис. 1. **Размещение современных морских терминалов по экспортной перевалке угля**

1. ГРУЗООБОРОТ

Основная характеристика любого портового терминала — годовой грузооборот, позволяющий оценить значимость и масштабность перегрузочного комплекса. Ранжирование по максимальному грузообороту морских терминалов, выполняющих экспортную перевалку угля, приведено в табл. 2, из которой видно, что у большинства терминалов наивысшие значения грузооборота приходились на 2014 и 2015 гг.

Таблица 2

Ранжирование по максимальному грузообороту

№ п/п	Терминал	Страна	Максимальный грузооборот, т/год	Год
1	Quinhuandao	Китай	253 000 000	2011
2	Caofeidian	Китай	100 000 000	—
3	Kooragang	Австралия	91 864 642	2014
4	Richard Bay	ЮАР	75 379 067	2015
5	Dalrymple Bay	Австралия	69 571 657	2014
6	RG Tanna	Австралия	55 602 406	2009/2010
7	NCIG	Австралия	54 100 000	2015
8	Rizhao	Китай	45 000 000	2012
9	Hay Point	Австралия	44 397 721	2015
10	Puerto Bolivar	Колумбия	33 500 000	2013
11	Puerto Drummond	Колумбия	32 000 000	—
12	Westshore Terminal	Канада	30 600 000	2014
13	Abbot Point	Австралия	27 228 191	2015
14	Tanjung Bara	Индонезия	24 000 000	—
15	Puerto Nuevo	Колумбия	22 000 000	—
16	Восточный (ППК-3)	Россия	20 492 820	2015
17	Carrington	Австралия	20 027 245	2014
18	«Дальтрансуголь»	Россия	18 280 000	2015
19	«Ростерминалуголь»	Россия	17 468 526	2015
20	Dominion	США	16 076 078	2013
21	Port Kembla	Австралия	15 200 000	1992
22	CNX	США	15 000 000	—
23	North Pulau Laut	Индонезия	13 200 000	—
24	Balikpapan C	Индонезия	12 600 000	2014
25	Ridley	Канада	11 789 000	2013
26	Neptune	Канада	7 500 000	2013
Итого			**1 125 877 353**	

Современные угольные экспортные терминалы обеспечивают мировой грузооборот в 1126 млрд т/год. Примерно 1/3 составляет внутренний грузопоток угля внутри Китая (на мегатерминалы Quinhuandao и Caofeidian, а также на Rizhao приходится 398 млн т/год), а остальные 2/3 представляет международный экспорт между странами. При этом из 728 млн т/год международной торговли более половины обеспечивает Австралия (51,9 %, или 378,0 млн т/год), а доля РФ не столь существенна (7,7 %, или 56,2 млн т/год). Интересно, что Индонезия по абсолютному результату обеспечивает экспортный грузопоток, практически эквивалентный австралийскому, но большинство индонезийских терминалов не являются технологичными и высокопроизводительными, так как используют рейдовую перевалку плавучими кранами из малотоннажных барж в морские балкерные суда (эти терминалы не включены в табл. 2). Общее распределение грузооборота современных морских терминалов по экспортной перевалке угля приведено на рис. 2.

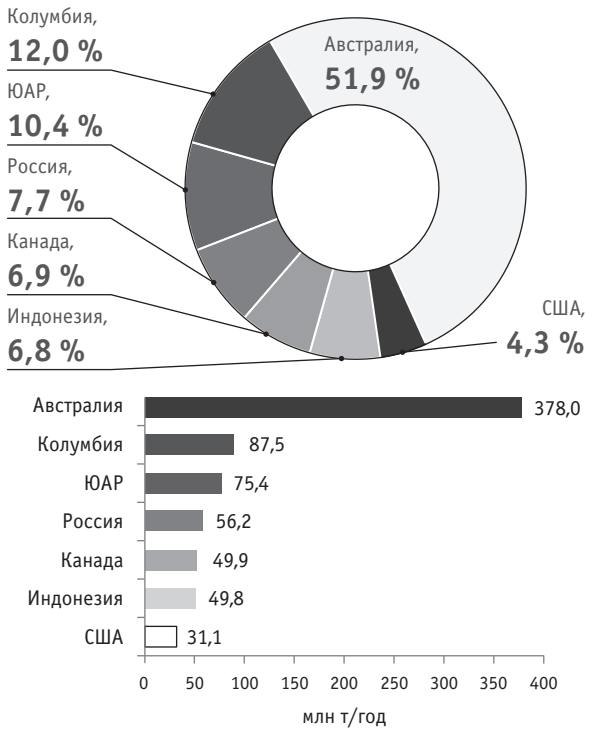


***Рис. 2*. Распределение экспортного грузооборота угля современных морских терминалов (без учета внутреннего грузопотока Китая)**

Большинство мировых терминалов (13 из 26) обеспечивают грузооборот 10–30 млн т/год. При этом крупные терминалы имеют грузооборот более 75 млн т/год (Richard Bay, Kooragang, Caofeidian, Quinhuandao). Распределение терминалов по группам грузооборота приведено на рис. 3.

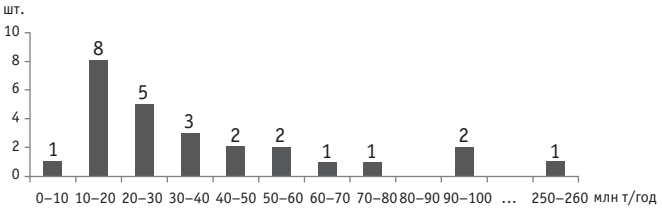
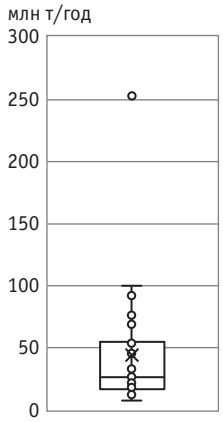


***Рис. 3*. Распределение грузооборота современных морских терминалов по экспортной перевалке угля**

Несмотря на то что среднее значение грузооборота для 26 терминалов составляет 43,3 млн т/год, наблюдается асимметрия распределения данных. Медианное значение (наиболее репрезентативный показатель, который менее чувствителен к выбросам, в отличие от среднего) грузооборота смещено ниже среднего значения и составляет 25,6 млн т/год.

Как показывают полученные данные, в Российской Федерации необходим ввод новых очередей для существующих терминалов и строительство новых перегрузочных комплексов, так как доля России 7,7 % в международном экспортном грузопотоке угля незначительна, при этом каждый в отдельности действующий терминал («Ростерминалуголь» — 17,5, «Дальтрансуголь» — 18,3, ППК-3 порта Восточный — 20,5 млн т/год) обеспечивает значение годового грузооборота менее медианного отраслевого, равного 25,6 млн т. Диаграмма размаха и статистический анализ грузооборота приведены на рис. 4.



Грузооборот	Значение, млн т/год
Максимальный	253
Средний	43,3
Минимальный	7,5
Верхний квартиль (0,75 квантиль)	54,5
Медиана (0,50 квантиль)	25,6
Нижний квартиль (0,25 квантиль)	15,9

***Рис. 4.* Диаграмма размаха и статистический анализ грузооборота**

В табл. 3 предлагается классификация терминалов по грузообороту. Для увеличения грузооборота следует комплексно подходить к взаимоувязке характеристик технологических зон МГФ, СЗ и ЖГФ.

Таблица 3

Предлагаемая классификация терминалов по грузообороту

№ п/п	Категория терминала	Диапазон значений грузооборота, млн т/год	Обоснование
1	Небольшой	Менее 15	Нижний квартиль 15,9
2	Средний	15–30	Медианное значение 25,6
3	Выше среднего	30–50	Среднее значение 43,3
4	Крупный	50–100	Верхний квартиль 54,5
5	Мегатерминал	Более 100	Текущий максимум 253

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗОН

В мировой научной практике для определения эффективности терминалов оперируют коэффициентами использования пространства (длины причала, площади СЗ) и запаса производительности оборудования (МГФ, СЗ, ЖГФ). В рамках нашего исследования эти коэффициенты вычислены для каждого из 26 терминалов, итоговые результаты приведены в табл. 4. Детализация, методика расчета и предложения относительно классификации характеристик по группам эффективности рассматриваются в разделах 2.1–2.3.

Таблица 4

Усредненные характеристики (бенчмаркинг) МГФ, СЗ и ЖГФ

№ п/п	Терминал	МГФ			СЗ			ЖГФ
		Дедвейт максимального судна, т	$K_{пр}$, т/(год·м)	$K_{СПМ}$	$K_{СЗ}$, т/(год·м^2)	$K_{укл}$	$K_{расф}$	$K_{ЖГФ}$
1	Abbot Point	200 000	52 362	4,2	60,6	6,1	6,4	4,4
2	Balikpapan	90 000	53 617	2,4	88,3	2,1	2,4	–
3	Caofeidian	150 000	37 736	4,8	81,9	5,1	8,1	3,0
4	Carrington	180 000	36 413	2,2	125,2	4,4	4,4	4,9
5	CNX	200 000	39 267	4,1	104,7	2,9	4,7	2,9
6	Dalrymple Bay	220 000	51 997	3,0	128,0	5,2	3,1	2,3
7	Dominion	180 000	22 706	3,5	87,0	4,8	5,6	2,8
8	Hay Point	230 000	68 908	4,0	179,5	2,4	3,6	1,8
9	Kooragang	210 000	68 556	3,0	164,0	4,9	3,5	3,2
10	Neptune	180 000	32 609	6,3	109,3	4,1	5,3	4,2
11	NCIG	210 000	50 798	3,4	116,3	2,8	2,8	2,8
12	North Pulau Laut	150 000	54 545	2,7	157,1	2,0	2,7	–
13	Port Kembla	166 000	52 414	7,6	134,5	6,4	7,6	4,3
14	Puerto Bolivar	180 000	51 538	6,3	241,7	1,9	2,9	1,6
15	Puerto Drummond	220 000	21 333	4,4	192,8	5,5	4,4	3,3
16	Puerto Nuevo	183 000	31 700	3,2	72,5	3,2	3,2	3,2
17	Quinhuandao	150 000	46 379	3,9	140,0	3,7	6,7	2,1
18	RG Tanna	220 000	50 778	2,8	57,4	3,6	3,6	2,8
19	Richard Bay	200 000	40 439	4,4	73,0	3,7	2,5	3,2
20	Ridley	250 000	78 593	6,7	46,8	5,2	7,8	4,5
21	Rizhao	150 000	60 811	3,5	103,1	3,5	5,8	2,8
22	Tanjung Bara	220 000	77 419	3,3	126,6	1,5	1,7	1,5
23	Westshore Terminal	260 000	49 918	4,0	104,9	2,6	3,9	3,0
24	Восточный (ППК-3)	150 000	26 893	6,0	139,6	3,0	6,0	3,0
25	«Дальтрансуголь»	170 000	31 301	4,1	83,2	3,4	4,1	3,4
26	«Ростерминалуголь»	105 000	31 194	3,5	112,4	3,5	3,5	3,5

2.1. Морской грузовой фронт

Экспортный грузооборот во многом зависит от конфигурации причалов МГФ. Для определения эффективности судопогрузочных операций и унификации типовых производительностей в международной научной практике применяют два коэффициента [7, 8]:

коэффициент использования длины причала (quay length factor), предложен в 2012 г. [8];

коэффициент запаса производительности судопогрузочных операций (seaside equipment installation factor), предложен в 2015 г. [7].

Коэффициент использования длины причала $K_{\text{пр}}$, т/(год·м), определяется следующим образом:

$$K_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{год(max)}}}{L_{\text{пр}}},$$

где $Q_{\text{год(max)}}$ — максимальный годовой грузооборот терминала, т/год;

$L_{\text{пр}}$ — суммарная длина причальной линии, м.

Следует отметить, что предложенные в работе [8] для угольных терминалов значения $K_{\text{пр}}$ в диапазоне 25 000–75 000 т/(год·м) являются достаточно приближенными. В рамках настоящего исследования уточнено, что лишь малое число терминалов относится к нижней или верхней границе. Распределение $K_{\text{пр}}$ в зависимости от грузооборота представлено на рис. 5, размах значений и статистический анализ — на рис. 6.

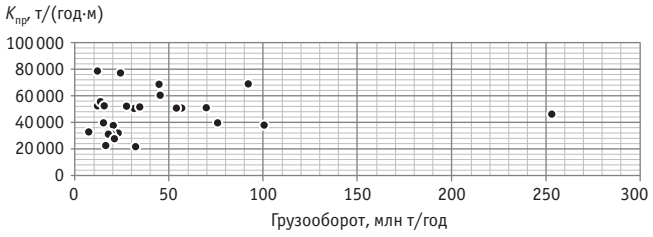
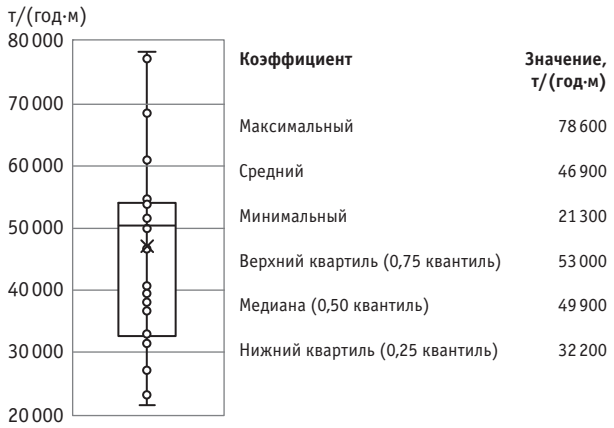


Рис. 5. **Распределение $K_{\text{пр}}$ в зависимости от грузооборота**



Коэффициент	Значение, т/(год·м)
Максимальный	78 600
Средний	46 900
Минимальный	21 300
Верхний квартиль (0,75 квантиль)	53 000
Медиана (0,50 квантиль)	49 900
Нижний квартиль (0,25 квантиль)	32 200

Рис. 6. **Диаграмма размаха и статистический анализ $K_{\text{пр}}$**

В табл. 5 приведена предлагаемая классификация терминалов по $K_{\text{пр}}$.

Таблица 5

Предлагаемая классификация коэффициента использования длины причала $K_{\text{пр}}$

№ п/п	Категория терминала	Диапазон $K_{\text{пр}}$, т/(год·м)	Обоснование
1	С чрезмерным запасом длины причала	Менее 32 500	Нижний квартиль 32 200
2	Недостаточно эффективный	32 500–45 000	В промежутке между нижним квартилем и средним/медианным значениями
3	Эффективный	45 000–55 000	Медианное значение 49 900, среднее значение 46 900
4	Высокоэффективный	Более 55 000	Текущий максимум 78 600

Для увеличения $K_{\text{пр}}$ следует находить баланс между длиной причальной линии, количеством судопогрузочных машин и единичной производительностью СПМ.

Заходы балкерных судов в порт обладают фактором неопределенности, поэтому возникает характер стохастического распределения и ожидания в очереди (в отличие от контейнерных перевозок, где равномерность судозаходов достигается за счет составления расписаний). В связи с этим, а также из-за специфики работы складских стакер-реклаймеров (выполняют переходы вдоль склада, производительность изменяется в зависимости от выработанности штабеля) возникает необходимость в создании дополнительного запаса производительности судопогрузочных машин.

Коэффициент запаса производительности судопогрузочных операций $K_{\text{СПМ}}$ определяется как

$$K_{\text{СПМ}} = \frac{Q_{\text{год}}}{Q_{100\%}} = \frac{Q_{\text{год}}}{n_{\text{СПМ}} \cdot Q_{\text{СПМ(техн)}} \cdot 365 \cdot 24},$$

где $Q_{\text{год}}$ — отгруженный годовой грузооборот терминала, т/год;

$Q_{100\,\%}$ — теоретический грузооборот (СПМ при полной занятости в течение года), т/год;

$n_{\text{СПМ}}$ — количество СПМ, шт.;

$Q_{\text{СПМ(техн)}}$ — техническая производительность СПМ, т/ч.

Коэффициент $K_{\text{СПМ}}$ введен в 2015 г., причем в работе [7] сделан единственный вывод о его значительной вариативности. Нами выполнен более детализированный анализ $K_{\text{СПМ}}$ (рис. 7 и 8).

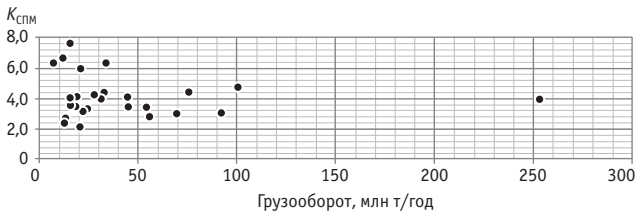
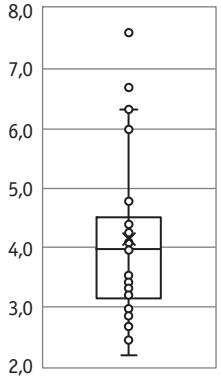


Рис. 7. **Распределение $K_{\text{СПМ}}$ зависимости от грузооборота**



Коэффициент	Значение
Максимальный	7,6
Средний	4,1
Минимальный	2,2
Верхний квартиль (0,75 квантиль)	4,5
Медиана (0,50 квантиль)	4,0
Нижний квартиль (0,25 квантиль)	3,1

***Рис. 8*. Диаграмма размаха и статистический анализ $K_{СПМ}$**

В табл. 6 предлагается классификация терминалов по $K_{СПМ}$ (меньшие значения соответствуют более рациональному использованию СПМ).

Таблица 6

Предлагаемая классификация коэффициента запаса производительности судопогрузочных операций $K_{СПМ}$

№ п/п	Категория терминала	Диапазон $K_{СПМ}$	Обоснование
1	С чрезмерным запасом производительности	Более 6,0	Текущий максимум 7,6
2	Недостаточно эффективный	4,5–6,0	Верхний квартиль 4,5
3	Эффективный	3,0–4,5	Медианное значение 4,0, среднее значение 4,1
4	Высокоэффективный	Менее 3,0	Текущий минимум 2,2

Для снижения $K_{СПМ}$ следует устанавливать поэтапно рациональное количество СПМ, сокращать длительность непроизводственных операций (таможенная и санитарная инспекции, оформление разрешительных документов), увеличивать эффективность судопогрузочных операций (минимальное технологически выполнимое количество остановок на подачу потока угля со стакер-реклаймера и на переходы СПМ между трюмами, установка накопительного бункера на МГФ).

2.2. Складская зона

Для определения эффективности компоновки СЗ в международной научной практике применяют три коэффициента, отвечающих за компактность компоновки и эффективность операций складских машин:

коэффициент использования площади СЗ (storage factor), предложен H. Ligteringen в 2012 г. [8];

коэффициент запаса производительности укладки штабеля (stacking equipment installation factor), предложен T. Van Vianen в 2015 г. [7];

коэффициент запаса производительности расформирования штабеля (reclaiming equipment installation factor), предложен T. Van Vianen в 2015 г. [7].

Для складской зоны важна компактность компоновки, поскольку стоимость владения 1 м^2 земельного участка в границах существующих портов может быть значительной. Несмотря на общую компактность, СЗ должна обеспечивать накопление достаточного количества судовых партий, так как может потребоваться хранение различных марок угля. Обычно СЗ имеет форму вытянутого прямоугольника, в рамках которого выполняется подбор длины и ширины (зависит от вылета стрелы складских машин), а также количества складских машин (стакеров, реклаймеров или стакер-реклаймеров).

Для определения компактности компоновки применяется коэффициент использования площади складской зоны $K_{СЗ}$, т/(год·м^2):

$$K_{СЗ} = \frac{Q_{год(max)}}{S_{СЗ}},$$

где $Q_{год(max)}$ — максимальный грузооборот терминала, т/год;

$S_{СЗ}$ — площадь складской зоны под хранение угля, м^2.

В работе [8] утверждается, что коэффициент использования площади угольных импортных терминалов составляет 15–25 т/(год·м^2), а экспортные угольные терминалы имеют в несколько раз большие значения (без конкретных указаний). В рамках настоящего исследования установлено, что значения отличаются в десятки раз. Распределение $K_{СЗ}$ в зависимости от грузооборота представлено на рис. 9, размах значений и статистический анализ — на рис. 10.

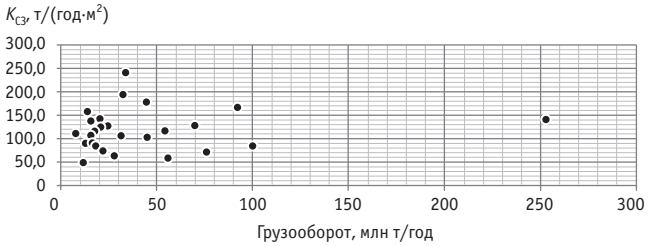
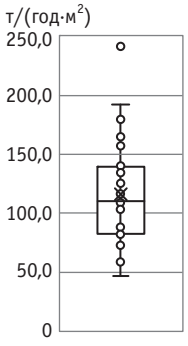


***Рис. 9*. Распределение $K_{СЗ}$ в зависимости от грузооборота**



Коэффициент	Значение, т/(год·м^2)
Максимальный	241,7
Средний	116,6
Минимальный	46,8
Верхний квартиль (0,75 квантиль)	139,7
Медиана (0,50 квантиль)	110,9
Нижний квартиль (0,25 квантиль)	82,9

***Рис. 10*. Диаграмма размаха и статистический анализ $K_{СЗ}$**

В табл. 7 приведена предлагаемая классификация терминалов по $K_{СЗ}$, обеспечивающему «проходимость» грузооборота через единичную площадь складской зоны.

Таблица 7

Предлагаемая классификация $K_{СЗ}$

№ п/п	Категория терминала	Диапазон $K_{СЗ}$, т/(год·м^2)	Обоснование
1	С чрезмерным запасом площади СЗ	Менее 80	Текущий минимум 46,8
2	Недостаточно эффективный	80–100	Нижний квартиль 82,9
3	Эффективный	100–140	Медианное значение 110,9 и среднее значение 116,6, верхний квартиль 139,7
4	Высокоэффективный	Более 150	Текущий максимум 241,7

Для увеличения $K_{СЗ}$ следует разумно минимизировать пространство под открытые площадки штабелирования угля, использовать складские машины с технически максимально возможным вылетом стрелы и компоновать число площадок с оптимальным соотношением длины и ширины.

На терминале одновременно выполняются операции как по укладке угля (stacking), так и по расформированию (reclaiming) штабеля. Для этого используют комбинированные стакер-реклаймеры (могут чередовать функции укладки или расформирования), стакеры (только функция укладки) и реклаймеры (только функция расформирования). Для каждого терминала были определены коэффициенты запаса производительности укладки $K_{укл}$ и расформирования штабеля $K_{расф}$. Методика расчета аналогична коэффициенту запаса производительности судопогрузочных операций.

Распределение коэффициентов $K_{укл}$ и $K_{расф}$ от грузооборота представлено на рис. 11 и 12, размах значений и статистический анализ — на рис. 13 и 14. Заметно, что значения запаса на расформирование штабеля в 1–2 раза больше запаса на укладку штабеля. Это объясняется тем, что поступление и выгрузка железнодорожных вагонов являются более равномерными за счет составления долгосрочных расписаний (требуется меньшее количество стакеров), в то время как для судозаходов характерен фактор неравномерности и сезонности (требуется большее количество реклаймеров).

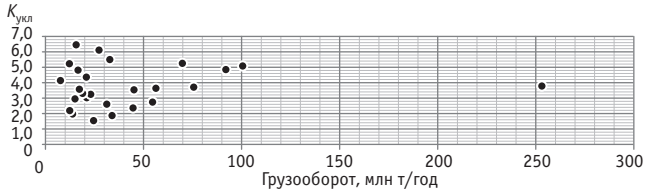


***Рис. 11.* Распределение $K_{укл}$ в зависимости от грузооборота**

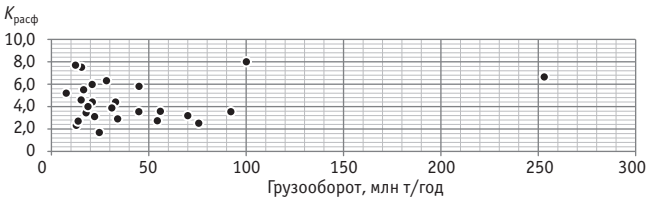
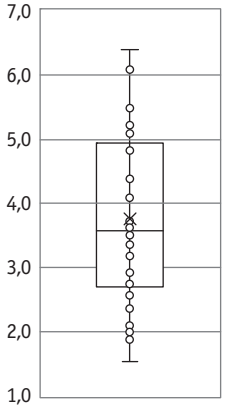
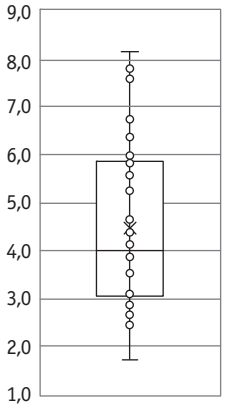


***Рис. 12.* Распределение $K_{расф}$ в зависимости от грузооборота**



Коэффициент	Значение
Максимальный	6,4
Средний	3,7
Минимальный	1,5
Верхний квартиль (0,75 квантиль)	4,9
Медиана (0,50 квантиль)	3,6
Нижний квартиль (0,25 квантиль)	2,7

***Рис. 13.* Диаграмма размаха и статистический анализ $K_{укл}$**



Коэффициент	Значение
Максимальный	8,1
Средний	4,5
Минимальный	1,7
Верхний квартиль (0,75 квантиль)	5,9
Медиана (0,50 квантиль)	4,0
Нижний квартиль (0,25 квантиль)	3,0

***Рис. 14.* Диаграмма размаха и статистический анализ $K_{расф}$**

Предлагаемая классификация терминалов по коэффициенту запаса производительности складских машин (меньшие значения соответствуют более оптимальному количеству машин и более рациональному их использованию) приведена в табл. 8.

Таблица 8

Предлагаемая классификация коэффициентов запаса производительности укладки штабеля $K_{укл}$ и расформирования штабеля $K_{расф}$

№ п/п	Категория терминала	Диапазон	
		$K_{укл}$	$K_{расф}$
1	С чрезмерным запасом производительности	Более 5,0	Более 6,0
2	Недостаточно эффективный	4,0–5,0	5,0–6,0
3	Эффективный	2,5–4,0	3,5–5,0
4	Высокоэффективный	Менее 2,5	Менее 3,5

Для уменьшения коэффициента запаса производительности операций складских машин целесообразны следующие меры: поэтапная оптимизация количества машин, использование комбинированных стакер-реклаймеров вместо одиночных стакеров и реклаймеров (что обеспечит снижение общего количества машин), сокращение длительности непроизводственных операций (за счет меньшей протяженности переходов вдоль склада), увеличение эффективности производственных операций (планирование равномерного потока укладки с ЖГФ и расформирования на МГФ с минимальным количеством остановок).

2.3. Железнодорожный грузовой фронт

Для выгрузки вагонов в основном используют вагоноопрокидыватели, небольшое число терминалов применяет днищевую выгрузку (это позволяет конструкция австралийских вагонов).

В мировой и российской научной практике не было попыток систематизировать и проанализировать операции выгрузки вагонов в зоне ЖГФ. Мы предлагаем использовать для этого коэффициент запаса производительности выгрузки железнодорожных вагонов $K_{ЖГФ}$. Методика расчета аналогична расчету коэффициента запаса производительности судопогрузочных операций.

Распределение $K_{ЖГФ}$ в зависимости от грузооборота представлено на рис. 15, размах значений и статистический анализ — на рис. 16.

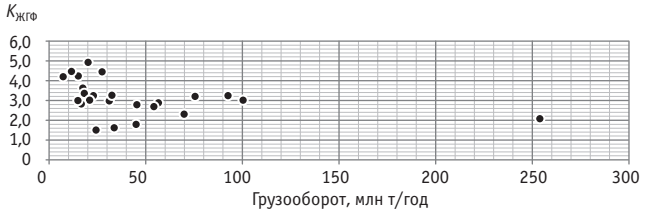


***Рис. 15.* Распределение $K_{ЖГФ}$ в зависимости от грузооборота**



***Рис. 16.* Диаграмма размаха и статистический анализ $K_{ЖГФ}$**

В табл. 9 предлагается классификация терминалов по коэффициенту запаса производительности выгрузки железнодорожных вагонов (меньшие значения соответствуют более рациональному использованию оборудования ЖГФ).

Таблица 9

Предлагаемая классификация коэффициента запаса производительности выгрузки железнодорожных вагонов $K_{ЖГФ}$

№ п/п	Категория терминала	Диапазон $K_{ЖГФ}$	Обоснование
1	С чрезмерным запасом производительности	Более 4,0	Текущий максимум 4,9
2	Недостаточно эффективный	3,5–4,0	Верхний квартиль 3,5
3	Эффективный	2,8–3,5	Медианное значение 3,0 и среднее значение 3,1
4	Высокоэффективный	Менее 2,8	Нижний квартиль 2,8

Классификация эффективности усредненных характеристик и грузооборота морских терминалов по экспортной перевалке угля приведена в табл. 10.

Таблица 10

Предлагаемая классификация распределения эффективности отраслевых усредненных характеристик и грузооборота современных морских терминалов по экспортной перевалке угля

№ п/п	Категория терминала	Диапазон отраслевых усредненных характеристик					
		$K_{пр}$, т/(год·м)	$K_{СПМ}$	$K_{СЗ}$, т/(год·м^2)	$K_{укл}$	$K_{расф}$	$K_{ЖГФ}$
1	С чрезмерным запасом	Менее 32 500	Более 6,0	Менее 80	Более 5,0	Более 6,0	Более 4,0
2	Недостаточно эффективный	32 500–45 000	4,5–6,0	80–100	4,0–5,0	5,0–6,0	3,5–4,0
3	Эффективный	45 000–55 000	3,0–4,5	100–140	2,5–4,0	3,5–5,0	2,8–3,5
4	Высокоэффективный	Более 55 000	Менее 3,0	Более 150	Менее 2,5	Менее 3,5	Менее 2,8
Диапазон грузооборота, млн т/год							
1	Небольшой	Менее 15					
2	Средний	15–30					
3	Выше среднего	30–50					
4	Крупный	50–100					
5	Мегатерминал	Более 100					

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены исследования, посвященные созданию дополнительных инструментов на начальных стадиях проектирования (предпроектный анализ и предпроектные решения) современных морских терминалов по экспортной перевалке угля. Разработаны и предложены классификации технологических характеристик и грузооборота, благодаря которым становится возможным оценивать и сравнивать эффективность технологических зон (морской грузовой фронт, складская зона, железнодорожный грузовой фронт) и терминалов. Полученные результаты и выводы соответствуют приоритетным мировым направлениям развития технологического проектирования морских портов.

Литература

1. Vianen van T. A., Ottjes J. A., Lodewijks G. Dry Bulk Terminal Characteristics // Bulk Solids Handling. Delft, 2011.
2. de Oliveira G. F., Cariou P. A DEA study of the efficiency of 122 iron ore and coal ports and of 15/17 countries in 2005 // Maritime Policy and Management. 2011. Vol. 38 (7). P. 727–743.
3. Port development: a handbook for planners in developing countries / UNCTAD; second edition, revised and expanded. New York, 1985. 228 p.
4. Benchmarking Report: SA Port Terminals (2015/16) / Ports Regulator of South Africa. 2016. 34 p.
5. Угольные терминалы мира [Электронный ресурс]. URL: http://www.sourcewatch.org/index.php/Coal_terminals (дата обращения 20.09.2016).
6. Информация о современных терминалах по экспортной перевалке угля: детализация технологических характеристик, условия отсечения из выборки, компоновки [Электронный ресурс Н. В. Купцова]. URL: https://drive.google.com/file/d/0B03oqTSXAGk8WEhFd05YaHNQRlU/view (дата обращения 20.09.2016).
7. Van Vianen T. Simulation-integrated Design of Dry Bulk Terminals / Delft University of Technology. Delft, 2015. 247 p.
8. Ligteringen H., Velsink H. Ports and Terminals / Delft University of Technology. Delft: Delft Academic Press, 2012. 276 p.

References

1. Vianen van T. A., Ottjes J. A., Lodewijks G. Dry Bulk Terminal Characteristics // Bulk Solids Handling. Delft, 2011.
2. de Oliveira G. F., Cariou P. A DEA study of the efficiency of 122 iron ore and coal ports and of 15/17 countries in 2005 // Maritime Policy and Management. 2011. Vol. 38 (7). P. 727–743.
3. Port development : a handbook for planners in developing countries / UNCTAD ; second edition, revised and expanded. New York, 1985. 228 p.
4. Benchmarking Report: SA Port Terminals (2015/16) / Ports Regulator of South Africa. 2016. 34 p.
5. Ugolnye terminaly mira [World coal terminlas]. [Electronic resource]. URL: http://www.sourcewatch.org/index.php/Coal_terminals (date access 20.09.2016).
6. Informaciya o sovremennykh terminalakh po eksportnoj perevalke uglya: detalizaciya tekhnologicheskikh kharakteristik, usloviya otsecheniya iz vyborki, komponovki [Information on modern coal transshipping terminals: detailed technical characteristics, conditions of removal from sampling, layouts]. [Electronic resource of N. V. Kuptsov]. URL: https://drive.google.com/file/d/0B03oqTSXAGk8WEhFd05YaHNQRlU/view (date access 20.09.2016).
7. Van Vianen T. Simulation-integrated Design of Dry Bulk Terminals / Delft University of Technology. Delft, 2015. 247 p.
8. Ligteringen H., Velsink H. Ports and Terminals / Delft University of Technology. Delft : Delft Academic Press, 2012. 276 p.

УДК 159.9.07

Владимир Митрофанович Воронин, доктор психологических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), профессор департамента психологии Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,
Зинаида Афанасьевна Наседкина, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и подъемно-транспортных машин Российского государственного профессионально-педагогического университета (РГППУ), Екатеринбург, Россия,
Сергей Александрович Свердлов, магистрант факультета психологии Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

Vladimir Mitrofanovich Voronin, DSc in Psychology, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Professor, Psychology Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,
Zinaida Afanasievna Nasedkina, PhD in Engineering, Associate Professor, Automobiles and Loading-transport Vehicles Department, Russian State Vocational Pedagogical University (RSVPU), Ekaterinburg, Russia,
Sergey Alexandrovich Sverdlov, graduate student, Psychology Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia

Prinicples of building adaptive transport training systems

Аннотация

В статье рассмотрены некоторые принципы, которыми следует руководствоваться при разработке транспортных адаптивных тренажеров. Эти системы обучения позволяют управлять усвоением не только по конечным результатам, но и по заранее выделенным параметрам процесса, определяющим его условия. Действительные параметры оператора и общие принципы того, как машине следует его изучать, должны быть заложены в устройство с самого начала. Показано, что адекватная модель оператора транспортных средств должна иметь по крайней мере три компонента.

Во-первых, это модель поведения, описывающая такие физические события, как отбор стимулов и ответов, и правила, определяющие верный ответ. Во-вторых, эта часть модели может также содержать правила адаптации, быть расчленяемой (в том смысле, что стимулы могут быть отнесены к типу, характеризующему данный поднавык в зависимости от вызываемой ими адаптации). Наконец, она должна включать физические процедуры, которые модифицируют исходные стимулы, чтобы посредством упрощения произвести другие стимулы.

Ключевые слова: адаптивные системы, транспортные адаптивные тренажеры, структурированные навыки, поднавыки, ИИ-модель, УУ-модель, контроллер, субконтроллер.

Summary

The articles reviews certain principles, to be followed in the development of transport adaptive training devices. Those learning systems allow controlling the learning process not only by end results, but also by the preselected process parameters defining its conditions. The actual parameters of the operator and general principles of the way the machine should study it, must be incorporated in the device from the very beginning. It has been demonstrated that an adequate model of a vehicle operator must include at least three components.

First, a behavior model describing such physical events as selection of stimuls and responses, and the rules defining the correct response. Second, that part of the model can also contain adaptation rules, be separable (in the meaning that stimuls may be assigned to a type describing the given subskill depending on the adaptation it causes). Finally, it must include physical procedures that modify the initial stimuls so that other stimuls can be recreated by simplification.

Keywords: adaptive systems, transport adaptive training systems, structured skills, II-model, UU-model, controller, subcontroller.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-27-32

Создание адаптивных и игровых тренажеров [1, 2] — сравнительно новое и перспективное направление в области технических средств обучения. Адаптивные тренажеры позволяют автоматически изменять алгоритм обучения в зависимости от успехов оператора, с учетом индивидуальных способностей которого строится стратегия обучения. В таком тренажере накапливаются данные об уровне подготовки оператора и выбирается способ представления нормальных или аварийных ситуаций, обеспечивающий максимальное их усвоение. При выборе переменных программ учитываются не только текущие действия оператора, но и вся предыстория его обучения и тренировок. Варианты построения адаптивных тренажеров для подготовки операторов в авиации и атомной энергетике впервые были рассмотрены в работах [3, 4]. Однако создание адаптивных систем обучения операторов железнодорожного и других видов транспорта требует проведения специальных исследований. Рассмотрим некоторые принципы, которыми следует руководствоваться при разработке транспортных адаптивных тренажеров.

Адаптивные системы позволяют учитывать индивидуальные особенности операторов, уровень развития и специфику обучения в течение всего учебного процесса, управлять усвоением не только по конечным результатам, но и по заранее выделенным параметрам процесса, определяющим его условия. При подготовке специалистов железнодорожного, авиационного или автомобильного транспорта — диспетчеров, дежурных по станции, водителей, пилотов, машинистов электровозов — требования к адаптивным обучающим системам будут различными.

Как отмечал Г. Паск [5], основная задача адаптивных средств заключается в том, чтобы стабилизировать систему «человек — машина» и использовать специально подготовленную

e-mail: zanvvm@yandex.ru
Дата поступления: 15.10.2016

программу или структурную схему для направленного изменения поведения человека. Машина в данном случае выступает в роли особого механизма управления. Существенным, на наш взгляд, является то, что во взаимодействии с машиной человек не должен рассматриваться в качестве некого «черного ящика», как это характерно для бихевиористского или для упрощенного кибернетического подхода. Он должен рассматриваться не только и не столько сенсорными входами (зрение, слух, осязание), но и другими важными когнитивными структурами, прежде всего вниманием, выделяющим объекты познавательной деятельности. Соответственно и ответ в большинстве случаев не может быть описан лишь в виде некоторых реакций, а предполагает использование определенной системы знаков, с помощью которых описывается и интерпретируется ситуация и происходит общение между человеком и обучающей машиной.

Однако не только ограничения языкового характера или недостаток прочных знаний мешают продуктивному взаимодействию человека и компьютерной обучающей системы. На пути внедрения транспортных адаптивных обучающих систем возникает ряд трудностей.

Во-первых, трудности общения с вычислительной машиной для разработчика и программиста при проектировании и реализации системы.

Во-вторых, трудность общения между реализованной системой и ее пользователем — обучаемым или учителем (в зависимости от того, какую роль человек играет во взаимодействии с машиной).

В-третьих, и это, пожалуй, самое важное, для многих практических задач принципиально значимо понимание того, как человек их решает. Исследователи искусственного интеллекта столкнулись с тем, что специалисты, представляющие самые разные области профессиональной деятельности, не могут сформулировать принципы, на основании которых принимают правильные решения. И в первую очередь это касается поездных и авиадиспетчеров.

В частности, разработчики автоматизированных систем, изучая работу поездного диспетчера, не понимают, каким образом он принимает решения. Самое интересное, что и диспетчер не может это объяснить. Конечно, данное обстоятельство отнюдь не означает, что большое число задач принятия решений не может быть формализовано, и прежде всего это задачи оптимизации, т.е. принятия оптимальных решений.

Для структурированных навыков, в том числе навыков вождения электровозов, автомобилей, самолетов и т.д., в теории адаптивного обучения создан понятийный аппарат: тип задачи, упрощение, фактор ошибки, индекс скорости обучения, существование различных подвидов навыка. Более того, можно говорить о наличии различных связей между этими понятиями. Например, утверждать, что положительный перенос умения (т.е. факт, что умение решать одну задачу помогает обучаемому усвоить метод решения другой) действительно характерен или нехарактерен для различных типов задач; что отрицательный перенос умения (понятие, обратное положительному переносу умения) имеет или не имеет место. Также можно утверждать, что даже при отсутствии отрицательного переноса умения существует или не существует непосредственная интерференция между решением ассоциированных типов задач в том смысле, что осуществление одного навыка интерферирует с осуществлением другого до тех пор, пока в процессе обучения не будет приобретен метод решения задач более высокого порядка. И наконец, что один навык обязательно должен быть усвоен еще до усвоения второго. Однако нет необходимости знать количественную сторону этих связей — обычно она зависит от индивидуальных различий, выявляемых адаптивной обучающей машиной.

То есть логично предположить, что если адаптивная машина должна обучать, например, навыку вождения, состоящему из различных поднавыков, то положительный (но неотрицательный) перенос умения имеет место между типами задач, характеризующими каждый из этих поднавыков. Также предположим, что обучение определенному поднавыку, скажем, i-го типа ($i = 1, 2,...n$) влечет за собой решение задач i-го типа. Отсюда можно заключить следующее: хотя скорость обучения критически зависит от частоты повторения поднавыков, порядок повторения не будет заметно влиять на скорость при условии, что каждый поднавык повторяется хотя бы один раз за данный отрезок времени (который всегда меньше по сравнению с продолжительностью всего обучения).

Рассмотрим основные идеи Г. Паска [5, 6], которые, на наш взгляд, чрезвычайно актуальны для разработки адаптивных транспортных тренажеров.

Адаптивная машина сродни партнеру в особого рода диалоге. В частности, она обладает способностью выявлять характерные особенности обучаемого, для того чтобы научить его. Для всех обучающих машин, используемых в качестве механизмов управления, справедливо, что должна существовать некая модель управляемого процесса, обеспечивающая каркас, в рамках которого может происходить обучение.

Одна из стратегий нахождения действительных параметров оператора, стратегия случайного варьирования параметров (с регистрацией результатов в памяти, чтобы могли быть выбраны наиболее выгодные вариации), оказалась, как известно, непрактичной. Более того, если объектом является человек, этот метод становится невозможным, ибо коммуникативная система «человек — машина» (внутри которой имеет смысл вариация параметров) должна активно поддерживаться обучающей машиной. Поэтому устройству не представляется никакой возможности для продолжительного экспериментирования, которое потребовалось бы для обнаружения таких далеко не очевидных фактов, как действительные параметры оператора. Эти факты и общие принципы того, как машине следует изучать оператора, должны быть заложены в устройство с самого начала. В вычислительной технике такие заявляемые ограничения и образуют программу (но каждая программа может продуцировать много различных режимов обучения, зависящих не только от непосредственно предшествующего ответа оператора, как в системе Н. Краудера, но и от адаптивных изменений, происходящих в обучающей машине).

Это обстоятельство было проверено нами в серии предварительных экспериментов. В них изучалось среднее время ответов при предъявлении стимульных последовательностей, в ко-

торых варьировались время экспозиции, яркость помех, размер цели [1]. Отсюда следует, что в адаптивной системе порядок, в котором предъявляются задачи данного типа, является несущественным, соответственно, как только выбран конкретный поднавык, можно создать режим обучения с помощью предопределенной и произвольной последовательности отобранных элементов. Далее, так как не достигается никакого преимущества от предвидения следующего события в этой создаваемой последовательности, относительная неуверенность обучаемого (которая по мере обучения уменьшается), возникающая при предъявлении некоторой задачи, есть неуверенность относительно решения именно этой задачи, а, скажем, не следующей. Наконец, не будет преувеличением предположить, что каждому поднавыку свойственен один-единственный фактор ошибки, что позволяет рассмотреть процедуру упрощения одного вида для каждого поднавыка.

Не вызывает сомнения, что эту простую модель, примененную нами к такому ограниченному случаю, как изучение индивидуальных особенностей сенсорно-перцептивных характеристик человека-оператора, можно использовать и для понимания всего диапазона структурированных навыков.

При создании адаптивной машины недостаточно определить только конечное поведение обучаемого — необходимо также предусмотреть набор методов решения задач. В результате адекватная модель оператора транспортных средств должна иметь по крайней мере два компонента.

Во-первых, должна существовать модель поведения, описывающая такие физические события, как отбор стимулов и ответов, и правила, определяющие верный ответ. Во-вторых, эта часть модели может также содержать правила адаптации, быть расчленяемой (стимулы могут быть отнесены к типу, характеризующему данный поднавык в зависимости от вызываемой ими адаптации). Наконец, она включает в себя физические процедуры, которые модифицируют стимулы для того, чтобы посредством упрощения произвести другие стимулы.

Затем, должен существовать алгоритмический или вычислительный компонент модели, который описывает задачи различных типов, решения этих задач и частичные решения. Эта часть модели может также содержать правила, определяющие конструирование алгоритмов решения задач (алгоритм употребляется здесь в значении хорошо определенной процедуры), и другие правила, уточняющие, какие алгоритмы могут считаться приемлемыми.

Связь между этими компонентами есть не что иное, как связь между моделируемым вычислительной машиной искусственным интеллектом или программой решения задач и механизмом управления, в рамках которого данный искусственный интеллект делает необходимые вычисления. Поэтому удобнее называть один компонент искусственным интеллектом, или ИИ-моделью, а другой — моделью устройства управления, или УУ-моделью. Но задача не выступает в качестве стимула, и, наоборот, решения задач достигаются путем использования алгоритмов или специальных программ, а применение алгоритмов «вызывает» поведение. Когда в ИИ-модели созданы алгоритмы, это может привести к изменению поведения в УУ-модели, что в терминах УУ является адаптацией. Связь между ИИ- и УУ-моделями зависит от готовности обучаемого интерпретировать физические стимулы как нечто, обозначающее задачи, и рассматривать некоторые альтернативы ответа как нечто, находящееся в соответствии с возможными альтернативными решениями. Эту готовность удобно рассматривать как удовлетворение аксиомы соответствия. Таким образом, эффективность адаптивной системы зависит от готовности человека обучаться навыку и производить успешное действие. Согласие обучаемого в этом случае удобно расценивать как удовлетворение аксиомы предпочтения. В конечном счете единство ИИ- и УУ-моделей зависит от справедливости аксиом соответствия и предпочтения.

Здесь мы вступаем в область педагогической психологии [7], что естественно, поскольку адаптивная система, как и живой преподаватель, имеет дело с обучением человека. Соответственно основными факторами, которые влияют на процесс обучения, будут факторы мотивации (Г. Паск называет их аксиомами готовности и предпочтения у обучаемого).

В то же время следует учитывать выводы Л. С. Нерсесяна и О. А. Конопкина [8] о том, что прогностическая способность методик профотбора машинистов в значительной степени зависит от отношения испытуемых к исследованию их профессионально значимых качеств. Поэтому аксиомы готовности и предпочтения только в первом приближении можно считать справедливыми.

В разработанной нами адаптивной системе это означает, что обучаемый должен в первую очередь обращать внимание всегда, когда возможно, на вход соответствующих (релевантных) стимулов и всегда, когда возможно, отдавать предпочтение целенаправленной адаптации, которая удовлетворяет набору правил, позволяющих давать правильный ответ на определенную стимульную последовательность.

Следующая важная психологическая проблема, возникающая при создании адаптивной обучающей системы, заключается в такой организации последовательности стимулов, которая обеспечивает доступные для понимания задачи, обладающие также свойством достаточного разнообразия или новизны. Это позволит поддерживать требуемую скорость адаптации.

Согласно практике обучения и психологической теории, никакая конечная и доступная для понимания среда, требующая единственного типа решения задачи, не может бесконечно удерживать внимание человека. Люди быстро утомляются, если вынуждены заниматься однообразной работой, чего не происходит в тех случаях, когда они постигают новые методы ее выполнения. Отсюда следует, что первоначальная задача поддержания стабильной коммуникативной системы «человек — машина» (системы диалога) зависит от поддержания баланса между новизной и доступностью для понимания релевантных стимулов.

Соблюдение двух фундаментальных факторов, т.е. готовности и предпочтения, с одной стороны, и разнообразия заданий — с другой, — это необходимые условия реализации адаптивной системы.

Вместе с тем возникает вопрос, можно ли рассматривать человека как самоорганизующуюся систему, способную сохранить определенную скорость адаптации. В пользу этого

свидетельствуют следующие факты из когнитивной психологии, полученные опытным путем [9, 10].

1. С функциональной точки зрения человек ведет себя в каждый момент времени как вычислительная система, выполняющая одновременно один тип вычислений. Он имеет определенное поле внимания, охватывающее конечный и наблюдаемый интервал, включающий вход в эту вычислительную систему и предполагаемые альтернативы ответа, выбор из которых составляет ее выход.

2. Эта вычислительная система имеет максимальную пропускную способность по обработке информации, если исходить из неопределенности (относительно выхода, когда состояние входа дано), которую она способна разрешить. Ситуации превышения этой емкости полагаются некорректными и могут сопровождаться эффектами перегрузки.

3. Существует также минимальная пропускная способность обработки информации (т.е. нормальный человек обязательно обращает внимание на неопределенности, свойственные некоторым ситуациям, и разрешает их).

4. Обработка данных некорректных ситуаций приводит к адаптации в УУ-модели и созданию алгоритма в ИИ-модели. Основным условием стабильности вычислительной системы является необходимость поддерживать определенную скорость адаптации.

Итак, подводя итог психологическим аспектам, мы можем констатировать, что для реализации системы управления адаптивным процессом обучения необходимо наличие двух факторов: во-первых, метода измерения скорости адаптации оператора для регулирования разнообразия стимульной последовательности и, во-вторых, метода организации этого разнообразия.

При целенаправленной адаптации, когда оператором выполняются условия предпочтения и готовности, оказывается возможным и использовать скорость изменения критерия правильного ответа в качестве индекса скорости адаптации, и идентифицировать варьирование степени упрощения с варьированием разнообразия стимульной последовательности.

В нашей адаптивной системе варьирование разнообразия осуществлялось изменением не только степени упрощения, но и вероятностной структуры стимульной последовательности. Это объясняется тем, что никакая среда, требующая одного-единственного способа решения задачи, не будет бесконечно адекватной. И так как в любом случае навык состоит из нескольких различных поднавыков, которые необходимо повторять, упрощение единственного типа задачи нельзя считать достаточно стабилизирующей процедурой — оно должно быть дополнено дальнейшим процессом, изменяющим тренируемый навык. Наконец, когда разнообразие всех n поднавыков исчерпывается, даже такая стабилизирующая процедура становится неэффективной. Вот почему конечное состояние адаптивной обучающей машины, как это на первый взгляд ни парадоксально, нестабильно.

Перед тем как описать механизм, реализующий стратегии субконтроллеров, ответственных за адаптивное формирование того или иного поднавыка, а также общего контроллера, ответственного за выбор того или иного субконтроллера, сделаем несколько определений относительно функционирования УУ-модели, которые лежат в основе структуры механизма управления.

1. Условием УУ-модели для самоорганизующейся системы будет поддержание определенной скорости целенаправленной адаптации, скажем, $\Delta\sigma_i > 0$, где $\sigma_i = \sigma_{i\mu}$ независимо от значения упрощения μ и где $\Delta\sigma_i(t) = [\sigma_i(t) - \sigma_i(t-\tau)]/\tau$ — это конечная разность на интервале τ (рис. 1).

В нашей адаптивной системе $\Delta\sigma_i(t) = [K_{\text{гэд}i}(t) - K_{\text{гэд}i}(t-\tau)]/\tau$, т.е. скорость целенаправленной адаптации связана со скоростью изменения коэффициента готовности к экстренному действию ($K_{\text{гэд}}$) [9].

2. Границы L и M (см. рис. 1) представляют собой индексы стабильного состояния УУ-модели (L есть точка перегрузки, а ниже M, точки недогрузки, происходит адаптация, отличная от релевантной).

В соответствии с УУ-моделью можно подсчитать меры информационного типа по К. Шеннону

$$H_i = -\sum_x p(y^+|x)\log p(y^+|x) \to -\sigma_i \log\sigma_i$$

и заявить, что поддержание $-\Delta H_i > 0$ есть условие УУ-модели для самоорганизующейся системы.

3. В силу перегрузки, ведущей к ошибочным ответам и быстрому снижению значения $\Delta\sigma_i$, связь между $\Delta\sigma_i$ и μ в данный момент t выражается в виде графика (см. рис. 1).

Очевидно, что точная связь, представленная на рис. 1, непрерывно изменяется по мере обучения оператора, но разрывность в L остается характерной до тех пор, пока навык не будет полностью усвоен (т.е. пока даже неупрощенным задачам не удается вызывать ошибочные ответы).

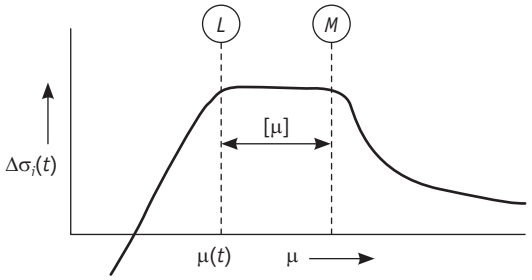


Рис. 1. **Зависимость скорости целенаправленной адаптации $\Delta\sigma_i$ от величины упрощения μ**

Структура механизма управления показана на рис. 2 (все отмеченные блоки представляют собой программные модули, i принимает значение $i = 1,2,3\ldots n$). Она состоит из вычислительного модуля и модуля сравнения, которые оценивают σ_i и $\Delta\sigma_i$; набора из n определенных элементов — субконтроллеров (в нашей адаптивной системе $n = 5$), ответственных за стабилизацию связи, когда данный поднавык уже выбран для повторения программным модулем, называемым общим контроллером. Последний осуществляет выбор из набора, состоящего из n субконтроллеров (в нашей адаптивной системе — из пяти субконтроллеров, т.е. из пяти поднавыков).

Так как предполагается, что порядок, в котором предъявляются стимулы, соответствующие задачам данного типа (обусловленные данным поднавыком), является несущественным, режим обучения может быть получен из предопределенной и произвольной последовательности $x_0^* \subset X^*$, причем любой член $x^* \in x_0^*$ появляется вскоре после ответа, и x^* отстоят друг от друга не более чем на Δt. Выбор значения i сводит эту последовательность к $x^* \subset X_i^*$, i-й субконтроллер упрощает эту последовательность путем изменения значения μ таким образом, чтобы получить $x = \phi_{i\mu}(x^*) \subset X_{i\mu}$ на выходе.

В нашей адаптивной системе количество упрощений μ в каждой последовательности $x \subset X_i^*$ равно 10, т.е. время экспозиции, яркость помех, размер цели имеют десять градаций.

Вероятностная структура стимульной последовательности отражает реальные ситуации, с которыми приходится иметь дело машинисту электровоза, — от маловероятных до высоковероятных. Эта вероятностная структура тоже определяет и число поднавыков, и соответственно число субконтроллеров.

Рассмотрим, в чем заключается стабилизирующая стратегия субконтроллера.

Предположим, что выбран i-й субконтроллер. Он получает на входе $\Delta\sigma_i$ и выдает на выходе величину упрощения μ. Для того чтобы поддерживать стабильную систему связи, он должен удовлетворять условию для самоорганизующейся системы, сформулированному для УУ-модели: подобрать такое значение μ, чтобы сохранялось $\Delta\sigma_i > 0$. Или, говоря в терминах ИИ-модели, обеспечить последовательность задачи, которая, будучи корректной, достаточно разнообразна, чтобы поддержать активный процесс обучения.

При условии, что существует связь вида, представленного на рис. 1, требуемое значение μ лежит в области $[\mu]$. Но, как уже было сказано, форма кривой на рис. 1 изменяется по мере обучения оператора. Поэтому субконтроллер должен оценить изменения $\Delta\sigma_i$ в результате изменения значения μ.

Изложенные выше соображения могут быть положены в основу построения адаптивных транспортных тренажеров.

В заключение отметим преимущества, которые дает использование адаптивных систем по сравнению с традиционным обучением и которые нашли подтверждение в нашей экспериментальной работе. Во-первых, снижение (двукратное) времени формирования навыка. Во-вторых, более высокая прочность навыка. В-третьих, прочное формирование всех поднавыков, входящих в структурированный навык. В-четвертых, большая устойчивость обучаемых к произвольным возмущениям в ситуациях, требующих обработки поступающей информации. Это обстоятельство мы выяснили в специальном эксперименте, когда, объявив испытуемым одну вероятностную структуру стимульной последовательности, на самом деле предъявили другую, т.е. ввели ложную информацию.

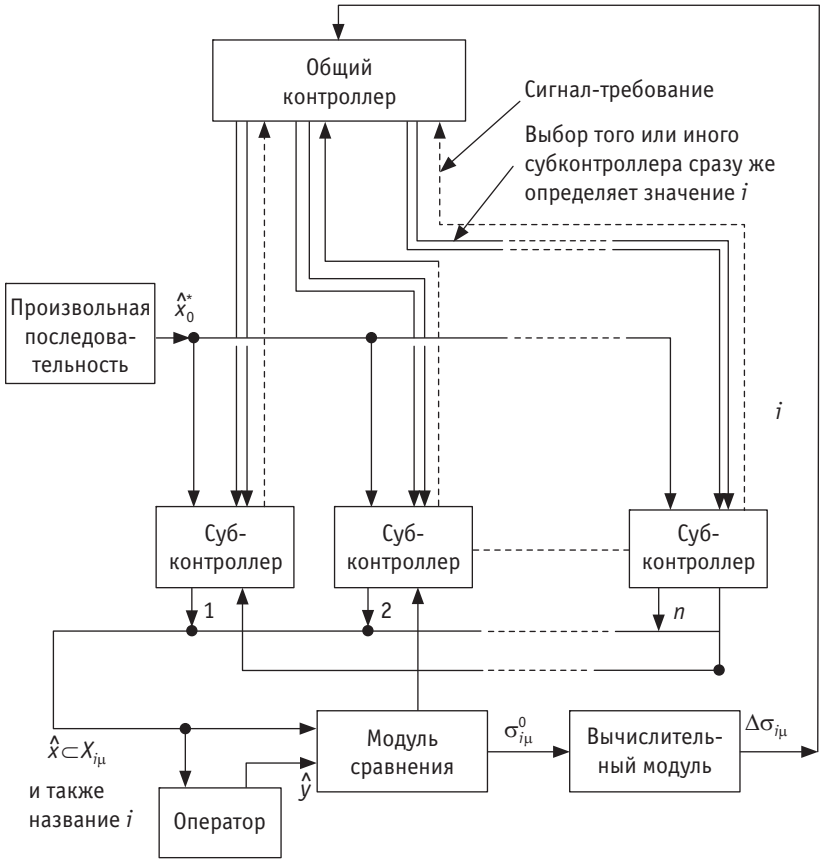


Рис. 2. **Структурная схема механизма управления адаптивной обучающей системы**

Литература

1. Воронин В. М. Современная инженерная психология на железнодорожном транспорте. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2011. 280 с.
2. Сергеев С. Ф. Новые технологии в образовании // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 6 (76). С. 118–123. ISSN 2226-1494.
3. Денисов В. Г., Онищенко В. Ф., Скрипец А. В. Авиационная инженерная психология. М. : Машиностроение, 1977. 216 с.
4. Малашинин И. И., Сидорова И. И. Тренажеры для операторов АЭС. М. : Атомиздат, 1979. 152 с.
5. Pask G. Teaching as a control — engineering process // Control. 1965. No. 1–4.
6. New Cybernetics (Gordon Pask) [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/New_Cybernetics_(Gordon_Pask) (дата обращения: 01.10.2016).
7. Воронин В. М., Наседкина З. А. Психология и педагогика : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 512 с.
8. Нерсесян Л. С., Конопкин О. А. Инженерная психология и проблема надежности машиниста. М. : Транспорт, 1978. 239 с.
9. Воронин В. М., Наседкина З. А. Когнитивная наука и ее приложения // Вестник УрГУПС. 2013. № 1 (17). С. 104–116. ISSN 2079-0392.
10. Воронин В. М., Наседкина З. А. Перспективные приложения когнитивной науки // Вестник УрГУПС. 2014. № 1 (21). С. 41–55. ISSN 2079-0392.

References

1. Voronin V. M. Sovremennaya inzhenernaya psikhologiya na zheleznodorozhnom transporte [Modern engineering psychology on railways transport]. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2011. 280 s.
2. Sergeyev S. F. Novye tekhnologii v obrazovanii [New technologies in education] // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2011. № 6 (76). S. 118-123. ISSN 2226-1494.
3. Denisov V. G., Onishhenko V. F., Skripets A. V. Aviacionnaya inzhenernaya psikhologiya [Aviation engineering psychology]. M. : Mashinostroenie, 1977. 216 s.
4. Malashinin I. I., Sidorova I. I. Trenazhyory dlya operatorov AES [Operator traning stimulators for NPPs]. M. : Atomizdat, 1979. 152 s.
5. Pask G. Teaching as a control — engineering process // Control. 1965. No. 1–4.
6. New Cybernetics (Gordon Pask) [Electronic resource]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/New_Cybernetics_(Gordon_Pask) (date access: 01.10.2016).
7. Voronin V. M., Nasedkina Z. A. Psikhologiya i pedagogika : ucheb. posobie [Psychology and pedagogics : textbook]. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2014. 512 s.
8. Nersesyan L. S., Konopkin O. A. Inzhenernaya psikhologiya i problema nadyozhnosti mashinista [Engineering psychology and train driver reliability problem]. M. : Transport, 1978. 239 s.
9. Voronin V. M., Nasedkina Z. A. Kognitivnaya nauka i eyo prilozheniya [Cognitive science and its applications] // Vestnik UrGUPS. 2013. № 1 (17). S. 104-116. ISSN 2079-0392.
10. Voronin V. M., Nasedkina Z. A. Perspektivnye prilozheniya kognitivnoj nauki [Prospective applications of cognitive sciences] // Vestnik UrGUPS. 2014. № 1 (21). S. 41-55. ISSN 2079-0392.

УДК 662.613.11:553.985

**Василий Евгеньевич Кошкаров, директор ООО «НИЦ Асфальтит», Екатеринбург, Россия,
Дмитрий Германович Неволин, доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Евгений Васильевич Кошкаров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Святослав Евгеньевич Бурмистров, кандидат технических наук, директор ООО «Полибонд», Москва, Россия**

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЯ ПРИ ЕГО ПЕРЕВОЗКАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

**Vasily Evgenyevich Koshkarov, Head of «Asphaltite R&DE» LLC, Ekaterinburg, Russia,
Dmitriy Germanovich Nevolin, DSc in Engineering, Professor, Head of Design and Operation of Automobiles Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Evgeniy Vasiliyevich Koshkarov, PhD in Engineering, Associate Professor, World Economy and Logistics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg Russia,
Svyatoslav Evgenyevich Burmistrov, PhD in Engineering, Head of «Polybond» LLC, Moscow, Russia**

Organization and technical aspects of coal surface dedusting during railway transporting

Аннотация

Организационно-технологические особенности обеспыливания поверхности угля направлены на снижение потерь при его перевозках железнодорожным транспортом и на разработку способов защиты от ветровой эрозии насыпи угля (шапки полувагонов). В статье дан анализ существующих методов борьбы против ветровой эрозии угля с полувагонов и предложены новые профилактические эмульсии для обеспыливания углей.

Ключевые слова: организация производства, технологические особенности, перевозка угля, обеспыливание, железнодорожный транспорт.

Summary

The organization and technological aspects of coal surface dedusting are concerned with decreasing losses during its coal pile via railways and with the development of wind erosion protection methods of the coal pile (cap of the gondola-type cars). The article analyses the existing methods of countering wind erosion of the coal from gondola cars and new preventive emulsions for coals dedusting are proposed.

Keywords: production organization, technological specifics, coal transport, dedusting, railway transport.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-33-40

Транспортирование угля в полувагонах открытым способом занимает ведущее место в России, так как обеспечивает большие масштабы и объемы грузоперевозок, способствует эффективному функционированию и динамичному развитию угольной отрасли.

Мировая добыча угля развивается в двух противоположных направлениях. С одной стороны, в США и развитых странах ЕС угледобыча постепенно сокращается. По прогнозам, падение добычи угля к 2025 г. в США может достичь 20 % [1], что в первую очередь связано с низкой рентабельностью шахт и низкими ценами на природный газ. В Европе добыча угля сокращается из-за высокой стоимости, а также из-за негативного влияния угольных предприятий на экологию.

С другой стороны, страны Юго-Восточной Азии демонстрируют значительный рост угледобычи [2], что обусловлено экономическим подъемом в этом регионе. Например, в КНР 70 % электроэнергии вырабатывается на угольных ТЭС. Для того чтобы обеспечить промышленность необходимым количеством электроэнергии, Китай увеличил добычу угля по сравнению с 2000 г. в 2,45 раза, Индия — в 1,8 раза, Индонезия — в 4,7 раза. Добыча угля в России по сравнению с 2000 г. увеличилась на 25 %.

Наряду с физическими потерями угля, обусловленными несовершенством погрузочно-разгрузочных машин и механизмов, внутритранспортных средств и складов хранения, возникают химические потери при окислении угля кислородом воздуха. Эти потери зависят от происхождения углей, петрографического состава и физико-химических свойств [3].

e-mail: sntp_nauka@list.ru, innotrans@mail.ru, EKoshkarov@usurt.ru
Дата поступления: 30.11.2016

В отечественной практике приняты нормы естественной убыли угля [4] при его транспортировании железнодорожным и автомобильным транспортом, а также при хранении и разгрузке, которые в среднем для различных классов углей составляют, % мас.: 0,05–0,2 — при разгрузке и операциях на складе; 0,15–0,35 — при временном хранении в течение года; 0,45–0,8 — при транспортировании на расстояние до 2000 км.

Открытый способ перевозки угля способствует его естественной убыли, вызываемой ветровой эрозией шапки груженого полувагона при движении. Побочные факторы при этом — загрязнение верхнего строения пути угольной пылью и ухудшение экологии придорожного пространства.

Загрязнение щебеночного основания верхнего строения пути характеризуется образованием на поверхности минерального зерна углеродистой пленки из угольной пыли. Угольная пленка обладает свойством скольжения в остове балластного слоя. Существует методика расчета загрязнения балластного слоя тонкодисперсными частицами и технология его устранения, осуществляемая при среднем ремонте пути (восстановление балластного слоя) [5].

На диаграмме (рис. 1) представлены потери угольной пыли при транспортировании в полувагонах, полученные опытным путем [6].

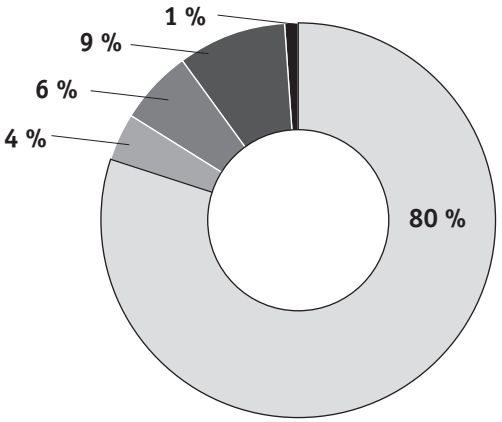


Рис. 1. **Распределение потерь угольной пыли:**
□ (80 %) — с шапки открытого полувагона; ▒ (4 %) — при перегрузке; ▒ (6 %) — просыпь из щелей разгрузочных люков; ■ (9 %) — просыпь в зазорах вагонов; ■ (1 %) — остаток в разгруженных вагонах

В связи со значительными потерями, вызванными пылением углей в процессе транспортирования, разработка технологии их обеспыливания при открытой перевозке в полувагонах представляет актуальную задачу для железнодорожного транспорта. Несмотря на большой объем и достигнутые успехи в исследовании процессов обеспыливания углей, до настоящего времени не предложено комплексного (эффективного, экономичного и экологически безопасного) способа обеспыливания шапки полувагонов.

На рис. 2 представлена блок-схема технологий профилактики пылеобразования и создания защитных пленок реагентов на поверхности углей при транспортировании и хранении открытым способом.



Рис. 2. **Схема принципиальных технологий для обеспыливания углей при транспортировании и хранении открытым способом**

К механическим способам профилактики пылеобразования на открытых складах относятся специальные закрытые контейнеры, бункеры и устройства механического транспортирования угольных масс при перемещении на складе и погрузке в транспортные средства. Эффективной мерой механической защиты от пыления и ветровой эрозии служит укрытие скоплений угля синтетическими тканными материалами, брезентовыми пологами, что целесообразно при перевозках автотранспортом и в открытых полувагонах. К механическим способам также относятся вентилирование и местное улавливание угольной пыли в зоне производства работ по перевалке, погрузке-выгрузке угля, в том числе с применением легкого орошения набрызгом.

Кроме того, механические способы включают такие мероприятия, как оптимальная организация и планирование участков работ по закладке и перемещению штабелей, правильная расстановка техники в плане и на отметках, выполнение погрузочно-разгрузочных работ с минимальным пылением, измельчением и перевалкой угля, ведение наблюдений за состоянием склада, оптимизация перемещения техники и транспортных средств.

Физико-химические способы профилактики пылеобразования — это прежде всего организация профилактического орошения поверхности и временного связывания за счет смачивания капиллярных сил частиц пыли с образованием пленок и корки из реагентов различной консистенции. Применяются как простые профилактические реагенты (вода, растворы солей), так и сложные (ионогенные и неионогенные ПАВ, лигносульфонаты, сода, карбонаты, суспензии, глинистые растворы), которые создают более долговечную пленку и более долговременное поверхностное покрытие, чем вода и слабые растворы солей. Недостатком таких материалов является загрязнение угля химическими, минеральными веществами (понижение теплотворной способности) и отсутствие долговременной защиты.

Реагенты должны смачивать поверхность угля при напылении. На рис. 3 представлен аппарат для оценки смачиваемости угольной пыли жидким реагентом (тест Уолкера) [7]. Градуировочная шкала показывает степень смачиваемости загруженного сыпучего угольного материала.

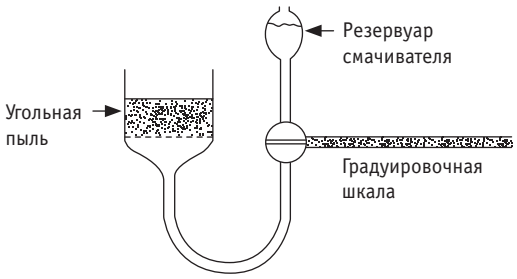


***Рис. 3*. Принципиальная схема прибора для определения смачиваемости угольной пыли обеспыливающими реагентами**

К числу применяемых материалов относятся также органические связующие вещества (преимущественно на нефтяной основе), содержащие в своем составе масла, смолы и асфальтены и образующие долговременный защитный слой, который предотвращает пылеобразование, окисление, потерю теплотворной способности угля. Это растворы битумов, хлопковых гудронов, а также профилактические средства по типу Универсин-А.

Целесообразно использование специальных профилактических веществ на основе тяжелых нефтяных остатков (ТНО), применяемых в эмульгированном виде в холодном состоянии. Дисперсионной средой углеводородных эмульсий профилактических средств является водная фаза, дисперсной фазой — капли нефтяного смолисто-асфальтенового вещества (САВ). После распада эмульсии из САВ формируется защитный слой в виде долговременного пленочного покрытия.

Альтернативой связующим нефтяного происхождения выступают различные полимерные и латексные пленкообразующие составы, но их недостатками являются дефицитность, высокая стоимость и низкая рентабельность при транспортировании и хранении угля.

Комбинированные способы предусматривают применение специальных технических средств и станций для нанесения, пропитки и уплотнения связующего покрытия с целью долговременного хранения и транспортирования углеродистого материала. Например, при перевозке углей в зимний период запроектированы станции подготовки поверхностей вагонов и думпкаров для профилактики смерзаемости сыпучих грузов, в том числе углей, с применением профилактического средства «НИОГРИН» [8, 9].

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЕСПЫЛИВАЮЩИХ РЕАГЕНТОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ УГЛЯ ПРИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВАНИИ В ОТКРЫТЫХ ПОЛУВАГОНАХ

Все реагенты, применяемые для обеспыливания поверхности угля, в определенных концентрациях способствуют снижению пыли при транспортировании сыпучих материалов.

Сравнительные испытания сдува угольной пыли проводят в аэродинамической трубе [10] (рис. 4). Аэродинамическая труба разработана и используется в лаборатории исследования твердых сыпучих материалов TUNRA Associates (Ньюкасл).

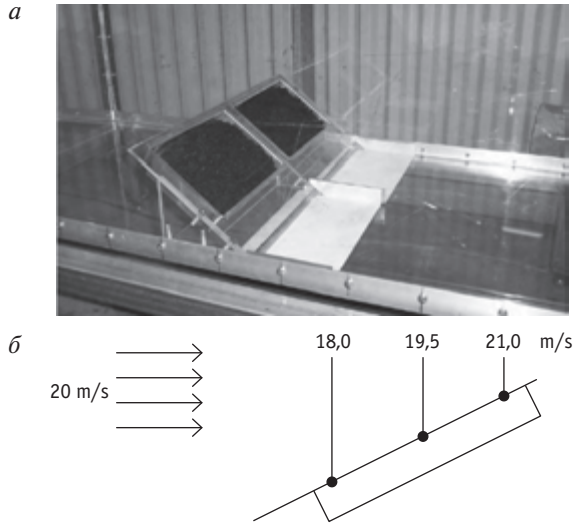


***Рис. 4*. Общий вид (*а*) и схема (*б*) лабораторного комплекса при проведении испытаний сдува угольной пыли в тоннеле TUNRA**

При достижении скорости ветра над поверхностью угля 20 м/с, сопоставимой с движением вагона (72 км/ч), начинается интенсивная потеря массы угля. Проведенные сопоставительные исследования пяти реагентов (от типа А к типу Е, табл. 1) показали, что применение всех реагентов существенно снижает сдув пыли угля с шапки полувагона.

Таблица 1

Результаты исследования сдува угольной пыли при транспортировании (скорость 72 км/ч) в зависимости от нанесенных обеспыливающих реагентов

Реагент и его дозировка	Время, ч	Сдув пыли, г	Температура, °С	Влажность, %
A, 3 %	8	8,11	27	55
B, 4 %	8	16,14	28	55
C, 3 %	8	462	23	76
D, 5 %	8	8,66	27	50
E, 6 %	8	13,47	28	55
Без обработки	1 мин	115	25	52

Максимальный разовый сдув пылевых частиц с поверхности угля может быть определен на основе удельной сдуваемости (табл. 2), значение которой соответствует максимальному значению выноса пылевых частиц для данной скорости ветра.

Таблица 2

Удельный сдув частиц угля с поверхности материала (воздушно-сухой материал — кузнецкий уголь СС) [11]

Скорость ветра, м/с	2	3	5	7	10	15
Удельный сдув, г/(м^2·с)	—	0,0013	0,05	0,93	2,97	24,4

В результате ветрового воздействия потери угля представлены в основном частицами менее 1 мм. Частицы свыше 1 мм при небольших скоростях ветра перемещаются на подстилающую поверхность в непосредственной близости от мест уноса, не создавая загрязнения воздушного бассейна и потерь при транспортировании. Для закрепления частиц менее 1 мм необходимо применение обеспыливающих реагентов и эффективных методов их нанесения на пылящую поверхность. Такой выбор должен осуществляться на основе технико-экономического обоснования.

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ ЭМУЛЬСИЙ ДЛЯ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЯ С ЦЕЛЬЮ ЗАЩИТЫ ОТ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ В ОТКРЫТЫХ ПОЛУВАГОНАХ

Новым направлением производства углеводородного пленочного покрытия может стать использование тяжелых нефтяных остатков: асфальтов пропановой деасфальтизации (АПД) масляного производства, крекинг-остатков (КО) и их вакуумных концентратов (ВККО), смол пиролиза с высокой адгезионной способностью. Ниже приведены результаты лабораторных и опытно-промышленных испытаний по производству битумных эмульсий и эмульсий из ТНО, которые содержат клеящие углеводородные связующие вещества для закрепления угольных поверхностей.

Лабораторные исследования по получению углеводородных пленочных покрытий проводили в ВУХИНе [12]. Исходным сырьем для опытов были технологические угли марок ССР, КСР Кузбасского месторождения (табл. 3).

Таблица 3

Характеристика угольных проб Кузбасского месторождения

Сорто-марка	Месторождение	Характеристика углей			Пластометрические показатели	
		W_t	A_d	V_{daf}	X	Y
ССР	Краснобродский разрез, Макарьевский пласт	5,6	7,8	21,0	32	8
КСР	Краснобродский разрез, Прокопьевский пласт	7,6	6,6	21,3	30	7

В лабораторных опытах смоделированы условия пленочного покрытия на поверхности угля. В опытно-промышленных условиях изготовлены партии углеводородных эмульсий из тяжелых нефтяных остатков — КО, АПД нефтеперерабатывающих заводов АНК «БАШнефть» и ОАО «НОВОЙЛ». В качестве пластификатора использован гудрон. Физико-химические свойства КО, АПД и гудрона приведены в табл. 4, характеристики и качественные показатели эмульсий — в табл. 5 и 6.

Опытно-промышленные партии углеводородных эмульсий получены на битумно-эмульсионной установке (БЭУ) периодического типа действия марки «ЛаПРОМ Л» производства «Давиал Механик» на базе «Уралхимпласт-Амдор» (Нижний Тагил) [13].

Таблица 4

Физико-химические свойства тяжелых нефтяных остатков

Показатель	КО	АПД	Гудрон
Плотность, кг/м^3	982	998	1010
Вязкость условная при 100 °С, °ВУ	4,56	Не течет	Не течет
Температура застывания, °С	+9	—	—
$T_р$ по КиШ, °С	—	44	42
Содержание серы, %	2,7	4,9	2,6
Температура вспышки, °С	154	280	310
Температура начала кипения, °С	238	380	400
Групповой углеводородный состав, %:			
масла	67,2	67,3	62,0
смолы	22,8	23,4	28,1
асфальтены	9,8	9,1	9,8

Таблица 5

Характеристики углеводородных эмульсий

№	Тип (ТУ) эмульгатора	Состав эмульсий, %			pH водной фазы	Температура, °С		Расход, л/ч	
		у.в.с.	в.ф.	эмульгатор		у.в.с.	в.ф.	у.в.с.	в.ф.
1	АМДОР-ЭМ	57	40	2	2,29	146,7	45,5	310	200
2	АМДОР-ЭМ	57	40	2	2,29	142,0	47,7	310	200

Примечание. Порядковые номера эмульсий соответствуют связующим веществам из ТНО: 1 — крекинг-остаток с установки ТК-3; 2 — промпродукт асфальто-пропановой деасфальтизации гудрона с установки масляного блока ПД 36/1.

Таблица 6

Качественные показатели углеводородных эмульсий

№	Тип связующего	$T_р$ по КиШ связующего, °С	Остаток на сите № 014, %	Условная вязкость с диаметром трубки			Хранение эмульсии по остатку на сите № 014, %	
				3 мм	4 мм	5 мм	7 сут	30 сут
1	АПД	38	0,03	11,82	7,86	3,5	0,06	0,21
2	КО	53,5	0,14	23,46	15,48	5,98	0,23	0,7

Разогретое углеводородное связующее (у.в.с.) сливали в «битумную» емкость и разогревали до температуры, обеспечивающей свободную подачу связующего в диспергатор. В подогретую до температуры 45–47 °С подкисленную концентрированной HCl водную фазу (в.ф.) вводили эмульгатор согласно принятой рецептуре. Водный раствор перемешивали с помощью циркуляционного насоса в течение 5 мин, после чего отбирали пробу на pH, значения которого должны находиться в пределах 2,0–2,4.

В качестве катионоактивного эмульгатора для приготовления опытных партий углеводородных эмульсий использовали эмульгатор марки «АМДОР-ЭМ» производства ООО «Уралхимпласт-Амдор». Концентрация соляной кислоты HCl определялась в соответствии с п. 3 (подпункт «в») ВСН 115–75 «Приготовление дорожных эмульсий» pH-метром марки И160МИ для определения водородного показателя водной фазы эмульсии (pH) с точностью не ниже 0,01 единицы.

Лабораторные исследования по получению пленочных покрытий для связывания поверхности углей осуществлялись по методике, описанной ниже.

Поверхностный слой лабораторных штабелей формировали в пластмассовых ванночках. Ванну заполняли без уплотнения штабеля. Для снижения влияния поверхностного напряжения пластмассовых стенок на внутрипленочное напряжение в адсорбционной системе «адгезив (углеводородное связующее) — субстрат (угольный наполнитель)» изготавливали угольные валки на поверхности штабеля в местах соприкосновения адгезива с пластмассовой стенкой. В опытах (рис. 5) использовали быстрораспадающиеся катионные эмульсии (КБ), отвечающие климатическим условиям Уральского региона.



Рис. 5. **Пленочное покрытие угля при нанесении пульверизатором эмульсии с оптимальным расходом**

С учетом модернизации технологии приема и хранения углей на предприятиях ТЭК и коксохимии при создании открытых промплощадок можно рекомендовать строительство эмульсионной установки для изготовления углеводородного покрытия поверхности штабелей. Комплексное решение таких задач позволит снизить физические и химические потери углей при хранении, повысить пластометрические показатели и спекаемость углей, обеспечить безопасность окружающей среды.

В лабораторных условиях установлена возможность получения укрупненных партий новых углеводородных эмульсий — связующих для пылеподавления и закрепления пылящих поверхностей углей, предотвращения потерь при ветровой эрозии угля при транспортировании в открытых полувагонах (табл. 7). Отметим, что разработанная технология и новые пылеподавляющие промпродукты [14] (углеводородные эмульсии на основе АПД и КО) могут использоваться в горнорудной промышленности в качестве покрытия угольных терриконов, рудных отвалов и в карьерах при обеспыливании автодорог.

Таблица 7

Влияние вида и расхода связующего на свойства поверхностных площадей и пленочных покрытий

Сорто-марка углей	Срок хранения	Пластометрия угля		Тип покрытия	Расход вяжущего, кг/м^2	Площадь покрытой поверхности от общей, %
		X	*Y*			
КСР	03.12/10.12	30	7	Пленка	2,0	97,13
ССР	03.12/10.12	32	8	Пленка	2,25	89,39
ССР	03.12/10.12	32	8	Паста	0,61	100

Примечание. В числителе — дата отбора пробы, в знаменателе — дата эксперимента.

В черной, цветной металлургии и в химической промышленности углеводородные эмульсии и пасты могут быть использованы при окусковании концентратов и оборотной пыли. Кроме того, они могут применяться в дорожном хозяйстве при строительстве и ремонте муниципальных и сельских грунтовых дорог [15].

ПОРТАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ШАПКИ ПОЛУВАГОНА

Портальные системы обеспыливания и рециркуляции воды предназначены для получения профилактических эмульсий, нанесения их на поверхность угля в груженом полувагоне, а также для организации оборотного водоснабжения на станциях.

В зависимости от требуемой скорости погрузки и подготовки к отправке груженых полувагонов необходим выбор систем обеспыливания с различной мощностью — от 5 до 20 т/ч профилактической эмульсии. Отличительным признаком рассматриваемой технологии обеспыливания шапки полувагона является возможность рециркуляции шлама и оборотной воды, вовлечение ее в процесс приготовления профилактической эмульсии (рис. 6).

В базовую комплектацию оборудования должны входить хранилище исходных материалов (битум, эмульгаторы), эмульсионная установка, емкость временного хранения эмульсии, установка оборотного водоснабжения, устройства дозирования реагента, аэрационный компрессор.

Установка оборотного водоснабжения (система отстойников, флокуляция и фильтрация) необходима для повышения экологических и санитарных норм при использовании портальной системы обеспыливания шапки полувагона, кроме того, она позволяет снизить расход воды на 10–20 %.

Портальная система обеспыливания сочетает в себе необходимый набор арок нанесения профилактических эмульсий и арок споласкивания. Состав протягивается через портальную систему с рекомендованной скоростью 1,5 км/ч. Предполагаемая комплектация рассчитана на ежедневное использование.

Аэрозольная подача профилактической эмульсии основана на принципе центробежного распыления жидкости с помощью специальных форсунок, которые работают за счет напора насоса, подающего эмульсию.

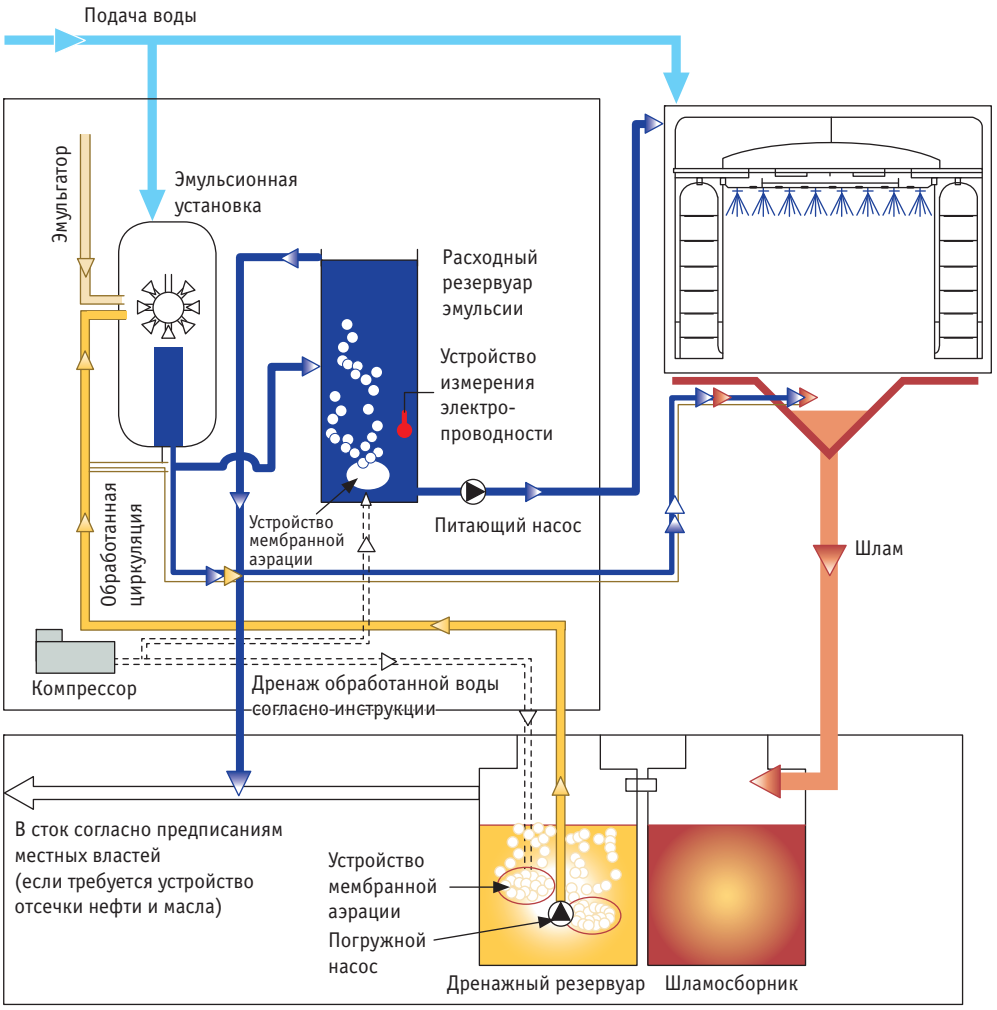


Рис. 6. **Принципиальная схема технологии обеспыливания шапки полувагона профилактическими эмульсиями**

В состав портала аэрозольной подачи профилактической эмульсии входят центробежный насос для подачи воды, насос-дозатор для подачи профилактической эмульсии, форсунки (3–4 шт.), трубчатый портал для крепления форсунок диаметром 40–50 мм. Конструкция форсунки (рис. 7) позволяет тонко распределять профилактическую эмульсию на поверхности угля при помощи конусообразного факела и покрывать полосу прохода шириной до 0,8 м.

После работы с профилактическими эмульсиями необходимо промывать форсуночное оборудование водой. Специального обслуживания форсуночные устройства не требуют. Для обеспечения их надежной работы на линии подачи профилактической эмульсии следует предусмотреть сетчатый фильтр с размером ячеек 1–1,5 мм.

Для приготовления и подачи профилактической эмульсии к форсункам может быть использован центробежно-вихревой насос типа ВК производительностью 2–3 м^3/ч с напором до 3 атм в сочетании с регулируемым насосом-дозатором типа НД-160–250.

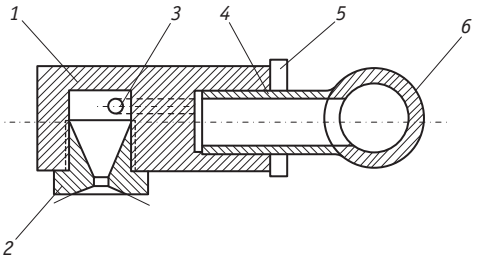


Рис. 7. **Конструкция аэрозольной форсунки для профилактической эмульсии:**
1 — корпус; *2* — сопло; *3* — тангенциальный канал; *4* — штуцер; *5* — контргайка; *6* — трубка подачи эмульсии

Система портального обеспыливания шапки полувагона позволяет проводить предварительное ополаскивание кузова, нанесение аэрозольным методом профилактической эмульсии, дополнительное увлажнение стенок кузова распыленной водой для предотвращения высыхания нанесенного раствора, ополаскивание стенок кузова вагона оборотной водой.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ШАПКИ ПОЛУВАГОНА ПРОФИЛАКТИЧЕСКИМИ ЭМУЛЬСИЯМИ

Результаты исследования сравнительных технико-экономических показателей мероприятий по обеспыливанию поверхности угля [16] приведены в табл. 8. Данные соответствуют III и IV дорожно-климатическим зонам, продолжительность обеспыливающего действия указана после первой обработки. В качестве сопоставительных технологий выбраны обеспыливающие материалы на водной основе, наносимые пневмонабрызгом (рис. 8) или самотеком, в связи с чем нормы расхода представлены при прочих равных условиях — разлив пылесвязующего реагента поливочным агрегатом (ПМ-130 или ДС-39Б) самотеком на поверхность покрытия.

При сравнении технико-экономических показателей установлено, что наибольшей эффективностью при борьбе с пылением обладает эмульсия (в концентрации 57 %) — она обеспечивает связывание вновь поступающих материалов (просыпей), уменьшение износа покрытия, капиллярного поднятия воды, уровня загрязнения атмосферы. Кроме того, ее использование позволяет за счет долговременного обеспыливающего действия снизить общие финансовые затраты на обработку в сравнении с обеспыливанием водой.



Рис. 8. **Подача обеспыливающего состава на поверхность шапки полувагона аэрозольным способом [17]**

В целом результаты лабораторных и полупромышленных исследований показали высокую эффективность применения эмульсии из ТНО для предотвращения уноса мелких частиц с поверхности шапки сыпучего угольного материала в полувагонах, что даст возможность исключить при транспортировании угля техногенное загрязнение атмосферы и почвы в районе железнодорожных путей и на прилегающей селитебной территории.

Таблица 8

Сравнительные технико-экономические показатели технологии обеспыливания поверхности угля различными реагентами

Обеспыливающий состав	Норма расхода, л/м^2	Срок обеспыливающего действия, сут	Расход на 1 м^2/сут	Цена, руб./л	Общая стоимость, руб./сут.·м^2
Вода	2,0	0,2	10,0	0,024	0,24
Хлористый кальций (ж)	2,1	20	0,105	15	1,58
Техническая сильвинитовая соль (ж)	3,3	15	0,22	7,0	1,54
Техническая поваренная соль (30 %)	3,0	15	0,20	8,0	1,60
Лигносульфонат (ЛСТ, 50 %)	1,5	20	0,075	18	1,35
Лигнодор (ж)	1,2	40	0,03	21	0,63
Сульфитный щелок (10 %)	5,0	20	0,25	3,6	0,9
Жидкие битумы*	0,9	45	0,02	19	0,38
Сырые нефти*	1,0	45	0,022	23	0,51
Эмульсия из ТНО (57 %)	0,5	30	0,016	14	0,22

*Органические материалы (жидкие битумы и сырые нефти) применяют при их разжижении (дизельное топливо), обеспечивающем вязкость по стандартному вискозиметру не более 25 с.

Литература

1. A sustainable future in management of dust emission from coal terminals [Электронный ресурс]. URL: http://www.nqbp.com.au/wp-content/uploads/2015/11/Hay-Point-Dust-Factsheet2b.pdf (дата обращения: 12.10.2016).
2. Environmental evaluation of fugitive coal dust emissions from coal trains. Queensland Government Environmental Protection Agency Report, 2008
3. Русьянова Н. Д. Углехимия. М. : Наука, 2003. 316 с.
4. Нормы естественной убыли антрацитов, каменных и бурых углей и брикетов из каменных и бурых углей при хранении, разгрузке и перевозках : постановление Госснаба СССР от 11.08.1987 г. № 109 в ред. от 29.03.1989 г. № 21.
5. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь : учеб. М. : Транспорт, 1969. 536 с.
6. Снижение потерь угля при его транспортировании в открытых полувагонах и при хранении на открытых складах методом обеспыливания поверхности угля : отчет о НИР / ООО НИЦ «Асфальтит». Екатеринбург, 2016. 82 с.
7. Mody V., Jakhete R. Dust Control Handbook, 1989.
8. Валиев Н. Г. Разработка технологии закрепления пылящих поверхностей отвальных угольных разрезов : дис. … канд. техн. наук. Екатеринбург : УГГУ, 1994.
9. Борьба с пылеобразованием на карьерных автодорогах нефтяными вяжущими / А. П. Зиновьев, А. Н. Купин, П. Л. Ольков и др. Уфа : Башк. кн. изд-во, 1990. 96 с.
10. Report of the task force of fine particulate / Economic commission for Europe. Seminar of fine particulates. Villach, Austria, October, 1977.
11. Скопин А. Н. Связывание пыли экологически безопасными составами веществ на открытых пылящих поверхностях угледобывающих предприятий : автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 1993.
12. Кошкаров В. Е., Ахметов А. Ф., Еремин А. Я. Разработка технологии профилактики пылеобразования карьерных автодорог и хвостохранилищ углеводородными эмульсиями // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск, 2014. С. 22–26.
13. Кошкаров В. Е., Валиев Н. Г. Опыт и перспективы применения битумных эмульсий при строительстве и эксплуатации карьерных дорог // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 5. С. 13–20. ISSN 0536-1028.
14. Демченко И. И. Научное обоснование и разработка комплекса средств механизации для обеспечения качества углепродукции : дис. … д-ра техн. наук. Красноярск, 2009.
15. Encyclopedia of Industrial Chemistry: Coal / Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2012.
16. Эмульсионные профилактические средства из тяжелых нефтяных остатков для обеспыливания карьерных автодорог и техногенных отвалов / Н. Г. Валиев, Д. И. Симисинов, В. Е. Кошкаров, А. Ф. Ахметов // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 8. С. 13–21. ISSN 0536-1028.
17. Blazek Ch. F. Fugitive Particulate Control Technologies for Bulk Material Handling Sources // Handbook of Clean Energy Systems, 2015.

References

1. A sustainable future in management of dust emission from coal terminals [Electronic resource]. URL: http://www.nqbp.com.au/wp-content/uploads/2015/11/Hay-Point-Dust-Factsheet2b.pdf (date accsess: 12.10.2016).
2. Environmental evaluation of fugitive coal dust emissions from coal trains. Queensland Government Environmental Protection Agency Report, 2008.
3. Rusyanova N. D. Uglekhimiya [Coal chemistry]. M. : Nauka, 2003. 316 s.
4. Normy estestvennoy ubyli antracitov, kamennykh i burykh uglej i briketov iz kamennykh i burykh uglej pri khranenii, razgruzke i perevozkakh : postanovlenie Gossnaba SSSR ot 11.08.1987 g. № 109 v red. ot 29.03.1989 g. № 21 [Norms of natural loss of anthracites, coal and lignite, moulded coal and lignite during storage, unloading and transport : Order of USSR Gossnab of 11.08.1987 No. 109, rev. of 29.03.1989 No. 21].
5. Shakhunyants G. M. Zheleznodorozhnyj put : ucheb. [Railway track : a textbook]. M. : Transport, 1969. 536 s.
6. Snizhenie poter uglya pri ego transportirovanii v otkrytykh poluvagonakh i pri khranenii na otkrytykh skladakh metodom obespylivaniya poverkhnosti uglya : otchet o NIR / OOO NITs «Asfaltit» [Decreasing the losses of coal during open gondola car transporting and open storage by the coal surface dedusting method : report of «Asphaltite» R&DE research activities]. Ekaterinburg, 2016. 82 s.
7. Mody V., Jakhete R. Dust Control Handbook, 1989.
8. Valiev N. G. Razrabotka tekhnologii zakrepleniya pylyashhikh poverkhnostej otvalnykh ugolnykh razrezov : dis. … kand. tekhn. nauk [Development of a technology for fixing the dust-producing surfaces of coal strip mines : PhD in Engineering Thesis]. Ekaterinburg : UGGU, 1994.
9. Borba s pyleobrazovaniem na karyernykh avtodorogakh neftyanymi vyazhushhimi / A. P. Zinovyev, A. N. Kupin, P. L. Olkov i dr. [Combating dust formation on strip mine roads using oil-based binder substances]. Ufa : Bashk. kn. izd-vo, 1990. 96 s.
10. Report of the task force of fine particulate / Economic commission for Europe. Seminar of fine particulates. Villach, Austria, October, 1977.
11. Skopin A. N. Svyazyvanie pyli ekologicheski bezopasnymi sostavami veshhestv na otkrytykh pylyashhikh poverkhnostyakh ugledobyvayushhikh predpriyatij : avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk [Binding dust by ecologically safe compounds on the open dust-producting surfaces of coal mining enterprises : Synopsis of PhD in Engineering Thesis]. M., 1993.
12. Koshkarov V. E., Akhmetov A. F., Eremin A. Ya. Razrabotka tekhnologii profilaktiki pyleobrazovaniya karyernykh avtodorog i khvostokhranilishh uglevodorodnymi emulsiyami [Development of a technology for preventing dust formation on strip mine roads and tailing dumps using hydrocarbon emulsions] // Aktualnye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya. Magnitogorsk, 2014. S. 22–26.
13. Koshkarov V. E., Valiev N. G. Opyt i perspektivy primeneniya bitumnykh emulsij pri stroitelstve i ekspluatacii karyernyh dorog [Experience and prospects of bitumen emulsions use during construction and operation of strip mine roads] // Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal. 2011. № 5. S. 13–20. ISSN 0536-1028.
14. Demchenko I. I. Nauchnoe obosnovanie i razrabotka kompleksa sredstv mekhanizacii dlya obespecheniya kachestva ugleprodukcii : dis. … d-ra tekhn. nauk [Scientific substantiation and development of a mechanization equipment suite for providing coal production quality : DSc in Engineering Thesis]. Krasnoyarsk, 2009.
15. Encyclopedia of Industrial Chemistry : Coal / Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2012.
16. Emulsionnye profilakticheskie sredstva iz tyazhyolykh neftyanykh ostatkov dlya obespylivaniya karyernykh avtodorog i otvalov tekhnogennykh otkhodov / N. G. Valiev, D. I. Simisinov, V. E. Koshkarov, A. F. Akhmetov [Emulsive preventives from black oil for dust removal at opencast automobile roads and technogenic wastes] // Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal. 2015. № 8. S. 13–21. ISSN 0536-1028.
17. Blazek Ch. F. Fugitive Particulate Control Technologies for Bulk Material Handling Sources // Handbook of Clean Energy Systems, 2015.

УДК 656.259.12

Антон Анатольевич Антонов, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II, МГУПС (МИИТ), Москва, Россия,
Михаил Евгеньевич Бакин, кандидат технических наук, Москва, Россия

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УРОВНЯ ГАРМОНИК ТЯГОВОГО ТОКА В РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЯХ БЕЗ ИЗОЛИРУЮЩИХ СТЫКОВ

Anton Anatolyevich Antonov, PhD in Engineering, Head of Automation, Telemechanics and Communication on Railway Transport Department, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia,
Mikhail Evgenyevich Bakin, PhD in Engineering, Moscow, Russia

The methodology of calculation of the level of traction current harmonics in the jointless track circuits

Аннотация

В статье рассмотрена методика, позволяющая оценить степень воздействия тягового тока в контактном проводе смежного пути без учета влияния тока, протекающего в контактном проводе рассматриваемого пути, на рельсовую цепь, не имеющую изолирующих стыков и расположенную в произвольном месте участка между тяговыми подстанциями.

Составлены схемы замещения рельсовой цепи в нормальном и контрольном режимах работы. Получены выражения для определения степени влияния гармоник тягового тока, способного оказывать мешающее воздействие на передающую и приемную аппаратуру рельсовой цепи.

Ключевые слова: математическое описание, рельсовая цепь, гармоника тягового тока, мешающее влияние, контактный провод смежного пути, тяговая подстанция.

Summary

The article describes the method of estimating the degree of influence of the traction current in the contact wire of an adjacent path, excluding the impact of the current flowing in the contact wire the pathway, on jointless track circuit located at an arbitrary position between traction substations in the normal and control modes.

Compiled track circuit equivalent circuit in the normal and control modes. The expressions to determine the degree of influence of traction current harmonics that can have disturbing effects on the transmission and reception of the track circuit equipment.

Keywords: mathematical description, track circuit, traction current harmonic, disturbing interferences, adjacent path contact wire, traction substation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-41-46

В связи с эксплуатацией современного электроподвижного состава актуален вопрос обеспечения помехоустойчивости приемников рельсовых цепей, проектирование которых должно выполняться с учетом мешающего влияния помех [1–7]. При расчете влияния гармоник тягового тока на рельсовую цепь последнюю можно представить в виде однопроводных взаимосвязанных электрических линий. Эти линии подвержены индуктивному воздействию тяговых токов, протекающих в контактных проводах как своего, так и смежного пути.

В рельсах любой точки участка рельсовой линии между тяговой подстанцией и электровозом величина тягового тока представляет собой сумму двух слагаемых. Первое из них не зависит от координаты рассматриваемой точки и является индуктированным током. Второе слагаемое определяется координатой рассматриваемой точки и убывает по мере удаления от электровоза [8].

Величину тока в рельсах и напряжение относительно земли в любой точке рельсовой линии между электровозом и тяговой подстанцией можно определить при помощи дифференциальных уравнений [9] на основе учета индуктивного влияния тяговых токов, протекающих в контактном проводе рассматриваемого и смежного пути [10, 11].

На участках между тяговыми подстанциями в условиях эксплуатации неизбежно возникает ситуация, когда движение электроподвижного состава по смежному относительно рассматриваемого пути не производится. В такой поездной обстановке может проявиться мешающее влияние тягового тока, протекающего в контактном проводе смежного пути, что выражается в ложной занятости его рельсовой цепи [12].

Чтобы оценить степень воздействия тягового тока в контактном проводе смежного пути без учета влияния тока, протекающего в контактном проводе рассматриваемого пути, на рельсовую цепь, не имеющую изолирующих стыков и расположенную в произвольном месте участка между тяговыми подстанциями (на расстоянии от тяговой подстанции), составим схему замещения рельсовой цепи в нормальном и контрольном режимах работы (рис. 1).

e-mail: ant-a-antonov@yandex.ru, msl87@mail.ru
Дата поступления: 17.10.2016

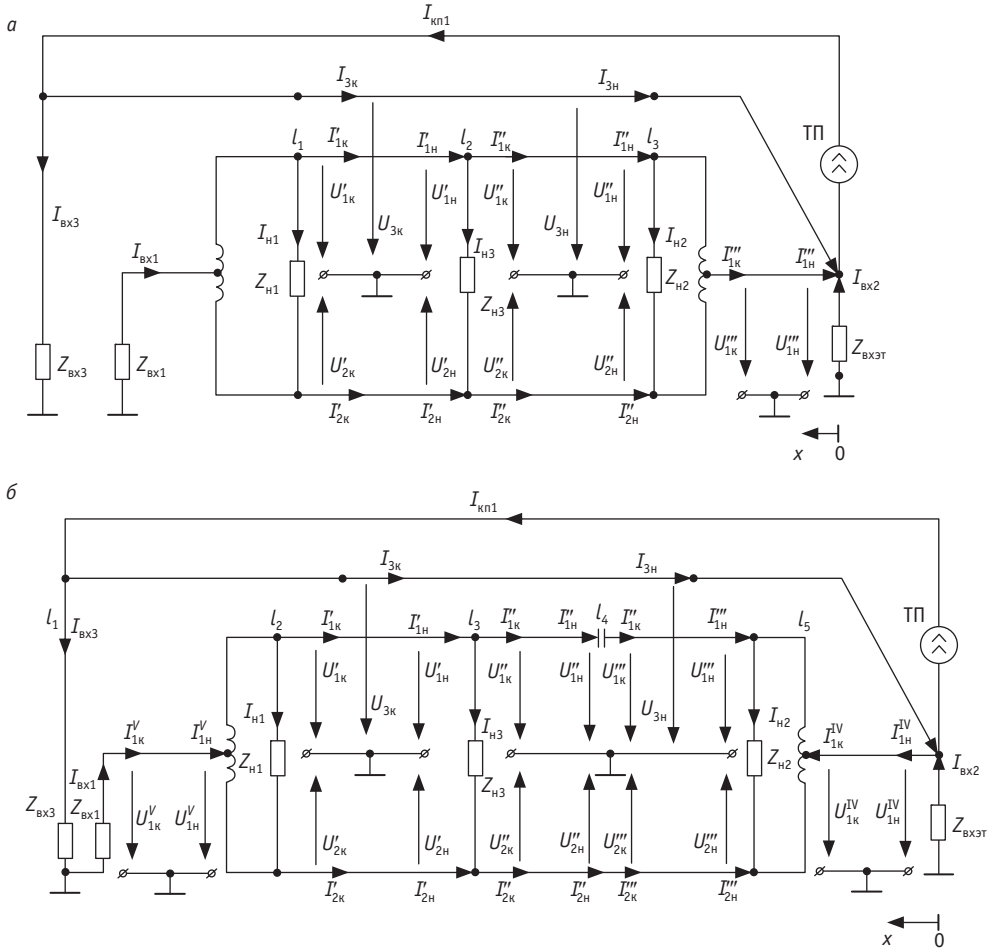


Рис. 1. **Схема замещения рельсовой цепи без изолирующих стыков, расположенной в произвольном месте участка между тяговыми подстанциями, в нормальном (*а*) и контрольном (*б*) режимах**

На рис. 1 используются следующие обозначения:

$Z_{вх1}$ — входное сопротивление, учитывающее влияние смежных рельсовых цепей и определяемое по формуле

$$Z_{вх1} = \frac{z_в}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2(z_1 + z_m)}{g_1 + g_2}},$$

где $z_в$ — волновое сопротивление рельсовой линии, z_1 — удельное сопротивление одиночного рельса, z_m — сопротивление взаимной индуктивности рельсовых нитей; g_1 и g_2 — удельная проводимость заземления рельсовых нитей;

ТП — тяговая подстанция;

$Z_{н1}$, $Z_{н2}$ — приведенное сопротивление аппаратуры приемников сигнала рельсовой цепи;

$Z_{н3}$ — приведенное сопротивление аппаратуры источника сигнала рельсовой цепи;

$Z_{вх3}$ — вводное сопротивление, учитывающее часть обратного тягового тока, попадающего в рельсовую линию из смежного пути;

$Z_{вхэт}$ — входное сопротивление, учитывающее совокупное влияние заземляющего контура тяговой подстанции и смежной рельсовой линии (рис. 2).

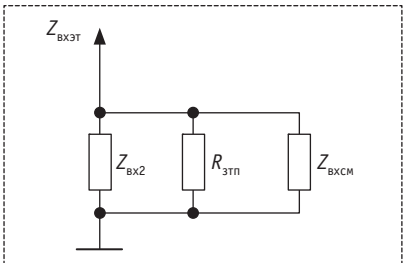


Рис. 2. **Элементы входного сопротивления $Z_{вхэт}$:**
$Z_{вх2}$ — входное сопротивление, учитывающее влияние смежных рельсовых цепей; $R_{зтп}$ — сопротивление заземляющего контура тяговой подстанции; $Z_{вхсм}$ — входное сопротивление, учитывающее влияние рельсовой цепи смежного пути

Для нормального режима работы граничные условия для определения постоянных интегрирования будут иметь вид:

$$\underline{x = l_3 + l_2;}$$

$$U'_{1н} = U''_{1к};$$

$$U'_{2н} = U''_{2к};$$

$$I'_{1н} + I'_{2н} - I''_{1к} - I''_{2к} = 0;$$

$$I'_{1н} - I''_{1к} - I'_{2н} + I''_{2к} - \frac{2(U'_{1н} - U'_{2н})}{Z_{н3}} = 0;$$

$$\underline{x = l_3 + l_2 + l_1;}$$

$$\frac{1}{2}(I'_{2к} - I'_{1к}) - \frac{U'_{1к} - U'_{2к}}{Z_{н1}} = 0;$$

$$U'_{1к} + U'_{2к} + 2(I'_{1к} + I'_{2к})Z_{вх1} = 0;$$

$$\frac{U_{3к}}{Z_{вх3}} + I_{3к} = I_{кп1};$$

$$\underline{x = l_3;}$$

$$I''_{1н} - I''_{2н} - \frac{2(U''_{1н} - U''_{2н})}{Z_{н2}} = 0;$$

$$U''_{1н} + U''_{2н} - 2U'''_{1к} = 0;$$

$$I''_{1н} + I''_{2н} - I'''_{1к} = 0;$$

$$\underline{x = 0;}$$

$$I'''_{1н} = I_{кп1} - I_{3н} + \frac{U'''_{1н}}{Z_{вхэт}};$$

$$U_{3н} = U'''_{1н}.$$

Если учитывать уравнения токов и напряжений вдоль рельсовой линии и влияние тягового тока, протекающего в контактном проводе смежного пути [13] при $z_1 = z_2 = z_p$, граничные условия будут иметь вид:

$$\underline{x = l_3 + l_2;}$$

$$\frac{(l_3 + l_2)(z_m^2 - z_p^2)}{z_m}(A'_1 - A''_1) + \frac{z_m sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2)}{\gamma_{оп}}(A'_2 - A''_2) +$$
$$+ \frac{z_m ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2)}{\gamma_{оп}}(A'_3 - A''_3) + A'_4 - A''_4 = 0; \quad (1)$$

$$sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2)(A'_2 - A''_2) + ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2)(A'_3 - A''_3) = 0; \quad (2)$$

$$\left(1 - \frac{z_p}{z_m}\right)(A'_1 - A''_1) + ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2)(A'_2 - A''_2) +$$
$$+ sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2)(A'_3 - A''_3) = 0; \quad (3)$$

$$\left[-\frac{z_p}{z_m} - 1 - \frac{2(l_3 + l_2)(z_m^2 - z_p^2)}{z_m Z_{н3}}\right]A'_1 + \left(1 + \frac{z_p}{z_m}\right)A''_1 -$$
$$- \left[ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2) + \left(\frac{2z_m}{\gamma_{оп}Z_{н3}} - \frac{2\gamma_{оп}}{g_{оп}Z_{н3}}\right)sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2)\right]A'_2 -$$
$$- \left[sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2) + \left(\frac{2z_m}{\gamma_{оп}Z_{н3}} - \frac{2\gamma_{оп}}{g_{оп}Z_{н3}}\right)ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2)\right]A'_3 +$$
$$+ A''_2 ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2) + A''_3 sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2) - 2A'_4 =$$
$$= -\left[\frac{2(l_3 + l_2)I_{кп1}(z_p z_{кпр12} - z_m z_{кпр11})}{z_m Z_{н3}}\right]; \quad (4)$$

$$\underline{x = l_3 + l_2 + l_1;}$$

$$\left[\frac{1}{2} + \frac{z_p}{2z_m} - \frac{(l_3 + l_2 + l_1)(z_m^2 - z_p^2)}{z_m Z_{н1}}\right]A'_1 +$$
$$+ \left[\frac{ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)}{2} - \frac{z_m sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)}{\gamma_{оп}Z_{н1}} +\right.$$
$$\left. + \frac{\gamma_{оп} sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)}{g_{оп}Z_{н1}}\right]A'_2 + \left[\frac{sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)}{2} -\right.$$
$$\left. - \frac{z_m ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)}{\gamma_{оп}Z_{н1}} + \frac{\gamma_{оп} ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)}{g_{оп}Z_{н1}}\right]A'_3 + \frac{A'_4}{Z_{н1}} =$$
$$= -\left[\frac{I_{кп1}z_{кпр12}}{2z_m} + \frac{(l_3 + l_2 + l_1)I_{кп1}(z_p z_{кпр12} - z_m z_{кпр11})}{z_m Z_{н1}}\right]; \quad (5)$$

$$\left[\frac{(l_3 + l_2 + l_1)(z_m^2 - z_p^2) - 2z_p Z_{вх1}}{z_m} + 2Z_{вх1}\right]A'_1 +$$
$$+ \left[\frac{z_m sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)}{\gamma_{оп}} + \frac{\gamma_{оп} sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)}{g_{оп}} +\right.$$
$$\left. + 2ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)Z_{вх1}\right]A'_2 +$$
$$+ \left[\frac{z_m ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)}{\gamma_{оп}} + \frac{\gamma_{оп} ch\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)}{g_{оп}} +\right.$$
$$\left. + 2sh\gamma_{оп}(l_3 + l_2 + l_1)Z_{вх1}\right]A'_3 =$$
$$= \left[\frac{(l_3 + l_2 + l_1)I_{кп1}(z_p z_{кпр12} - z_m z_{кпр11}) + 2I_{кп1}z_{кпр12}Z_{вх1}}{z_m}\right]; \quad (6)$$

$$\left[\frac{ch\gamma_o(l_3+l_2+l_1)}{Z_{вх3}}+\frac{2sh\gamma_o(l_3+l_2+l_1)}{z_в}\right]B_1+$$
$$+\left[\frac{ch\gamma_o(l_3+l_2+l_1)}{Z_{вх3}}+\frac{2sh\gamma_o(l_3+l_2+l_1)}{z_в}\right]B_2=$$
$$=\left[I_{кп1}\left(1-\frac{z_{мкр}}{z_э}\right)\right]; \quad (7)$$

$$\underline{x=l_3;}$$

$$\left[-\frac{z_p}{z_m}-1-\frac{2l_3(z_m^2-z_p^2)}{z_m Z_{н2}}\right]A_1''-$$
$$-\left[ch\gamma_{оп}l_3+\frac{z_m sh\gamma_{оп}l_3}{\gamma_{оп}Z_{н2}}-\frac{\gamma_{оп}sh\gamma_{оп}l_3}{g_{оп}Z_{н2}}\right]A_2''-$$
$$-\left[sh\gamma_{оп}l_3+\frac{z_m ch\gamma_{оп}l_3}{\gamma_{оп}Z_{н2}}-\frac{\gamma_{оп}ch\gamma_{оп}l_3}{g_{оп}Z_{н2}}\right]A_3''-\frac{A_4''}{Z_{н2}}=$$
$$=\left[\frac{I_{кп1}z_{кпр12}}{z_m}-\frac{2l_3I_{кп1}(z_pz_{кпр12}-z_mz_{кпр11})}{z_m Z_{н2}}\right]; \quad (8)$$

$$\frac{l_3(z_m^2-z_p^2)}{z_m}A_1''+\left[\frac{z_m sh\gamma_{оп}l_3}{\gamma_{оп}}+\frac{\gamma_{оп}sh\gamma_{оп}l_3}{g_{оп}}\right]A_2''+$$
$$+\left[\frac{z_m ch\gamma_{оп}l_3}{\gamma_{оп}}+\frac{\gamma_{оп}ch\gamma_{оп}l_3}{g_{оп}}\right]A_3''-$$
$$-2(B_1''ch\gamma_o l_3+B_2''sh\gamma_o l_3)=\left[\frac{l_3I_{кп1}(z_pz_{кпр12}-z_mz_{кпр11})}{z_m}\right]; \quad (9)$$

$$\left(1-\frac{z_p}{z_m}\right)A_1''+A_2''ch\gamma_{оп}l_3+A_3''sh\gamma_{оп}l_3-$$
$$-\frac{2(B_1'''sh\gamma_o l_3+B_2'''ch\gamma_o l_3)}{z_в}=\left[\frac{I_{кп1}z_{кпр12}}{z_m}+\frac{I_{кп1}z_{мкр}}{z_э}\right]; \quad (10)$$

$$\underline{x=0;}$$

$$\frac{2(B_2'''+B_2)}{z_в}-\frac{B_1'''}{Z_{вхэт}}=\left[I_{кп1}\left(1-\frac{2z_{мкр}}{z_э}\right)\right]; \quad (11)$$

$$B_1=B_1'''. \quad (12)$$

После нахождения постоянных интегрирования из уравнений (1)–(12) можно определить токи.

Аналитические выражения для постоянных интегрирования, используемых в дальнейшем при вычислении коэффициентов влияния $K_{вл1}$, $K_{вл2}$, $K_{вл3}$ и токов через нагрузки $I_{н1}$, $I_{н2}$, $I_{н3}$, не приводятся в связи с большим объемом.

Токи, протекающие через аппаратуру рельсовой цепи в нормальном режиме:

$$I_{н1}=\frac{U_{1к}'-U_{2к}'}{Z_{н1}} \quad \text{при } x=l_3+l_2+l_1;$$

$$I_{н2}=\frac{U_{1н}''-U_{2н}''}{Z_{н2}} \quad \text{при } x=l_3;$$

$$I_{н3}=\frac{U_{1к}''-U_{2к}''}{Z_{н3}} \quad \text{при } x=l_3+l_2,$$

следовательно:

$$I_{н1}=\frac{\left[\frac{l_3+l_2+l_1}{z_m}\left((z_m^2-z_p^2)A_1'-I_{кп1}(z_pz_{кпр12}-z_mz_{кпр11})\right)+\right.}{\left.+\left(A_2'sh\gamma_{оп}(l_3+l_2+l_1)+A_3'ch\gamma_{оп}(l_3+l_2+l_1)\right)\times\right.}$$
$$\left.\times\left(\frac{z_m}{\gamma_{оп}}-\frac{\gamma_{оп}}{g_{оп}}\right)+A_4'\right]$$
$$Z_{н1}$$

$$I_{н2}=\frac{K_1A_1''-K_2-A_4''}{Z_{н2}}+A_2''(K_3-ch\gamma_{оп}l_3)+A_3''(K_4-sh\gamma_{оп}l_3);$$

$$K_5A_1''+A_2''(K_6-\frac{\gamma_{оп}}{g_{оп}}sh\gamma_{оп}(l_3+l_2))+$$
$$I_{н3}=\frac{+A_3''\left(K_7-\frac{\gamma_{оп}}{g_{оп}}ch\gamma_{оп}(l_3+l_2)\right)+A_4''}{Z_{н3}}-\frac{K_8}{2}.$$

$$K_1=\frac{l_3(z_m^2-z_p^2)}{z_m};\ K_2=\frac{l_3I_{кп1}(z_pz_{кпр12}-z_mz_{кпр11})}{z_m};$$

$$K_3=ch\gamma_{оп}l_3+\frac{z_m sh\gamma_{оп}l_3}{\gamma_{оп}Z_{н2}}-\frac{\gamma_{оп}sh\gamma_{оп}l_3}{g_{оп}Z_{н2}};$$

$$K_4=sh\gamma_{оп}l_3+\frac{z_m ch\gamma_{оп}l_3}{\gamma_{оп}Z_{н2}}-\frac{\gamma_{оп}ch\gamma_{оп}l_3}{g_{оп}Z_{н2}};\ K_5=\frac{(l_3+l_2)(z_m^2-z_p^2)}{z_m};$$

$$K_6=\frac{z_m sh\gamma_{оп}(l_3+l_2)}{\gamma_{оп}};$$

$$K_7=\frac{z_m ch\gamma_{оп}(l_3+l_2)}{\gamma_{оп}};\ K_8=\frac{2(l_3+l_2)I_{кп1}(z_pz_{кпр12}-z_mz_{кпр11})}{z_mZ_{н3}}.$$

Часть тока электроподвижного состава, который влияет на аппаратуру рельсовой цепи, характеризуется коэффициентами влияния, определяющими часть гармоник тягового тока смежного пути частотой *f*, способной оказывать мешающее воздействие на передающую и приемную аппаратуру данной рельсовой цепи.

Расчет коэффициентов влияния $K_{вл1}$, $K_{вл2}$, $K_{вл3}$ будет иметь следующий вид:

$$K_{\text{вл1}} = \left|\frac{I_{\text{н1}}}{I_{\text{кп1}}}\right| \quad \text{при } x = l_3 + l_2 + l_1;$$

$$K_{\text{вл2}} = \left|\frac{I_{\text{н2}}}{I_{\text{кп1}}}\right| \quad \text{при } x = l_3;$$

$$K_{\text{вл3}} = \left|\frac{I_{\text{н3}}}{I_{\text{кп1}}}\right| \quad \text{при } x = l_3 + l_2.$$

Для определения постоянных интегрирования в контрольном режиме работы рельсовой цепи граничные условия в соответствии с рис. 1*б* имеют вид:

$$\underline{x = 0;}$$

$$I_{1\text{н}}^{\text{IV}} = I_{\text{кп1}} - I_{3\text{н}} + \frac{U_{1\text{н}}^{\text{IV}}}{Z_{\text{вхэт}}};$$

$$U_{3\text{н}} = U_{1\text{н}}^{\text{IV}};$$

$$\underline{x = l_5;}$$

$$I_{1\text{н}}''' - I_{2\text{н}}''' - \frac{2(U_{1\text{н}}''' - U_{2\text{н}}''')}{Z_{\text{н2}}} = 0;$$

$$U_{1\text{н}}''' + U_{2\text{н}}''' - 2U_{1\text{к}}^{\text{IV}} = 0;$$

$$I_{1\text{н}}''' + I_{2\text{н}}''' - I_{1\text{к}}^{\text{IV}} = 0;$$

$$\underline{x = l_5 + l_4;}$$

$$I_{1\text{н}}'' = 0;$$

$$I_{2\text{н}}'' - I_{2\text{к}}''' = 0;$$

$$U_{2\text{н}}'' - U_{2\text{к}}''' = 0;$$

$$I_{1\text{к}}''' = 0;$$

$$\underline{x = l_5 + l_4 + l_3;}$$

$$U_{1\text{н}}' = U_{1\text{к}}'';$$

$$U_{2\text{н}}' = U_{2\text{к}}'';$$

$$I_{1\text{н}}' + I_{2\text{н}}' - I_{1\text{к}}'' - I_{2\text{к}}'' = 0;$$

$$I_{1\text{н}}' - I_{1\text{к}}'' - I_{2\text{н}}' + I_{2\text{к}}'' - \frac{2(U_{1\text{н}}' - U_{2\text{н}}')}{Z_{\text{н3}}} = 0;$$

$$\underline{x = l_5 + l_4 + l_3 + l_2;}$$

$$\frac{1}{2}(I_{2\text{к}}' - I_{1\text{к}}') - \frac{U_{1\text{к}}' - U_{2\text{к}}'}{Z_{\text{н1}}} = 0;$$

$$U_{1\text{к}}' + U_{2\text{к}}' - 2U_{1\text{н}}^{\text{V}} = 0;$$

$$I_{1\text{н}}^{\text{V}} = I_{1\text{к}}' + I_{2\text{к}}'';$$

$$\underline{x = l_5 + l_4 + l_3 + l_2 + l_1;}$$

$$\frac{U_{3\text{к}}}{Z_{\text{вх3}}} + I_{3\text{к}} = I_{\text{кп1}};$$

$$\frac{-U_{1\text{к}}^{\text{V}}}{Z_{\text{вх1}}} = I_{1\text{к}}^{\text{V}}.$$

Для частного случая поперечной асимметрии рельсовой линии, согласно [13], при $g_1 = g_{12} = 0, g_2 = g_{\text{оп}}, z_1 = z_2 = z_p$ можно получить систему линейных алгебраических уравнений для нахождения постоянных интегрирования, что позволит вычислить напряжения и токи в рельсовой линии.

Токи, протекающие через передающую и приемную аппаратуру рельсовой цепи в контрольном режиме:

$$I_{\text{н1}} = \frac{I_{2\text{к}}' - I_{1\text{к}}'}{2} \quad \text{при } x = l_5 + l_4 + l_3 + l_2;$$

$$I_{\text{н2}} = \frac{I_{1\text{н}}''' - I_{2\text{н}}'''}{2} \quad \text{при } x = l_5;$$

$$I_{\text{н3}} = \frac{U_{1\text{н}}' - U_{2\text{н}}'}{Z_{\text{н3}}} \quad \text{при } x = l_5 + l_4 + l_3.$$

Коэффициенты влияния $K_{\text{вл1}}$–$K_{\text{вл3}}$ для схемы контрольного режима вычисляются следующим образом:

$$K_{\text{вл1}} = \left|\frac{I_{\text{н1}}}{I_{\text{кп1}}}\right| \quad \text{при } x = l_5 + l_4 + l_3 + l_2;$$

$$K_{\text{вл2}} = \left|\frac{I_{\text{н2}}}{I_{\text{кп1}}}\right| \quad \text{при } x = l_5;$$

$$K_{\text{вл3}} = \left|\frac{I_{\text{н3}}}{I_{\text{кп1}}}\right| \quad \text{при } x = l_5 + l_4 + l_3.$$

Таким образом, приведенные расчеты позволяют определить влияние гармоник тягового тока, протекающего в контактном проводе смежного пути, на устройства рельсовых цепей, не имеющих изолирующих стыков и расположенных в произвольном месте участка между тяговыми подстанциями, в нормальном и контрольном режимах.

Литература

1. Кравцов Ю. А., Бакин М. Е., Антонов А. А. Методика проверки помехоустойчивости приемников тональных рельсовых цепей // Мир транспорта. 2015. № 6 (13). С. 102–109. ISSN 1992-3252.
2. Методика оценки работоспособности рельсовых цепей тональной частоты при воздействии тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / П. Ф. Бестемьянов, Ю. А. Кравцов, Е. Г. Щербина, А. Б. Чегуров // Вестник РГУПС. 2012. № 1. С. 87–92. ISSN 0201-727X.
3. Работоспособность путевых приемников рельсовых цепей тональной частоты при воздействии сетевого тока электропоезда «Сапсан» / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Вестник транспорта Поволжья. 2013. № 3. С. 14–19. ISSN 1997-0722.
4. Исследование помехоустойчивости путевых приемников тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, В. И. Линьков, П. Е. Мащенко, А. Е. Щербина // Наука и техника транспорта. 2009. № 1. С. 86–91. ISSN 2074-9325.
5. Антонов А. А. Методы проверки электромагнитной совместимости тягового подвижного состава и рельсовых цепей // Механика. Транспорт. Комуникации. 2015. Т. 13. Брой 3/1. С. II-34–II-39. ISSN 1312-3823.
6. Бадер М. П. Анализ и синтез электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения и инфраструктуры на участках с высокоскоростным движением // Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности : матер. V Междунар. науч.-практ. конф., Воловец, Украина, 11–13 июня 2014 г. Днепропетровск : ДНУЖТ, 2014. С. 8–14.
7. Гончаров К. В. Методы повышения помехоустойчивости тональных рельсовых цепей //Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности : матер. V Междунар. науч.-практ. конф., Воловец, Украина, 11–13 июня 2014 г. Днепропетровск : ДНУЖТ, 2014. С. 45–46.
8. Брылеев А. М., Кравцов Ю. А., Шишляков А. В. Теория, устройство и работа рельсовых цепей. М. : Транспорт, 1978. 344 с.
9. Кравцов Ю. А., Мащенко П. Е., Бакин М. Е. Исследование работоспособности опытных образцов путевых приемников рельсовых цепей с автоматическим регулированием уровня сигнала // Труды РГУПС. 2012. № 1. С. 20. ISSN 1818-5509.
10. Мащенко П. Е., Антонов А. А. Уравнения распространения напряжений и токов в двухпроводной и однопроводной рельсовых линиях, учитывающие взаимную индуктивность контактного провода и рельсов // Безопасность движения поездов : тр. 11-й науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2010.
11. Кравцов Ю. А., Антонов А. А., Чегуров А. Б. Методика расчета критических характеристик чувствительности к обрыву рельсовой нити с учетом уровня гармоник тока электроподвижного состава с импульсным регулированием // Труды РГУПС. 2012. № 1. С. 17–20. ISSN 1818-5509.
12. Электромагнитное взаимодействие контактного провода с рельсовыми цепями на двухпутных участках железных дорог / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Безопасность движения поездов : тр. 15-й науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2014. С. II-52–II-53.
13. Антонов А. А., Бакин М. Е. Расчет влияния гармоник тягового тока на рельсовую цепь // Мир транспорта. 2016. № 2 (14). С. 16–21. ISSN 1992-3252.

References

1. Kravtsov Yu. A., Bakin M. E., Antonov A. A. Metodika proverki pomekhoustojchivosti priyomnikov tonalnykh relsovykh cepej [Methods of interference immunity checking of tone track circuits receivers] // Mir transporta. 2015. № 6 (13). S. 102–109. ISSN 1992-3252.
2. Metodika ocenki rabotosposobnosti relsovykh cepej tonalnoj chastoty pri vozdejstvii toka elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom / P. F. Bestemyanov, Yu. A. Kravtsov, E. G. Shherbina, A. B. Chegurov [Method for tonal frequency rail circuits operational integrity estimation under the influence of the rolling stock equiped with asynchronous propulsion motor] // Vestnik RGUPS. 2012. № 1. S. 87–92. ISSN 0201-727X.
3. Rabotosposobnost putevykh priyomnikov relsovykh cepej tonalnoj chastoty pri vozdejstvii setevogo toka elektropoezda «Sapsan» / Yu. A. Kravtsov, E. V. Arkhipov, A. A. Antonov, M. E. Bakin [Operability of tonal track circuit receivers under Sapsan line current] // Vestnik transporta Povolzhya. 2013. № 3. S. 14–19. ISSN 1997-0722.
4. Issledovanie pomekhoustojchivosti putevykh priyomnikov tonalnykh relsovykh cepej / Yu. A. Kravtsov, V. I. Linkov, P. E. Mashhenko, A. E. Shherbina [Research of interference resistance of the tonal reil circuits track receivers] // Nauka i tekhnika transporta. 2009. № 1. S. 86–91. ISSN 2074-9325.
5. Antonov A. A. Metody proverki elektromagnitnoj sovmestimosti tyagovogo podvizhnogo sostava i relsovykh cepej [Methods of checking electromagnetic capability of traction rolling stock and track circuits] // Mekhanika. Transport. Komunikacii. 2015. T. 13. Broj 3/1. S. II-34–II-39. ISSN 1312-3823.
6. Bader M. P. Analiz i sintez elektromagnitnoj sovmestimosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya i infrastruktury na uchastkakh s vysokoskorostnym dvizheniem [Analysis and synthesis of electromagnetic compatibility of the traction electric power supply and infrastructure on high-speed sections] // Energosberezhenie na zheleznodorozhnom transporte i v promyshlennosti : mater. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Volovec, Ukraina, 11–13 iyunya 2014 g. Dnepropetrovsk : DNUZhT, 2014. S. 8–14.
7. Goncharov K. V. Metody povysheniya pomekhoustojchivosti tonalnykh relsovykh cepej [Methods of improving the interference resistance of tonal rail circuits] // Energosberezhenie na zheleznodorozhnom transporte i v promyshlennosti : mater. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Volovec, Ukraina, 11–13 iyunya 2014 g. Dnepropetrovsk : DNUZhT, 2014. S. 45–46.
8. Bryleev A. M., Kravtsov Yu. A., Shishlyakov A. V. Teoriya, ustrojstvo i rabota relsovykh cepej [Theory, construction and operation of rail networks]. M. : Transport, 1978. 344 s.
9. Kravtsov Yu. A., Mashhenko P. E., Bakin M. E. Issledovanie rabotosposobnosti opytnykh obrazcov putevykh priyomnikov relsovykh cepej s avtomaticheskim regulirovaniem urovnya signala [Research of operability of experimental track receivers of rail circuits with autometed signal level regulation] // Trudy RGUPS. 2012. № 1. S. 20. ISSN 1818-5509.
10. Mashhenko P. E., Antonov A. A. Uravneniya rasprostraneniya napryazhenij i tokov v dvukhprovodnoj i odnoprovodnoj relsovykh liniyakh, uchityvajushhie vzaimnuyu induktivnost kontaktnogo provoda i relsov [Voltage and current spreading equations in two-wire and single-wire rail lines, accounting for mutual induction of the contact wire and rails] // Bezopasnost dvizheniya poezdov : tr. 11-j nauch.-prakt. konf. M. : MIIT, 2010.
11. Kravtsov Yu. A., Antonov A. A., Chegurov A. B. Metodika raschyota kriticheskikh kharakteristik chuvstvitelnosti k obryvu relsovoj niti s uchyotom urovnya garmonik toka elektropodvizhnogo sostava s impulsnym regulirovaniem [A method of calculating critical characteristics of sensitivity to rail circuit interruption, accounting for the level of current harmonics of electric driven rolling stock with impulse adjustment] // Trudy RGUPS. 2012. № 1. S. 17–20. ISSN 1818-5509.
12. Elektromagnitnoe vzaimodejstvie kontaktnogo provoda s relsovymi cepyami na dvukhputnykh uchastkakh zheleznykh dorog / Yu. A. Kravtsov, E. V. Arkhipov, A. A. Antonov, M. E. Bakin [Electromagnetic interaction of the contact wire with rail circuits on two-tract scetions of railroads] // Bezopasnost dvizheniya poezdov : tr. 15-j nauch.-prakt. konf. M. : MIIT, 2014. C. II-52–II-53.
13. Antonov A. A., Bakin M. E. Raschyot vliyaniya garmonik tyagovogo toka na relsovuyu cep [Calculation of the influence of traction current harmonics on the rail circuit] // Mir transporta. 2016. № 2 (14). S. 16–21. ISSN 1992-3252.

УДК 629.086

Борис Викторович Рожкин, старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Александр Викторович Паранин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

РАСЧЕТ НАГРЕВА ДРОССЕЛЬ-ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ОБРАЩЕНИИ ПОЕЗДОВ ПОВЫШЕННОЙ МАССЫ И ДЛИНЫ

Boris Viktorovich Rozhkin, Senior Lecturer, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Alexander Viktorovich Paranin, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Calculation of impedance bond heating during circulation of increased weight and length trains

Аннотация

В работе определена аналитическая зависимость изменения температуры дроссель-трансформатора при протекании по нему обратного тягового тока при обращении поездов повышенной массы. Искомая зависимость необходима для количественной оценки параметров надежности аппаратуры обратной тяговой сети с учетом реальных условий эксплуатации.

Ключевые слова: температура, интенсивность отказов, конечно-элементное моделирование, уравнение теплового баланса, конвекция масла, дроссель-трансформатор, обратный тяговый ток.

Summary

The article defines an analytic dependence of the impedance bond temperature during reverse traction current flow caused by circulation of increased weight trains. The sought for dependence is necessary for a quantitative estimation of reverse traction equipment reliability parameters accounting for realistic operating conditions.

Keywords: temperature, frequency of failures, finite-element modeling, heat balance equation, oil convection, impedance bond, reverse traction current.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-47-51

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для решения задачи перехода на обслуживание устройств инфраструктуры железных дорог «по состоянию» в соответствии с п. 4.2.5 [1] необходимо учитывать текущие условия эксплуатации [2]. Из теории надежности известно, что такой учет выполняется введением поправочного коэффициента в уравнения расчета параметров надежности [3]. Исходными данными для определения этого коэффициента служат нагрузка узла и его температура. В работе [4] было получено аналитическое выражение, позволяющее учитывать текущие условия эксплуатации при определении параметров надежности:

$$\lambda_э = f(T, K, \lambda_н), \quad (1)$$

где $\lambda_э$, $\lambda_н$ — интенсивность отказов в режиме эксплуатации и номинальная;

T, K — температура и коэффициент нагрузки дроссель-трансформатора.

Коэффициент нагрузки есть функция обратного тягового тока, который можно определить либо моделированием, либо прямыми измерениями. Известно, что работы по моделированию нагрева дроссель-трансформатора (ДТ) проводились в начале 1980-х гг., но у авторов статьи доступа к этим результатам нет.

Формализуем задачу: необходимо получить аналитическое выражение зависимости температуры дроссель-трансформатора от тока в обратной тяговой сети:

$$T = f(I). \quad (2)$$

АНАЛИЗ ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ

Существует ряд методик теплового расчета [5–7], разработанных для силовых масляных трансформаторов. Их математический аппарат базируется на анализе тепловых потерь в режимах холостого хода и короткого замыкания. В [8] предложен

e-mail: boris_r_v@mail.ru, alks84@mail.ru
Дата поступления: 11.11.2016

метод рекурсивного расчета температуры трансформатора, основанный: на величине температуры обмотки и масла в начале каждого шага ($T_0^{\text{обм}}, T_0^{\text{масла}}$); среднем значении температуры перегрева обмотки и масла в установившемся режиме ($\theta_{avr}^{\text{обм}}$, $\theta_{avr}^{\text{масла}}$) при номинальной нагрузке; температурных постоянных времени обмотки и масла ($D^{\text{обм}}$, $D^{\text{масла}}$); коэффициенте нагрузки по току $K_{\text{н}}$:

$$T_{\text{тр-ра}} = \theta_{\text{обм}} + \theta_{\text{масла}} + T_{\text{среды}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{тр-ра}}$ — температура трансформатора, °С;

$\theta_{\text{обм}}$ — величина превышения средней температуры обмотки над средней температурой масла, °С,

$$\theta_{\text{обм}} = T_0^{\text{обм}} \cdot e^{\Delta t / D^{\text{обм}}} + \\ +\theta_{avr}^{\text{обм}}(0{,}64K_{\text{н}}^2 + 0{,}36K_{\text{н}})(1 - e^{\Delta t / D^{\text{обм}}}), \quad (4)$$

где Δt — время приложения токовой нагрузки $K_{\text{н}}$;

$\theta_{\text{масла}}$ — превышение температуры масла над охлаждающей средой, °С,

$$\theta_{\text{масла}} = T_0^{\text{масла}} \cdot e^{\Delta t / D^{\text{масла}}} + \theta_{avr}^{\text{масла}} \left(\frac{1 + \alpha K_{\text{н}}^2}{1 + \alpha} \right)(1 - e^{\Delta t / D^{\text{масла}}}), \quad (5)$$

где α — отношение потерь холостого хода к потерям короткого замыкания;

$T_{\text{среды}}$ — температура окружающей среды, °С.

Токовая нагрузка рассчитывается как

$$K_{\text{н}} = \frac{I_{\text{нагр}}}{I_{\text{номин}}}. \quad (6)$$

Данный метод позволяет вычислить температуру трансформатора при известной токовой нагрузке. Все остальные переменные определяются конструкцией, поэтому для конкретного трансформатора они являются константами.

Чтобы получить аналитическое выражение (2), необходимо подобрать значения следующих констант для ДТ:

температурных постоянных времени ($D^{\text{обм}}$, $D^{\text{масла}}$);

среднего перегрева обмотки и масла в установившемся режиме ($\theta_{avr}^{\text{обм}}$, $\theta_{avr}^{\text{масла}}$);

коэффициента отношения потерь холостого хода к короткому замыканию α.

Для определения этих констант выполним моделирование нагрева ДТ. Источником тепла является токовая обмотка, по которой протекает обратный тяговый ток. Значения тока получены путем измерений на действующем участке железной дороги, по которому обращаются поезда повышенной массы и длины. Участок электрифицирован по системе постоянного тока 3 кВ.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ДРОССЕЛЬ-ТРАНСФОРМАТОРА

В тепловом отношении дроссель-трансформатор представляет собой неоднородное тело с внутренним источником тепла и нестационарным режимом теплообмена [9]. Уравнение нестационарного теплообмена выглядит следующим образом:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \cdot \nabla T) = Q(t), \quad (7)$$

где ρ — плотность, кг/м^3;

c_p — теплоемкость, Дж/кг · °К;

T — температура, °К;

t — время, с;

u — скорость конвекционного потока, м/с;

k — теплопроводность, Вт/м · °К;

Q — объемная плотность тепла, Вт/м^3.

Выделение теплоты будет происходить в обмотке ДТ, факт отсутствия у постоянного тока поверхностного эффекта позволяет нам принять равномерность плотности тока по всему сечению токовой обмотки ДТ. Теплообмен внутри твердых тел (обмотка, корпус, сердечник, грунт вокруг ДТ) осуществляется за счет теплопроводности, в масле — главным образом за счет конвекции жидкости и в незначительной степени за счет кондуктивного теплообмена [10, 11]. Непосредственно для описания движения жидкой среды, т.е. масла, используется система, состоящая из уравнения Навье — Стокса [12] для несжимаемой жидкости или газа и уравнения неразрывности потока. Уравнение Навье — Стокса записано в переменных «скорость — давление» в нестационарной форме:

$$\begin{cases} \rho \dfrac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u - \nabla \cdot \left[-p \cdot E + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) \right] = F_{\text{внш}} \\ \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где u — вектор скорости, м/с;

p — давление, Па;

μ — динамическая вязкость, Па·с;

$F_{\text{внш}}$ — вектор внешней объемной силы, Н/м^3;

E — единичная матрица.

Нагретое обмоткой масло имеет меньшую плотность, чем удаленное от обмотки ненагретое, и поэтому будет подниматься вверх. Это можно учесть, если принять вертикальную составляющую внешней объемной силы в системе (8) равной объемному весу масла, а горизонтальной пренебречь:

$$F_{\text{внш_у}} = -g_c \cdot \rho, \quad (9)$$

где g_c — ускорение свободного падения.

В выражение нестационарного теплообмена (7) входит вектор скорости конвекционного потока масла u, следовательно, температурное поле зависит от поля скорости и давления. Поэтому задача нагрева ДТ обратным тяговым током является мультифизической и связывает два процесса — гидродинамический и процесс теплопередачи. Решение данной задачи возможно только в нестационарной форме с нахождением всех взаимосвязанных полей в каждый момент времени в расчетной области, т.е. скорости, давления и температуры. Для этого необходимо совместно решить систему уравнений (7)–(9) с учетом зависимости физических свойств масла от его температуры и давления.

Охлаждение ДТ осуществляется кондуктивным переносом тепла в грунт от заглубленной его части и конвективным — от части, расположенной на открытом воздухе. Перенос тепла в воздухе и грунте описывается теми же дифференциальными уравнениями (7)–(9). Отличия будут заключаться в свойствах среды. Дифференциальные уравнения (7)–(9) решаются с помощью конечно-элементного моделирования. Непосредственно воздух в расчетную область не входит. На границе расчетной области, которая с ним соприкасается, задается соответствующее условие, которое позволяет учесть перенос тепла в воздух за счет конвекции.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ

Для создания модели необходимо нарисовать дроссель-трансформатор в натуральную величину (рис. 1), указать материал для каждой геометрической области, описать необходимые физические процессы, задать граничные и начальные условия, построить расчетную сетку, настроить решатель.

Моделирование будем производить в программном продукте Comsol Multiphysics, который численно решает уравнения (7)–(9) с необходимыми граничными и начальными условиями.

Начальные условия модели задаются для каждого элемента, участвующего в процессах нагрева и охлаждения. На время начала расчета примем, что температура всех элементов одинакова и равна T_{init}, масло находится при внешнем давлении в p_{init}, скорость конвекционного движения масла равна u_{init}:

$$\begin{cases} T_{init} = 30\,^{\circ}\mathrm{C} \\ p_{init} = 1\,\text{атм}. \\ u_{init} = 0\ \text{м/с} \end{cases} \qquad (10)$$

В твердых средах передача тепла осуществляется за счет теплопроводности, поэтому

$$\rho c_p u \cdot \nabla T = 0. \qquad (11)$$

Источником тепла в модели служит токовая обмотка, поэтому правый член уравнения в данной геометрической области (7) будет равен количеству теплоты, выделившейся в указанном объеме:

$$Q = R(T) \cdot I(t)^2, \qquad (12)$$

где $I(t)$ — зависимость плотности тока в проводнике от времени, А/мм^2;

$R(T)$ — зависимость удельного сопротивления меди от температуры, Ом·м.

На всех границах твердого тела и жидкости, которые соприкасаются с воздухом, задано условие конвективного теплообмена. Оно означает, что поток тепла через данную границу пропорционален разности температур расчетной области в данной точке и окружающего воздуха. Коэффициент пропорциональности называется коэффициентом конвективного теплообмена. На внешней границе корпуса ДТ и поверхности земли, соприкасающейся с воздухом, дополнительно задано условие теплообмена лучеиспусканием. Поток тепла через границу при этом пропорционален разности четвертых степеней температур расчетной области в данной точке и окружающего воздуха. Коэффициент этой пропорциональности равен произведению константы Стефана — Больцмана и коэффициента серости поверхности. На всех внутренних границах расчетной области задано граничное условие непрерывности потока тепла.

Для всех границ, на которых жидкость (масло) соприкасается с твердыми телами или воздухом, задано граничное условие равенства вектора скорости нулю. В одной верхней точке поверхности масла задано граничное условие равенства давления барометрическому атмосферному. Тем самым задается гидростатическое давление в масле сверх расчетного динамического давления. Последнее обусловлено конвективным движением масла.

Расчетная сетка на большей части площади расчетной области выполнена треугольной (см. рис. 1). На всех границах геометрической области масла она выполнена слоями для более качественного описания поверхностного слоя течения жидкости. Общее число элементов расчетной сетки — 26 тыс.

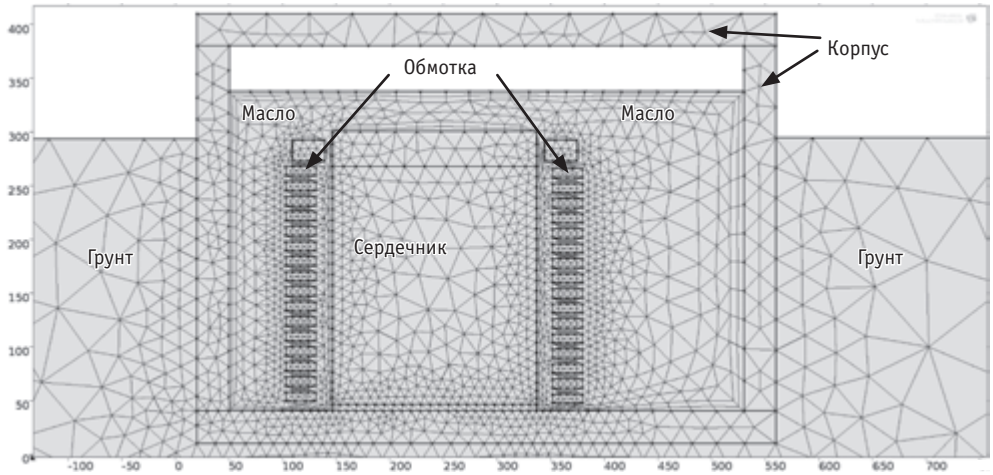


Рис. 1. **Двухмерная геометрия дроссель-трансформатора с расчетной сеткой**

Общее количество степеней свободы составляет 112 тыс. Искомой переменной во всей расчетной области является температура T, а для геометрической области масла — дополнительно вектор скорости потока u и скаляр давления p. Для расчета применяется итерационный решатель с разделением переменных на две группы. В первую входит температура, во вторую — давление и скорость среды в масле. Итерации в каждый шаг по времени повторяются до достижения заданной сходимости. Для расчета максимальный шаг по времени принудительно ограничивается значением 0,5 с. Данное ограничение позволяет достаточно точно линеаризовать процесс конвекции масла по времени. При этом не нужно на каждом шаге переформировывать матрицы, что несколько ускоряет процесс расчета и повышает его точность. Для моделирования 1 ч работы дроссель-трансформатора на ПК с четырехъядерным процессором 3,5 ГГц и 16 ГБайт ОЗУ требуется более 2 ч при полной загрузке компьютера.

Для проверки адекватности модели воспользуемся нормативной документацией на ДТ [13], в которой указано, что при протекании нормативного тока в течение 2 ч средний перегрев масла над охлаждающей средой не должен превышать 75 °С. На рис. 2 приведена эпюра температуры моделируемого дроссель-трансформатора ДТ-0,6–1000 после протекания тока 2000 А в течение 2 ч.

Средний перегрев масла в модели составил 60,2 °С, а средний перегрев обмотки над маслом — 5,44 °С. Отсюда можно сделать следующие выводы:

синтезированная конечно-элементная модель адекватна и пригодна для анализа процессов нагрева и охлаждения дроссель-трансформатора;

полученные средние значения перегрева обмотки и масла для дроссель-трансформатора соответственно составляют $\theta_{avr}^{\text{обм}} = 5{,}44$ °С, $\theta_{avr}^{\text{масла}} = 60{,}2$ °С.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ ОБМОТКИ И МАСЛА

Для определения ($D^{\text{обм}}$, $D^{\text{масла}}$) и коэффициента α введем в модель обратные тяговые токи, измеренные на участке с затяжным подъемом. График тока, протекающего через дроссель-трансформатор при проходе пакета из трех грузовых поездов массой 6300, 8900 и 6300 т, представлен на рис. 3.

На рис. 4 приведены графики превышения температуры масла над охлаждающей средой, полученные из модели и по эмпирическим формулам. Относительная ошибка прогнозирования составила 9,1 % при следующих значениях:

$$\begin{cases} D^{\text{масла}} = 3900 \text{ с} \\ \alpha = 5000 \\ \theta_{avr}^{\text{масла}} = 60{,}2\,^{\circ}\text{C} \end{cases}. \qquad (13)$$

Графики превышения температуры обмотки над охлаждающей средой, полученные из модели и по эмпирическим формулам, представлены на рис. 5. Относительная ошибка прогнозирования составила 24,57 % при значениях:

$$\begin{cases} D^{\text{обм}} = 120 \text{ с} \\ \theta_{avr}^{\text{обм}} = 5{,}44\,^{\circ}\text{C} \end{cases}. \qquad (14)$$

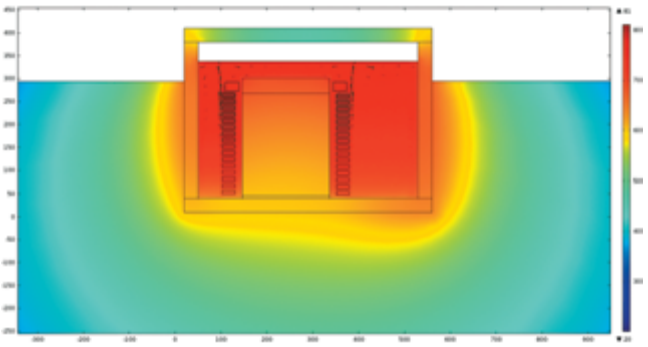


Рис. 2. **Температура расчетной области на 120-й минуте численного эксперимента:**
цветовая шкала слева — температура, °С;
стрелки — вектор скорости движения масла

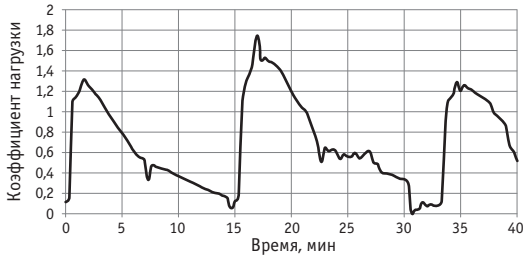


Рис. 3. **Коэффициент нагрузки дроссель-трансформатора, измеренный на участке с затяжным подъемом**

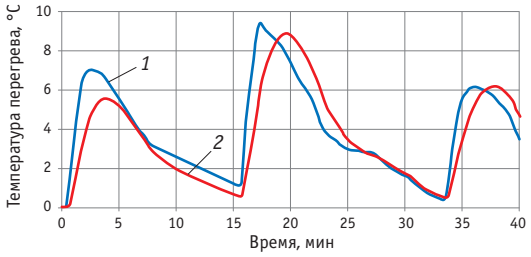


Рис. 4. **График температуры перегрева масла $\theta_{avr}^{\text{масла}}$ над окружающей средой:**
1 — расчет по модели; *2* — расчет по эмпирической формуле

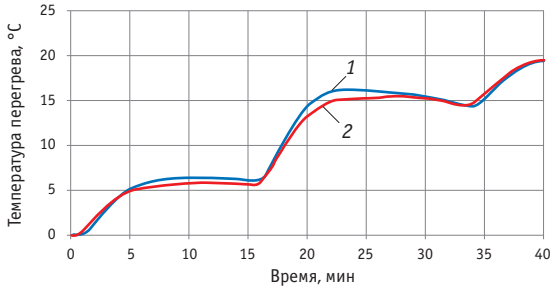


Рис. 5. **График температуры перегрева обмотки $\theta_{avr}^{\text{обм}}$ над маслом:**
1 — расчет по модели; *2* — расчет по эмпирической формуле

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования разработана нестационарная двухмерная конечно-элементная модель расчета нагрева ДТ с учетом кондуктивного и конвективного теплообмена. Модель верифицирована путем сравнения ее результатов с нормативными требованиями, предъявляемыми к ДТ. Однако конечно-элементная модель требует значительных вычислительных мощностей и относительно большого времени расчета. Ее практически невозможно использовать для оценки температуры ДТ в режиме реального времени.

На основе конечно-элементной модели определены постоянные рекурсивной эмпирической формулы расчета температуры ДТ при известном токе в обратной тяговой сети. Рекурсия в этом контексте подразумевает необходимость проведения пошаговых вычислений таким образом, что значения на данном шаге зависят от значений на предыдущем. Перегрев обмотки над маслом и масла над охлаждающей средой определяется по формулам (4)–(5) с подстановкой констант из (13)–(14). Рекурсивный способ вычислений хорошо подходит для реализации на ЭВМ и дает возможность в режиме реального времени путем измерения тока, протекающего через ДТ, находить его температуру. Это позволяет на основе модели расчета, полученной в [4], более точно определять текущие параметры надежности дроссель-трансформатора.

Литература

1. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года (Белая книга ОАО «РЖД») [Электронный ресурс]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=4038&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (дата обращения: 01.11.2016).
2. РД 26.260.004–91. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: http://files.stroyinf.ru/Data1/9/9239/ (дата обращения: 01.11.2016).
3. Малафеев С. И., Копейкин А. И. Надежность технических систем. Примеры и задачи : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2012. 320 с.
4. Рожкин Б. В. Учет влияния условий эксплуатации на параметры надежности обратной тяговой сети // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 87–92. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-87-92. ISSN 1815-9400.
5. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Под ред. Г. Е. Тарле. М. : Энергия, 1980. 208 с.
6. ГОСТ 14209–97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов [Электронный ресурс]. URL: http://cdn.elec.ru/library/gosts_e64/gost_14209–97.pdf (дата обращения: 01.11.2016).
7. РД 16254–85. Трансформаторы силовые масляные мощностью до 100 МВА. Расчет нагрева масла, обмоток и отводов при перегрузках.
8. Тер-Оганов Э. В. Моделирование работы системы электроснабжения электрифицированной железной дороги. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2007. 83 с.
9. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М. : Высшая школа, 1967. 592 с.
10. Юдаев Б. Н. Теплопередача. М. : Высшая школа, 1973. 353 с.
11. Исаченко В. П. Теплопередача : учеб. для вузов / Изд. 3-е, перераб. и доп. М. : Энергия, 1975. 488 с.
12. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов. М. : Машиностроение, 1969. 400 с.
13. Сороко В. И., Милюков В. А. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справ. в 2 кн. Кн. 1. М. : НПФ «Планета», 2000. 960 с.

References

1. Strategiya innovacionnogo razvitiya OAO «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda (Belaya kniga OAO «RZhD») [Innovation development strategy of «Russian Railways» JSC for a period up to 2015 («RZhD» JSC White Book)]. [Electronic resource]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=4038&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (date access: 01.11.2016).
2. RD 26.260.004-91. Metodicheskie ukazaniya. Prognozirovanie ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tekhnicheskogo sostoyaniya pri ekspluatacii [RD 26.260.004-91. Methodical recommendations. Predicting the remaining lifetime of equipment from the changes of its technical parameters during operation]. [Electronic resource]. URL: http://files.stroyinf.ru/Data1/9/9239/ (date access: 01.11.2016).
3. Malafeev S. I., Kopeykin A. I. Nadyozhnost tekhnicheskikh sistem. Primery i zadachi : ucheb. posobie [Reliability of technical systems. Examples and tasks : textbook]. SPb. : Lan, 2012. 320 s.
4. Roshkin B. V. Uchyot vliyaniya uslovij ekspluatacii na parametry nadyozhnosti obratnoj tyagovoj seti [Consideration of the operating conditions influence on the parameters of return traction network reliability] // Transport Urala. 2016. № 2 (49). S. 87-92. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-87-92. ISSN 1815-9400.
5. Kish L. Nagrev i okhlazhdenie transformatorov / Pod red. G. E. Tarle [Heating and cooling of transformers / Ed. by G. E. Tarle]. M. : Energiya, 208 s.
6. GOST 14209–97. Rukovodstvo po nagruzke silovykh maslyanykh transformatorov [GOST 14209–97. Guidebook on loading power oil transformers]. [Electronic resource]. URL: http://cdn.elec.ru/library/gosts_e64/gost_14209-97.pdf (date access: 01.11.2016).
7. RD 16 254-85. Transformatory silovye maslyanye moshhnostyu do 100 MVA. Raschyot nagreva masla, obmotok i otvodov pri peregruzkakh [RD 16 254-85. Oil power transformers up to 100 MVA power. Oil, coils and taps heating under overloads calculation].
8. Ter-Oganov E. V. Modelirovanie raboty sistemy elektrosnabzheniya elektrificirovannoj zheleznoj dorogi [Modeling the operation of electric power supply system of an electrified railway]. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2007. 83 s.
9. Lykov A. V. Teoriya teploprovodnosti [Heat conductivity theory]. M. : Vysshaya shkola, 1967. 592 s.
10. Yudaev B. N. Teploperedacha [Heat conduction]. M. : Vysshaya shkola, 1973. 353 s.
11. Isachenko V. P. Teploperedacha : ucheb. dlya vuzov / Izd. 3-e, pererab. i dop. [Heat conduction : university textbook / 3rd ed., rev. and exp.]. M. : Energiya, 1975. 488 s.
12. Ginevskiy A. S. Teoriya turbulentnykh struj i sledov [Theory of turbulent streams and traces]. M. : Mashinostroenie, 1969. 400 s.
13. Soroko V. I., Milyukov V. A. Apparatura zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki : sprav. v 2 kn. Kn. 1 [Railway automatics and telemechanics equipment : a reference guide in 2 books. Book 1]. M. : NPF «Planeta», 2000. 960 s.

УДК 004.896+656:25

Дмитрий Владимирович Седых, инженер кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

ИНТЕГРАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОТРАСЛЕВОГО ФОРМАТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Dmitriy Vladimirovich Sedykh, Engineer, Automation and Telemechanics on the Railway Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

Integration solutions based on the industrial format of technical documentation

Аннотация

Рассмотрена задача интеграции приложений и систем автоматизированного проектирования и электронного документооборота, а также подходы, применяемые для ее решения. Сформулированы основные требования к форматам технической документации транспортной отрасли. Проанализирован мировой опыт по применению форматов для обмена данных, обоснован выбор формата, который может быть использован в качестве отраслевого. Описаны основные особенности и структура разработанного формата.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, ЖАТ, электронный формат технической документации, отраслевой формат технической документации, XML, SVG.

Summary

A task of integrating the applications and systems for computer-aided design and electronic documents exchange, as well as approaches used for solving it, is reviewed. The principal requirements for the technical documentation standards in the transport industry are formulated. The international experience of using data exchange format is analyzed, selection of a format that could be used as the industrial one is substantiated. The principal specifics and the structure of the developed format are described.

Keywords: computer-aided design, RAT, electronic format of technical documentation, industrial format of technical documentation, XML, SVG.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-52-57

Автоматизация проектирования схемных решений и электронного документооборота [1–5] — одна из актуальных задач для транспорта, прежде всего железнодорожного. Эти процессы, выполняемые в основном вручную, достаточно трудоемки по времени и нередко под влиянием человеческого фактора приводят к ошибочным действиям [6]. Наибольших успехов в данной области добились разработчики систем автоматизированного проектирования (САПР) железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). В частности, сотрудниками кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I совместно с коллегами из ООО «ИМСАТ» уже более 15 лет внедряются автоматизированные рабочие места (АРМ) проектировщиков технической документации ЖАТ [7–9]. Хороших результатов удалось достичь прежде всего благодаря разработке отраслевого формата технической документации транспортной отрасли (ОФ-ТД) [10].

Применяемые до ОФ-ТД схемы данных не позволяли удобно для пользователей и программистов отражать такие особенности систем, как сложные технические устройства и взаимосвязи между ними [11, 12]. Возникали проблемы и при интеграции различных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ-ТП). В настоящее время интеграция осуществляется хаотично. При этом интегрируется каждая система с каждой, что ведет к значительным затратам материальных и людских ресурсов, а также увеличивает число ошибок. Существующие форматы, используемые для интеграции в отрасли, по ряду причин не подходят для отраслевого формата. Поэтому и был разработан ОФ-ТД, который удовлетворяет требованиям не только сегодняшнего дня, но и долгосрочной перспективы.

Несмотря на то что в настоящее время уже существуют различные АСУ-ТП, методология их построения не учитывает такого требования, как необходимость обмена данными между ними. Сформулируем некоторые проблемы, препятствующие интеграции систем:

разнородность приложений с точки зрения специфики их использования, времени создания, применяемых методик;

e-mail: sedyhdmitriy@gmail.com
Дата поступления: 27.07.2016

распределенность приложений в случае транспортных предприятий (типичная характеристика, усложняющая процесс интеграции приложений и передачи информации);

гетерогенность среды, в которой функционируют приложения (обусловлена, как правило, наличием унаследованных систем и различной спецификой применения приложений).

К специфическим проблемам транспортного комплекса, в частности, относятся невозможность одновременной замены устаревших информационных систем, необходимость работы с большими объемами информации, необходимость минимизации количества обслуживающего персонала.

ОТРАСЛЕВОЙ ФОРМАТ КАК ОСНОВНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИНТЕГРАЦИИ

Типичная организация вычислительной системы подразумевает учет ее истории и этапов развития. При этом история проецируется на структуру, состав и организацию системы. В результате вычислительная система обычно состоит из ряда прикладных подсистем, которые создавались в разное время разными разработчиками в соответствии с разными концепциями и нередко на основе разных платформ. Таким образом, возникает необходимость объединения отдельных автоматизированных систем (АС), компонент и подсистем в единую систему.

Традиционное решение этой проблемы — доработка каждой из АС так, чтобы любая их компонента была совместима со всеми остальными. Основной недостаток такого подхода заключается в том, что каждая компонента должна знать о существовании других компонент, с которыми она ведет информационный обмен, и знать необходимые для обмена детали их организации.

Последствием традиционного подхода является контролируемое или неконтролируемое наращивание количества связей между АС (рис. 1) и их компонентами, что приводит к потере управления системой и требует радикальных решений, вплоть до полного ее реинжиниринга. В конечном счете это выражается:

в значительных затратах на модификацию;

потерях от «выбрасывания» старых компонент;

упущенной прибыли из-за частичного отвлечения ресурсов.

Проведенный анализ того, как зарождаются и проходят информационные потоки в системах транспортной отрасли, позволяет сделать вывод о необходимости управления ими на начальной стадии для интеграции систем всех профильных служб. Требования к структуре информационного обмена и интеграции формулируются путем создания специальной единой информационной среды на основе ядра интеграции. При этом осуществляется интеграция каждого отдельного приложения с ядром интеграции, обеспечивающим внутри себя передачу информации из одного приложения к другому (рис. 2).

Можно обозначить следующие задачи интеграции:

повышение эффективности эксплуатации технической документации;

повышение достоверности данных в информационных потоках;

ускорение процесса проектирования технической документации;

ускорение процессов обмена данными между смежными системами;

ускорение ввода систем в эксплуатацию за счет ускорения пуско-наладочных работ;

увеличение эффективности работы смежных информационных систем;

повышение эффективности на всех уровнях управления.

При решении основной задачи интеграции приложений необходимо решить целый ряд проблем, обусловленных разнородностью представления данных:

преобразование форматов сообщений между системами, связанное с различием используемых этими системами форматов;

передача сообщений, построенных на основе разных протоколов обмена, между различными каналами передачи информации;

достижение требуемого уровня достоверности передачи данных по существующим линиям связи;

защита передаваемой информации от перехвата;

управляемость решения на уровне управления реакцией на нештатные ситуации и контроля производительности системы;

соблюдение условий транзакционности для выполнения последовательных шагов процесса, а также для операций изменения состояния в интегрируемых системах.

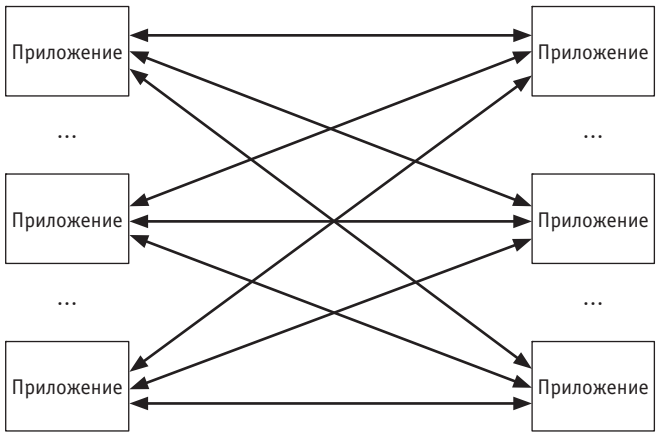


Рис. 1. **Обмен документами без ядра интеграции**

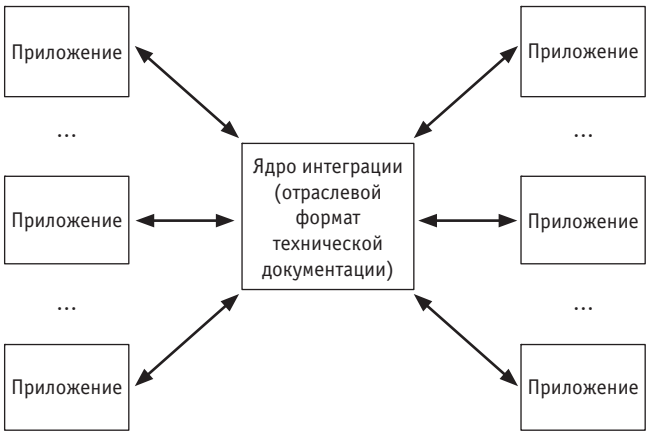


Рис. 2. **Обмен документами с использованием ядра интеграции**

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что построение ядра интеграции сводится к разработке специализированного отраслевого формата технической документации (ОФ-ТД) для обмена данными между приложениями.

ТРЕБОВАНИЯ К ЕДИНОМУ ОТРАСЛЕВОМУ ФОРМАТУ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Для обеспечения надежного функционирования интеграционного решения формат ОФ-ТД должен удовлетворять ряду требований (рис. 3).

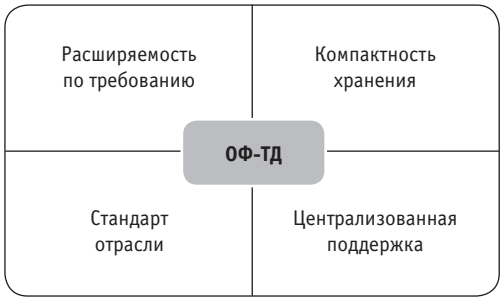


***Рис. 3.* Главные требования к ОФ-ТД**

Прежде всего он должен быть согласован со всеми основными участниками процесса интеграции и генеральным заказчиком и утвержден в форме отраслевого стандарта. Отраслевой формат должен поддерживаться специальной рабочей группой, модифицироваться по заявкам с разрешения заказчика при обязательном сохранении баз наработанной технической документации, баз данных систем автоматизированного проектирования и систем электронного документооборота всех уровней. При разработке или модификации систем автоматизации проектирования и систем документооборота, использующих собственные форматы описания данных, должны создаваться специальные программы перевода информации в ОФ-ТД, чтобы обеспечить возможность ее применения всеми участниками интеграции. ОФ-ТД должен учитывать современную стадию развития информационных систем и САПР и легко адаптироваться под требования, поступающие от старых или новых участников процесса интеграции.

Данные в отраслевом формате должны храниться компактно и соответствовать таким важным показателям, как:

скорость обмена по каналам передачи данных;

эффективность контроля целостности и защиты данных;

минимальный объем памяти;

скорость получения данных;

удобство сжатия информации и др.

ОФ-ТД должен обеспечивать возможность доступа к данным как в последовательном режиме, так и в произвольном. Выполнение этого требования позволяет повысить эффективность доступа к информации и значительно сократить время на ее обработку, особенно при удаленной работе с большим объемом распределенных данных.

Отраслевой формат должен поддерживать операцию агрегирования, т.е. создания сложных составных объектов из простых и даже из других составных объектов.

Данные в отраслевом формате должны обладать прозрачностью. Поскольку любой объект должен иметь уникальный заголовок, который содержит информацию о типе и размере данных, то внешняя программа, не располагая информацией о структуре «чужих данных», все-таки знает их размер и, не нарушая целостности, может просто их игнорировать. А создавая дополнительные свойства используемых ею объектов и даже внедряя новые объекты в файл, она не разрушает его общей структуры.

В качестве отраслевого может быть использован только такой формат, который уже принят большим числом компаний на международном уровне и который имеет возможность передавать данные по сетям. Его структура не должна быть привязана к конкретному разработчику, должна обладать гибкостью и открытым описанием.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ФОРМАТОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ОТРАСЛЕВОГО. МИРОВОЙ ОПЫТ

Рассмотрим основные форматы хранения данных, используемые разработчиками в области ведения и проектирования технической документации.

Формат DWG является внутренним форматом компании Autodesk, Inc и предназначен в основном для хранения графической информации. Так же, как и остальная продукция Autodesk, он получил широкое распространение на мировом рынке. Например, многие разработчики программного обеспечения конвертируют графические данные именно в этот формат.

Однако помимо неоспоримых достоинств DWG обладает и рядом недостатков в части требований к универсальному формату хранения и обмена данных, который должен быть основой для единой системы электронного документооборота отрасли:

невозможность при необходимости вносить коррективы (главный недостаток), так как все права на DWG принадлежат компании Autodesk, Inc;

право компании Autodesk, Inc без всяких согласований вносить изменения в формат, в результате чего может быть нарушена работа построенной на DWG системы электронного документооборота;

отсутствие средств контроля документов на соответствие стандарту (верификации);

плохая приспособленность для хранения нерафической информации.

Последний из перечисленных недостатков вынуждает разработчиков, принявших данный формат в качестве основного, дополнительно использовать другие средства и формы хранения нерафической информации, которые зачастую не только не стандартизованы, но и плохо или вообще не документированы. Нерафические данные могут составлять значительную, иногда большую часть документации. И в этом случае о формате DWG можно говорить лишь как о составной части отраслевого формата. Но он не может быть частью отраслевого стандарта опять-таки в силу правообладания компанией Autodesk, Inc.

Есть мнение, что DWG является международным стандартом для хранения данных. Однако сами разработчики, взявшие за

основу этот формат, умалчивают о его недостаточности и тем самым негласно признают его несостоятельность в качестве претендента на роль универсального формата. И лишь ориентация на продукцию компании Autodesk, Inc делает для них удобным использование ее фирменных форматов.

Существуют также закрытые форматы для отдельных приложений САПР и других АС. Они тоже обладают недостатками, присущими DWG. Как правило, большая часть этих форматов хранения данных позволяет записать любую графическую информацию, а также любые данные со структурой любой сложности, которые могут использоваться для организации процессов автоматизации обработки технической документации. Но поскольку они являются собственностью отдельного разработчика, то либо полностью, либо частично теряют такие качества, как:

расширяемость;

компактность хранения данных;

возможность и последовательного, и произвольного доступа к данным;

возможность создания составных сложных объектов из базовых и других составных объектов;

прозрачность данных для различных приложений.

Таким образом, используемые в настоящее время форматы хранения данных не удовлетворяют требованиям ведения электронного документооборота.

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОРМАТОВ ОБМЕНА

Изучение мирового опыта по использованию форматов обмена данными позволяет выявить следующие основные тренды:

осознание недостаточности использования закрытых частных форматов, даже широко распространенных;

тенденция к разработке форматов с открытым описанием, облегчающим их применение, техническую поддержку и модификацию различными компаниями и отдельными разработчиками информационных систем;

интеграция различных информационных систем, удовлетворяющих требованиям отдельных производителей, в единое пространство на основе открытых стандартов, разрабатываемых рабочей группой из представителей всех заинтересованных сторон.

В процессе разработки открытых стандартов участвуют и многие всемирно известные производители собственных закрытых стандартов, в том числе компании, занимающиеся программным обеспечением для работы с графическими данными, такие как Microsoft, Autodesk, Inc, Corel Corp., Adobe.

Примером усилий по созданию открытых стандартов является разработка языка расширенной разметки XML (Extensible Markup Language) [13], спецификация которого была утверждена международной организацией W3C в феврале 1998 г. На его основе создано множество стандартов в различных предметных областях.

ВЫБОР XML КАК ОСНОВНОГО ОТРАСЛЕВОГО ФОРМАТА ОПИСАНИЯ ДАННЫХ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Современные информационные системы требуют более простых и понятных форматов представления данных по сравнению с DXF/DWG и механизмов, позволяющих определять структуру данных и описывать содержащиеся в них элементы. Этим требованиям отвечает язык расширенной разметки XML.

Сегодня в сфере САПР необходимо создавать и обрабатывать гигантские объемы разнообразной технической документации, представленной как в бумажном, так и в электронном виде. Она включает в себя схемы размещения оборудования, кабельные сети, принципиальные электрические схемы, монтажные схемы, заказные спецификации и т.д. Идея использовать XML для отраслевого стандарта заключается в стандартизации документов и представлении их в едином виде и формате, удобном для компьютерной обработки, передачи по сетям и понимания разработчиками. В этом заинтересованы все участники процесса интеграции.

Перечислим основные характеристики XML:

структурированность;

самоопределение;

расширяемость;

адаптированность к средству просмотра.

Рассмотрим их более подробно.

Начнем со структурированности. XML — это структурированный язык, XML-файл может быть одновременно хорошо структурированным и достоверным.

К XML-документам разработана технология определения типа документа для описания синтаксиса, грамматики и структуры данных (XML-схема). XML-схема также проверяет, является ли каждый из декларированных элементов обязательным, дополнительным или условным, есть ли диапазон допустимых значений параметра, имеется ли значение по умолчанию, допустим ли пустой тег.

С помощью XML-схем синтаксический анализатор XML определяет, является ли документ хорошо структурированным, т.е. содержит ли он должным образом определенные теги начала и конца, и достоверным, т.е. полностью ли согласуется со схемой. Разногласия недопустимы, и даже одна-единственная ошибка не позволит обработать весь документ. Лексический анализатор может автоматически проверять правильность документа с помощью встроенного описания схем, с помощью определенных внешним образом схем, используя описанные правила бизнес-логики или внешним образом определенный набор команд обработки.

Одно из наиболее значительных преимуществ подобной структуры — легкость, с которой можно определять соответствие атрибутов документа структурам базы данных или иерархиям объектов. Это обеспечивает прозрачный механизм для передачи документов между различными информационными системами, где XML является посредником при интеграции. То есть мы получаем возможность применять надежные средства извлечения информации из документов (лексический анализ).

Еще одно преимущество структуризации состоит в том, что XML понятен разработчику информационной системы, а также алгоритмам чтения-записи информации. Благодаря этому можно автоматизированно считывать информацию. Использование XML-схемы, которая содержит описания элементов в документе и всевозможные значения параметров, даже позволяет через

эти описания синхронизировать различные форматы. Например, такие технические документы, как принципиальная электрическая схема, могут содержать данные о связях и параметрах элементов схемы или другие специализированные данные, описанные как специальные атрибуты.

Важным свойством XML является возможность использовать самоопределяющиеся данные (хотя XML-документы и не требуют самоопределения — часто достаточно только структурирования). Можно добавлять специализированные описания — метаданные (Metadata), содержащие различную дополнительную информацию о документе, такую как защита (кто может его читать), а также смысловую (о чем документ, на каком языке высокого уровня он составлен, данные о разработчике и др.).

Следующая характеристика XML — расширяемость, т.е. возможность развиваться и настраиваться.

Одно из новых свойств XML состоит в том, что такие данные могут адаптироваться к различным модулям просмотра (в том числе на бумажном носителе после печати) без изменения самих данных. Но помимо этого XML позволяет адаптироваться к различиям аппаратного и программного обеспечения и особенностям восприятия читателей.

СТРУКТУРА ОТРАСЛЕВОГО ФОРМАТА

На основании рассмотренных выше требований был разработан ОФ-ТД, который позволяет представить всю необходимую документацию на технические устройства транспортной отрасли (рис. 4). ОФ-ТД содержит как информацию об изображении чертежа (в универсальном формате векторной графики Scalable Vector Graphics, SVG), так и модель изображенного на ней элемента или схемы. При этом приложение может извлекать необходимую информацию по требованию (только графику, или только модель, или и то и другое). Также чертеж в ОФ-ТД может быть прочитан и специализированным приложением, и обычным браузером.

Документ содержит изображения находящихся в нем элементов, описанных в виде примитивов на языке SVG. Изображение определено в специальном блоке и расположено внутри каждого листа документа.

Изображение, описанное на языке SVG, может состоять из блоков, соответствующих элементам на листе документа, каждый из которых связан с соответствующим изображением данного элемента. Такой подход позволяет просто извлекать изображение необходимого листа целиком или конкретного элемента на листе.

Сегодня ОФ-ТД уже используется в ОАО «РЖД» для обмена информацией между АС, а также для обмена данными с системами автоматизированного проектирования. В частности, он используется для описания устройств и представления технической документации на устройства автоматики и телемеханики, а также применяется в модулях отраслевых САПР и системы документооборота технической документации ОАО «РЖД» (КЗ АРМ-ВТД). Планируется развитие системы для автоматизации процедуры документооборота не только по схемам ЖАТ, но и по схемам технической диагностики и их непрерывного мониторинга [14–17].



Рис. 4. **Структура ОФ-ТД**

Литература

1. Тележенко Т. А. Применение методов моделирования в системах автоматизированного проектирования // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2006. № 2 (7). С. 66–72. ISSN 1815-588X.
2. Автоматизация проверки проектов на основе АРМ-ТЕСТ / Б. Ф. Безродный, М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. 2008. № 3. С. 22–24. ISSN 0005-2329.
3. Тележенко Т. А. Автоматизированная система экспертизы схемных решений ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2009. № 5. С. 24–26. ISSN 0005-2329.
4. Автоматизация проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики на базе АРМ-ПТД версии 6 / Б. П. Денисов, Н. И. Рубинштейн, С. Н. Растегаев, Н. Ю. Воробей // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. ; под ред. Вл. В. Сапожникова. СПб. : ПГУПС, 2013. С. 66–74.
5. Формализация алгоритмического описания систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики / П. Е. Булавский, Д. С. Марков, В. Б. Соколов, Т. Ю. Константинова // Автоматика на транспорте. 2015. Т. 1. № 4. С. 418–432. ISSN 2412-9186.
6. Булавский П. Е., Марков Д. С. Методика оценки временных характеристик процессов электронного документооборота технической документации // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 1. С. 81–94. ISSN 2412-9186.
7. Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения в XX — начале XXI века / Под ред. В. В. Сапожникова и Вл. В. Сапожникова. СПб. : ПГУПС, 2009. 346 с.
8. Горбачев А. М. Автоматизация анализа, экспертизы и сверки технической документации системы железнодорожной автоматики и телемеханики // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2012. № 4 (33). С. 73–78. ISSN 1815-588X.
9. Василенко М. Н., Ковалев Р. А. Методы выделения текстовых выражений принципиальных электрических схем железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 4. ISSN 2412-9186.
10. Седых Д. В., Суханов С. А. Применение отраслевого формата технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики для интеграции приложений // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2005. № 3 (4). С. 74–79. ISSN 1815-588X.
11. Проблемы внедрения отраслевого формата / Н. Н. Балуев, М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. 2010. № 3. С. 2. ISSN 0005-2329.
12. Развитие электронного документооборота в хозяйстве АТ / М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Зуев, Д. В. Седых // Автоматика связь, информатика. 2015. № 1. С. 14–16. ISSN 0005-2329.
13. XML. Работа с XML / Д. Хантер, Дж. Рафтер, Д. Фаусетт и др. М. : Диалектика, 2009. 1344 с.
14. Лыков А. А., Ефанов Д. В., Власенко С. В. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 5. С. 67–72. ISSN 1994-831X.
15. Ефанов Д. В. Некоторые аспекты развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Транспорт Урала. 2015. № 1 (44). С. 35–40. ISSN 1815-9400.
16. Ефанов Д. В. Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 1. С. 124–148. ISSN 2412-9186.
17. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : моногр. СПб. : Изд-во ПГУПС, 2016.

References

1. Telezhenko T. A. Primenenie metodov modelirovaniya v sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya [Use of modeling methods in computer-aided design systems] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya. 2006. № 2 (7). S. 66–72. ISSN 1815-588X.
2. Avtomatizaciya proverki proektov na osnove ARM-TEST / B. F. Bezrodnyy, M. N. Vasilenko, B. P. Denisov, D. V. Sedykh [Automation of verification for designs based on ARM-TEST] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2008. № 3. S. 22–24. ISSN 0005-2329.
3. Telezhenko T. A. Avtomatizirovannaya sistema ekspertizy skhemnykh reshenij ZhAT [An automated system for RAT circuit solutions evaluation] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2008. № 5. S. 24-26. ISSN 0005-2329.
4. Avtomatizaciya proektirovaniya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki na baze ARM-PTD versii 6 / B. P. Denisov, N. I. Rubinshtein, S. N. Rastegaev, N. Yu. Vorobey [Automation of railway automatics and telemechanics systems design based on ARM-PTD ver. 6] // Aktualnye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki : sb. nauch. tr. ; pod red. Vl. V. Sapozhnikova. SPb. : PGUPS, 2013. S. 66–74.
5. Formalizaciya algoritmicheskogo opisaniya sistem obespecheniya zhiznennogo cikla zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki / P. E. Bulavskij, D. S. Markov, V. B. Sokolov, T. Yu. Konstantinova [Formalization of algorithmic description of the railway automatics and telemechanics systems life cycle upkeep systems] // Avtomatika na transporte. 2015. T. 1. № 4. S. 418–432. ISSN 2412-9186.
6. Bulavskiy P. E., Markov D. S. Metodika ocenki vremennykh kharakteristik processov elektronnogo dokumentooborota tekhnicheskoj dokumentacii [The method of estimation of temp characteristics of execution of processes of technical documentation electronic management] // Avtomatika na transporte. 2016. T. 2. № 1. S. 81–94. ISSN 2412-9186.
7. Kafedra «Avtomatika i telemekhanika na zheleznykh dorogakh» Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya v XX — nachale XXI veka / Pod red. V. V. Sapozhnikova i Vl. V. Sapozhnikova [Department of Automation and Telemechanics on the Railway of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University in XX — early XXI centuries / Ed. by V. V. Sapozhnikov and Vl. V. Sapozhnikov]. SPb. : PGUPS, 2009. 346 s.
8. Gorbachev A. M. Avtomatizaciya analiza, ekspertizy i sverki tekhnicheskoj dokumentacii sistemy zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [Automation of analysis, evaluation and checking technical documentation of railway automatics and telemechanics system] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya. 2012. № 4 (33). S. 73–78. ISSN 1815-588X.
9. Vasilenko M. N., Kovalyov R. A. Metody vydeleniya tekstovykh vyrazhenij principialnykh elektricheskikh skhem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [Methods of highlighting textual expressions in electric circuit diagrams of railway automatics and telemechanics systems] // Avtomatika na transporte. 2016. T. 2. № 4. ISSN 2412-9186.
10. Sedykh D. V., Sukhanov S. A. Primenenie otraslevogo formata tekhnicheskoj dokumentacii na ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki dlya integracii prilozhenij [Use of the industrial technical documentation standard in railway automatics and telemechanics devices for application integration] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya. 2005. № 3 (4). S. 74–79. ISSN 1815-588X.
11. Problemy vnedreniya otraslevogo formata / N. N. Baluev, M. N. Vasilenko, V. G. Trokhov, D. V. Sedykh [Problems of the industrial format integration] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2010. № 3. S. 2. ISSN 0005-2329.
12. Razvitie elektronnogo dokumentooborota v hozyajstve AT / M. N. Vasilenko, V. G. Trokhov, D. V. Zuev, D. V. Sedykh [Development of electronic documents exchange in the AT economics] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2015. № 1. S. 14–16. ISSN 0005-2329.
13. XML. Rabota s XML [XML. Working with XML] / D. Hunter, J. Rafter, D. Fawcett i dr. M. : Dialectika, 2009. 1344 p.
14. Lykov A. A., Efanov D. V., Vlasenko S. V. Tekhnicheskoe diagnostirovanie i monitoring sostoyaniya ustrojstv ZhAT [Technical diagnostics and monitoring of RAT devices] // Transport Rossijskoj Federacii. 2012. № 5. S. 67–72. ISSN 1994-831X.
15. Efanov D. V. Nekotorye aspekty razvitiya sistem funkcionalnogo kontrolya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [Development aspects of functional control systems of railway automation and telemechanics devices] // Transport Urala. 2015. № 1 (44). S. 35-40. ISSN 1815-9400.
16. Efanov D. V. Stanovlenie i perspektivy razvitiya sistem funkcionalnogo kontrolya i monitoringa ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [The founding and prospects of functional control and monitoring systems for railway automatics and telemechanics devices] // Avtomatika na transporte. 2016. T. 2. № 1. S. 124–148. ISSN 2412-9186.
17. Efanov D. V. Funkcionalnyj kontrol i monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki : monogr. [Functional control and monitoring of railway automatics and telemechanics devices : monograph]. SPb. : Izd-vo PGUPS, 2016.

УДК 656.257

Юрий Валерьевич Могильников, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ ОБОГРЕВА УСТРОЙСТВ СЦБ

Yuriy Valeryevich Mogilnikov, Assistant, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Automated heating edjustment system for signals and interlocking devices

Аннотация

В статье рассмотрены существующие системы обогрева стрелочных электроприводов и показаны их недостатки, которые могут привести к обледенению контактов и потере контроля положения стрелки, а следовательно, к перерывам в движении поездов. Предложена система, позволяющая поддерживать положительные температуры внутри корпуса электропривода и тем самым предотвратить возникновение конденсата, заиндевения и наледи при резких перепадах температур в осенние и весенние периоды.

Ключевые слова: электропривод, обогрев, наледь, термореле, термодатчик, температура, система автоматической регулировки.

Summary

The article reviews the existing points electric drives heating systems and their shortcomings that may cause icing of the contacts and loss of point position control, with consequently, train service interruption. A system is proposed enabling the upkeep of positive temperatures inside the electric drive case and thus prevent the formation of condensation, hoarfrost and icing caused by abrupt temperature changes in autumn and spring.

Keywords: electric drive, heating, icing, thermal relay, thermal sensor, temperature, automatic regulation system.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-58-61

Повышение эффективности перевозочного процесса на железных дорогах требует постоянного совершенствования комплекса технических средств и сооружений. Не являются исключением и системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), обеспечивающие в том числе безопасность и надежность движения поездов на перегонах и станциях [1]. Одним из направлений развития СЖАТ является повышение эксплуатационной надежности технических средств, что позволяет сократить затраты на их обслуживание и минимизировать перерывы в движении поездов [2].

Напольные устройства автоматики эксплуатируются в тяжелых динамических и климатических условиях, но должны сохранять свои рабочие характеристики при различных температурных режимах. Например, в зимний период для обеспечения бесперебойного и безопасного движения поездов и для исключения образования наледи в стрелочных электроприводах применяется такой эффективный способ, как электрообогрев [3]. В частности, в электроприводах с контактными автопереключателями в виде ножей и колодок обогреватели (проволочные эмалированные резисторы ПЭВ-25–56) устанавливаются непосредственно над контактами автопереключателя (рис. 1) для улучшения их обогрева при минимальных затратах электроэнергии [4]. В горочных электроприводах, где используются бесконтактные автопереключатели, резисторы размещают рядом с редуктором на специально изготовленном креплении [5]. В электроприводах типа ВСП, чтобы поддерживать постоянный внутренний микроклимат, на раме рядом с микропереключателями устанавливают резистор типа ПЭВ-25–56. Для включения нагревательного элемента в общую схему электрообогрева применяется запасная пара жил в действующем кабеле и дополнительный внутренний монтаж электропривода [6]. В последних моделях электроприводов серии ВСП уже предусмотрен обогрев блоков микропереключателей, а внутренняя поверхность крышки электропривода имеет антиконденсатное покрытие [6].

Однако следует отметить, что до сих пор во всех этих схемах включение и отключение обогрева напольных устройств, в том числе электроприводов, происходит вручную — включением и выключением в цепь питания обогрева предохранителя по приказу начальника дистанции или при наступлении устоявшихся холодов. В осенние и весенние периоды, когда случаются резкие перепады температур, при выключенном

e-mail: YuMogilnikov@usurt.ru
Дата поступления: 03.10.2016

обогреве в напольных устройствах может возникнуть конденсат, а позже заиндевение и наледь, что может привести к сбою в устройствах СЦБ и, как следствие, к задержке поездов и угрозе безопасности движения. Этого можно избежать, если автоматизировать процесс включения обогрева в зависимости от температуры наружного воздуха.



Рис. 1. **Обогрев контактов автопереключателя**

В разработанной нами системе автоматизация достигается за счет установки блока регулировки напряжения в существующую схему обогрева стрелочных электроприводов (рис. 2). Блок размещается между предохранителями и понижающими трансформаторами и управляется температурным датчиком, который измеряет уличную температуру воздуха. Это позволяет использовать действующую схему питания для группы стрелок (например, для станции в целом, горловины или другой группы), производить монтаж на посту ЭЦ, а отрегулированное напряжение обогрева уже поступает на напольные устройства по существующим цепям. Кроме того, предлагаемое решение можно адаптировать и для электрообогрева стрелок горочной автоматической централизации.

Основным элементом блока регулировки напряжения является термореле ТР-15. В комплект входит само реле и термодатчик ТД-1–1, которые поставляются и вместе, и по отдельности. Связка ТД-1–1 и ТР-15 уже используется во многих устройствах СЦБ, что подтверждает ее надежность и функциональность.

Рассмотрим принцип их работы (рис. 3). Термореле вращающимися ручками настраивается на определенную температуру включения и режим работы. В режиме нагревания реле встает под ток при понижении температуры до заданной величины. Термодатчик ТД-1–1 работает в диапазоне от –45 до +85 °С и имеет точность 0,5 град. Большой диапазон температур термодатчика соответствует условиям, в которых эксплуатируются электроприводы, а точность позволяет поддерживать плавную регулировку без резких скачков.

В напольных устройствах используют несколько уровней обогрева, что позволяет достичь устойчивой температуры, избежать перегрева и сэкономить электроэнергию. Мы выбрали три уровня обогрева (рис. 4) как компромисс между плавностью регулировки напряжения и сложностью схемы. Первый уровень обогрева включается при +3 °С. Это сделано для того, чтобы при падении температуры наружного воздуха ниже 0 °С в электроприводе уже установилась положительная температура. Второй и третий уровни включаются соответственно при –5 и –15 °С.

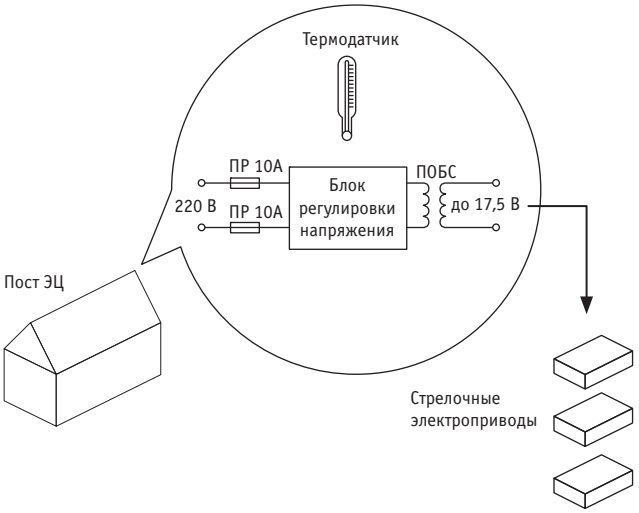


Рис. 2. **Автоматизированное включение обогрева стрелочных электроприводов**

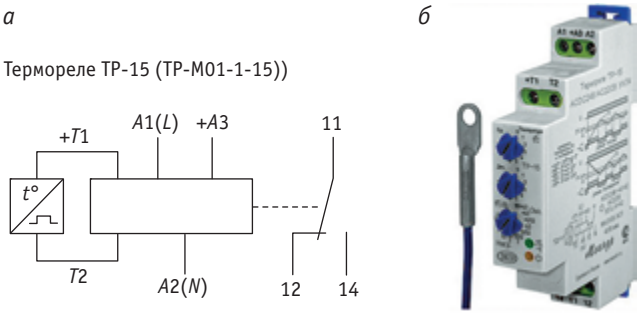


Рис. 3. **Схема подключения (*а*) и внешний вид термореле (*б*)**

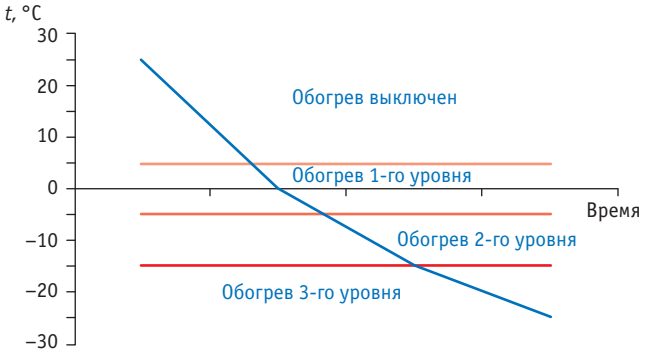


Рис. 4. **Зависимость включения уровней обогрева от температуры наружного воздуха**

Для реализации ступенчатого изменения напряжения нами используется трансформатор ПОБС-3А. Его выбор обусловлен подходящими номиналами напряжений и возможностью изменения выходного напряжения в небольших пределах. Изменение напряжения на выводах 9–11 вторичной обмотки происходит за счет последовательного подключения к ней вторичных обмоток 6–7 и 7–8 в противофазу. В итоге напряжение питания составляет 193, 210,4 и 222 В соответственно для первого, второго и третьего уровней обогрева (рис. 5). Схема включения обмоток трансформатора ПОБС-3А и контактов термореле, осуществляющая регулировку напряжения, представлена на рис. 6.

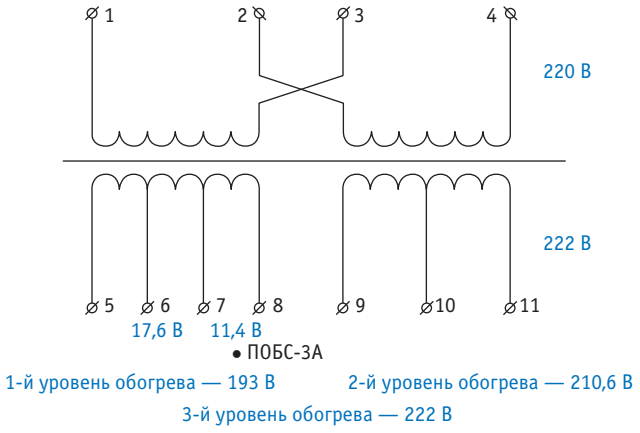


Рис. 5. **Выбор обмоток трансформатора**

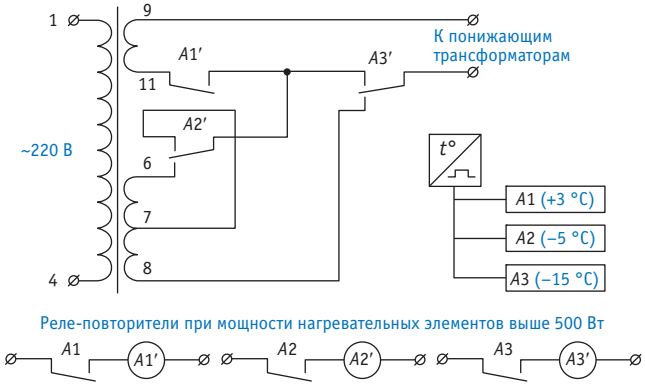


Рис. 6. **Блок регулировки напряжения**

Для определения трех температур градации обогрева необходимо иметь три термореле ТР-15, настроенных на соответствующие температуры срабатывания. Поскольку максимальная коммутируемая мощность термореле составляет 500 Вт, для крупных групп стрелочных электроприводов (больше 50) следует использовать реле-повторители.

Индикация уже реализована на лицевой панели термореле ТР-15 (рис. 7). При срабатывании реле загорается желтый светодиод. Количество горящих желтых светодиодов соответствует активному уровню обогрева. При неправильной настройке или неисправности термореле поочередно мигают синий и красный светодиоды.

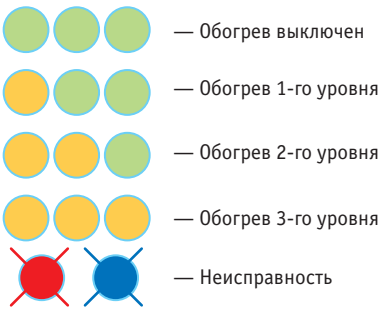


Рис. 7. **Индикация на лицевой панели термореле ТР-15**

Для проверки работоспособности предлагаемой системы нами проведены опытные испытания на посту МЭЦ станции Чусовской, имеющем отдельную цепь питания обогрева для небольшой группы в 16 стрелочных электроприводов. На рис. 8 представлены данные об изменении температуры воздуха, а также температуры в стрелочном электроприводе при выключенном обогреве и при использовании системы автоматической регулировки обогрева устройств СЦБ. Как видно из рис. 8, при автоматизированной системе температура в стрелочном электроприводе не понижается до отрицательных значений, что предотвращает образование инея и наледи, способствует высыханию конденсата.

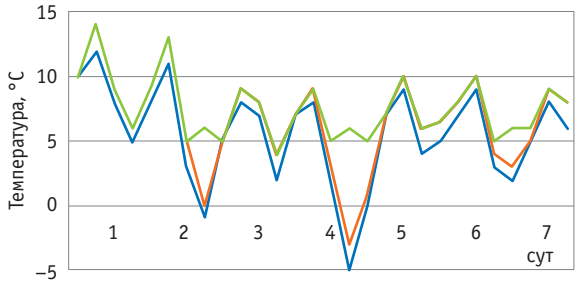


Рис. 8. **Результаты испытаний системы автоматического включения обогрева стрелочных электроприводов:**
— температура воздуха; — температура электропривода;
— температура электропривода с автоматическим подогревом

Таким образом, можно сделать вывод, что предлагаемая система автоматической регулировки обогрева позволяет поддерживать положительные температуры в электроприводах, предотвращая возникновение инея и наледи на контактах автопереключателя. В конечном счете это даст возможность предупредить сбои в работе устройств СЦБ и повысить безопасность движения поездов.

Литература

1. Сисин В. А. Математическое моделирование работы тональных рельсовых цепей // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 45–49. ISSN 1815-9400.
2. Ицкович Б. С. Эффективность — путь к развитию // Железнодорожный транспорт. 2014. № 11. С. 47–49. ISSN 0044-4448.
3. Осмоловский Д. В. Новая система электрообогрева стрелочных переводов // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 10. С. 27–29. ISSN 0005-2329.
4. Казаков А. А., Бубнов В. Д., Казаков Е. А. Станционные устройства автоматики и телемеханики. М. : Транспорт, 1990. 431 с.
5. Федосимов С. И. Электропривод будет работать надежней // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 3. С. 44. ISSN 0005-2329.
6. Селиванов Д. И., Кузьмин Г. Н., Минаков Е. Ю. Предложения по доработке ВСП // Автоматика, связь, информатика. 2008. № 8. С. 28–29. ISSN 0005-2329.

References

1. Sisin V. A. Matematicheskoe modelirovanie raboty tonalnykh relsovykh cepej [Mathematical modeling of audio frequency track circuits] // Transport Urala. 2015. № 3 (46). S. 45-49. ISSN 1815-9400.
2. Itskovich B. S. Effektivnost — put k razvitiyu [Efficiency — path to development] // Zheleznodorozhnyj transport. 2014. № 11. S. 47–49. ISSN 0044-4448.
3. Osmolovskiy D. V. Novaya sistema elektroobogreva strelochnykh perevodov [A new system of points mechanisms electrical heating] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2011. № 10. S. 27–29. ISSN 0005-2329.
4. Kazakov A. A., Bubnov V. D., Kazakov E. A. Stancionnye ustrojstva avtomatiki i telemekhaniki [Station automatics and telemechanics devices]. M. : Transport, 1990. 431 s.
5. Fedosimov S. I. Elektroprivod budet rabotat nadyozhnej [The electric drive operation will be more reliable] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2012. № 3. S. 44. ISSN 0005-2329.
6. Selivanov D. I., Kuzmin G. N., Minakov E. Yu. Predlozheniya po dorabotke VSP [Offers for VSP improvement] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2008. № 8. S. 28-29. ISSN 0005-2329.

Борис Эйнихович Глюзберг, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Стрелочное хозяйство» АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия,
Наталия Владимировна Рессина, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Совершенствование конструкции ВСП» АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия,
Сергей Петрович Кузнецов, главный инженер ОАО «БЭТ», Москва, Россия,
Игорь Николаевич Старухин, начальник технического управления ОАО «БЭТ», Москва, Россия

НОВЫЕ ВИДЫ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ОСНОВАНИЯ ДЛЯ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

Boris Eynikhovich Glyuzberg, DSc in Engineering, Professor, Head of the Laboratory «Turnout Facilities», «VNIIZhT» JSC, Moscow, Russia,
Nataliya Vladimirovna Ressina, PhD in Engineering, Leading Researcher, Laboratory «Upper Track Improvement», «VNIIZhT» JSC, Moscow, Russia,
Sergey Petrovich Kuznetsov, Head Engineer, «BET» JSC, Moscow, Russia,
Igor Nikolayevich Starukhin, Head of Technical Management, «BET» JSC, Moscow, Russia

New types of reinforced concrete foundations for points

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы унификации конструкции железобетонного основания для стрелочных переводов и технологии его производства. Изложены результаты разработок по внедрению современных технологий изготовления железобетонных брусьев на заводах ОАО «БЭТ». Приведены данные по апробации технологий, позволившие изготовить комплекты брусьев для внедряемых в настоящее время стрелочных переводов новых проектов.

Ключевые слова: стрелочные переводы, железобетонные брусья, новые направления разработок, стендовая технология, опыт применения.

Summary

The article reviews the questions of unifying the design of reinforced concrete foundations for points and technologies of their manufacturing. The results of integrating modern production technologies of reinforced concrete beams manufacture at «BET» JSC factories are presented. Data is presented on approval of the technologies for manufacturing beam sets for the presently introduced new types of points.

Keywords: points, reinforced concrete beams, ned development directions, testbed technology, operating experience.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-62-65

Реализация программы развития магистральных железных дорог России требует подготовки инфраструктуры и стрелочного хозяйства как ее важной составляющей. При создании полигонов высокоскоростного и тяжеловесного движения, ресурсосберегающих технологий потребуется разработка специальных модельных рядов стрелочной продукции, а фактически нового ее поколения [1]. Для этого необходима современная элементная база, важнейшей составляющей которой является основание стрелочных переводов [2].

В настоящее время и на ближайшую перспективу основным видом подрельсового основания для стрелочной продукции останутся железобетонные брусья. Главным производителем железобетонного основания для стрелочных переводов России являются заводы ОАО «БЭТ».

За последние годы разработаны и внедрены в производство брусья для высокоскоростных стрелочных переводов типа Р65 марки 1/11 с двумя приводами на стрелке и двумя на крестовине (проект 2956), одиночного съезда типа Р65 марки 1/11 для высокоскоростного движения с шириной междупутья 4100, 4232, 4497, 4629, 4805, 5202 мм (проект 2968) [3]. Запущены в производство комплекты брусьев для перекрестного съезда марки 2/9 (глухое пересечение) с междупутьем 5,3 м с шурупно-дюбельным прикреплением (проект 2999); усовершенствованного стрелочного перевода марки 1/6 с шурупно-дюбельным прикреплением (проект 2946); стрелочного перевода типа Р65 марки 1/9 (проект 2796); одиночного съезда марки 1/9 для путей 1-го и 2-го классов с шириной междупутья 4247, 4366, 4486, 4605 мм (проект 3066); уравнительных стыков с шурупно-дюбельным прикреплением (проекты 848 и 3051).

В настоящее время на заводах ОАО «БЭТ» 100 % железобетонных брусьев для нужд ОАО «РЖД» изготавливается на технологических линиях производства РПУ «Могилевский завод «Строммашина» (Могилев, Республика Беларусь) по агрегатно-

e-mail: Glusberg@mail.ru, vsp104@yandex.ru, kuznecovsp@beteltrans.ru, istaruhin@beteltrans.ru
Дата поступления: 03.10.2016

поточной технологии. Линии оснащены оборудованием, разработанным в 1950-х гг., и имеют физический износ до 80%. Изготовление брусьев производится в длинных 14-метровых десятиместных формах по 2–5 брусьев в 2 ряда (рис. 1).

Формы последовательно перемещаются по конвейеру и краном по отдельным технологическим постам. Армируются брусья проволокой диаметром 3 мм. Усилия предварительного напряжения передаются на арматуру непосредственно через форму с помощью натяжного устройства. Когда бетон приобретает достаточную прочность, усилия напряжения с формы снимаются, и напряжение передается непосредственно на бетон шпалы.

К недостаткам данной технологии относятся:

невозможность гибкой переналадки металлоформ под изготовление различных проектов стрелочных переводов, в том числе под новые современные рельсовые скрепления. Для изготовления каждого проекта стрелочного перевода необходимо приобретать отдельный комплект металлоформ (в среднем 12–14 на типовой проект);

невозможность изменять армирование для повышения прочностных характеристик брусьев под участки пути с тяжеловесным движением;

невозможность повысить допуски геометрических параметров (в том числе колееобразующих размеров) брусьев из-за конструктивных особенностей применяемых металлоформ, которые в силу большой длины и малой жесткости в процессе эксплуатации приобретают значительные пластические деформации, в результате чего брусья имеют нестабильную геометрию.

В ходе изготовления железобетонных брусьев для новых проектов стрелочных переводов, в том числе малосерийных и индивидуальных проектов, и для обеспечения высоких темпов внедрения возникает необходимость унификации конструкции брусьев, а также технологии их производства [4].

Анализ мирового опыта показал, что оптимальной является стендовая технология — «длинный стенд». По этой технологии брусья изготавливаются в неподвижной металлоформе — стенде, а их номенклатура меняется за счет несложной переоснастки (смена поддонных пластин, формирующих верхнюю поверхность брусьев, и разделительных диафрагм, обеспечивающих их необходимую длину).

В 2013 г. специалистами ОАО «БЭТ» и ОАО «ВНИИЖТ» была создана конструкция брусьев трапециевидного сечения с постоянной высотой по всей длине и различными вариантами рельсовых скреплений и армирования.

Для новой конструкции совместно с ОАО «ММК-Метиз» были разработаны технические условия на высокопрочную арматурную проволоку диаметром 7,5 мм и организовано ее производство. Переход на проволоку такого диаметра позволяет упростить технологию армирования (число проволок в сечении уменьшается с 48 до 12). При этом допустимые усилия, которые может выдержать брус, увеличиваются с 400 до 500 кН. Для производства брусьев были разработаны и изготовлены специальные металлоформы, имитирующие «длинный стенд» (рис. 2), и плиты, формирующие верхнюю поверхность бруса (рис. 3).



Рис. 1. **Комплект форм для изготовления брусьев**



Рис. 2. **Специальные металлоформы, имитирующие «длинный стенд»**



Рис. 3. **Плиты, формирующие верхнюю поверхность бруса**

На первом этапе на Вяземском заводе ЖБШ — филиале ОАО «БЭТ» были изготовлены и уложены для испытаний на экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» опытные одиночные брусья с вариантами рельсовых скреплений — шурупно-дюбельным и болтовым (с закладными болтами). Кроме того, были апробированы различные способы прикрепления рельсовых элементов стрелочного перевода к брусьям (рис. 4).



Рис. 4. **Варианты размещения различных скреплений на брусьях для новых стрелочных переводов**

На втором этапе изготовлены два комплекта брусьев: для стрелочного перевода марки 1/11 производства компании «Фосло Кожифер», предназначенного для тяжеловесного движения и уложенного в ноябре 2014 г. при эксплуатационных испытаниях на ст. Орехово-Зуево Московской дирекции инфраструктуры, и стрелочного перевода марки 1/11, разработанного ОАО «МСЗ» (рис. 5) и уложенного в 2015 г. на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ». Эксплуатационные испытания показали высокую надежность новой конструкции брусьев.

В 2016 г. был изготовлен комплект брусьев для стрелочного перевода марки 1/22 для высокоскоростного движения, разработанного ОАО «Новосибирский стрелочный завод», укладка которого запланирована на Октябрьской железной дороге. Брусья такой же конструкции будут использоваться и при модернизации в 2016–2017 гг. стрелочного перевода марки 1/18. В перспективе для организации высокоскоростного железнодорожного движения в России при строительстве участка Москва — Казань линии ВСМ-2 запланирована разработка железобетонного основания и для более пологих марок стрелочных переводов, вплоть до марки 1/46.



Рис. 5. **Стрелочный перевод конструкции Муромского стрелочного завода**

Главное отличие нового вида основания заключается в способе прикрепления металлических частей стрелочного перевода, позволяющего реализовать универсальную стендовую технологию изготовления брусьев и применить новые современные виды скреплений.

Преимущества стендовой технологии:

изготовление железобетонных брусьев для широкой номенклатуры стрелочных переводов без приобретения парка металлоформ под каждый проект;

несложная переналадка съемной оснастки, позволяющая гибко изменять номенклатуру изготавливаемых брусьев в соответствии с требованиями заказчика и армирование брусьев для повышения их прочностных характеристик;

обеспечение более жестких, отвечающих современным требованиям, допусков геометрических параметров брусьев;

повышение качества и долговечности брусьев за счет применения малопрогревных режимов тепловой обработки при наборе прочности бетона;

улучшение условий труда.

ВЫВОДЫ

1. Инновационные технологии изготовления брусьев открывают большие перспективы разработки новых технических средств для стрелочного хозяйства железных дорог России.

2. Внедрение новых технологий изготовления подрельсового основания для стрелочных переводов обеспечит увеличение допустимой нагрузки на брусья с 400 до 500 кН и применение в конструкции стрелочных переводов инновационных видов промежуточных скреплений. Это позволит приступить к проектированию модельных рядов стрелочной продукции для полигонов скоростного и тяжеловесного движения.

Литература

1. Глюзберг Б. Э. Основные направления развития стрелочных переводов для ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2012. № 3. С. 18–23. ISSN 0044-4448.
2. Глюзберг Б. Э. Модернизация и совершенствование стрелочных переводов // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 54–57. ISSN 0044-4448.
3. Рессина Н. В. Железобетонные брусья для высокоскоростных стрелочных переводов // Внедрение современных конструкций и технологий в путевое хозяйство : сб. матер. науч.-техн. конф. РОАТ МИИТ. М. : ИЦ «АИСНт», 2010. С. 324–326.
4. Рессина Н. В., Хвостик М. Ю., Макаренко Е. А. Новая технология железобетонных брусьев // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 12. С. 29–31. ISSN 0131–5765.

References

1. Glyuzberg B. E. Osnovnye napravleniya razvitiya strelochnykh perevodov dlya OAO «RZhD» [Principal directions of points development for «RZhD» JSC] // Zheleznodorozhnyj transport. 2012. № 3. S. 18–23. ISSN 0044-4448.
2. Glyuzberg B. E. Modernizaciya i sovershenstvovanie strelochnykh perevodov [Modernization and improvement of the points] // Zheleznodorozhnyj transport. 2015. № 7. S. 54–57. ISSN 0044-4448.
3. Ressina N. V. Zhelezobetonnye brusya dlya vysokoskorostnykh strelochnykh perevodov [Reinforced concrete beams for high-speed points] // Vnedrenie sovremennykh konstrukcij i tekhnologij v putevoe khozyajstvo : sb. mater. nauch.-tekhn. konf. ROAT MIIT. M. : ITs «AISNt», 2010. S. 324–326.
4. Ressina N. V., Khvostik M. Yu., Makarenko E. A. Novaya tekhnologiya zhelezobetonnykh brusyev [New reinforced concrete beams technology] // Put i putevoe khozyajstvo. 2011. № 12. S. 29–31. ISSN 0131-5765.

УДК 656.225

Александр Эрнстович Александров, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Александр Владимирович Сурин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПОЕЗДООБРАЗОВАНИЯ И ПРОДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В ОПЕРАТИВНОМ ПЛАНИРОВАНИИ

Alexander Ernstovich Alexandrov, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Alexander Vladimirovich Surin, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Method of using imitation models of train formation and movement in operation planning

Аннотация

Оперативное планирование — важнейший инструмент управления перевозками. Современная технология планирования поездообразования и поездной работы предполагает автоматизацию интеллектуальных прогнозных функций. Эти функции могут быть реализованы на основе имитационных моделей сортировочных станций и моделей продвижения поездов по полигону дороги. Статья посвящена методике расчетов на имитационных моделях сменно-суточных планов работы дороги и определению технологического эффекта от автоматизации таких расчетов.

Ключевые слова: информационные технологии, оперативное планирование поездной работы, период расчета, период планирования, имитационная модель, входной поток, выходной поток, модель продвижения поездов.

Summary

Operation planning is the most important tool in transport management. The modern technology of train formation is the most important tool of traffic control. The modern technology of train formation and train operation planning presumes automation of the intellectual prediction functions. Those functions can be implemented based on imitation models of sorting stations and models of train movement on the railway testing ground. The article is dedicated to a method of calculating shift-day schedules of railway operation based on imitation models and defining the technological effect of automating such calculations.

Keywords: information technologies, operative planning of train operation, calculation period, imitation model, inflow, outflow, train movement model.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-66-70

Данная статья является логическим продолжением статьи [1], в которой выполнен системный анализ сменно-суточного планирования работы железной дороги. Функциональная модель позволила определить узкое место исследуемой технологии — прогноз поездообразования и продвижения поездов, выполняемый без достаточной поддержки программно-технического комплекса, т.е. практически вручную (рис. 1). Снять проблему предложено путем автоматизации расчетов с использованием имитационных моделей. Выбор типа моделей и их описание можно найти в [2–4], а теоретические основы применяемого метода моделирования — в [5].

Отдельными важными задачами являются разработка методики использования моделей поездообразования и продвижения поездов и оценка технологического эффекта такой методики. Решению этих задач посвящена данная статья.

В качестве объекта выбран главный ход Свердловской железной дороги (рис. 2). Он представляет собой мощный транспортный комплекс с большим техническим потенциалом, обеспечивающий транспортно-экономические связи индустриальных районов Урала и Западной Сибири с центральными, восточными и западными регионами России. Здесь поездообразование в рамках сменно-суточного плана дороги необходимо рассчитывать для трех сетевых сортировочных станций — Пермь-Сортировочная, Екатеринбург-Сортировочный и Войновка. Сортировочные станции на периоде расчета — это активные объекты с точки зрения формирования исходных данных. Результаты работы одних станций служат исходными данными для прогноза работы других станций. Требуется определить состав этих данных, количество необходимых расчетов (имитационных прогонов моделей) и их последовательность.

В общем случае для выполнения расчета прогноза поездообразования на сортировочной станции используется информация, приведенная ниже.

e-mail: y24185@ya.ru, ASurin@usurt.ru
Дата поступления: 30.11.2016

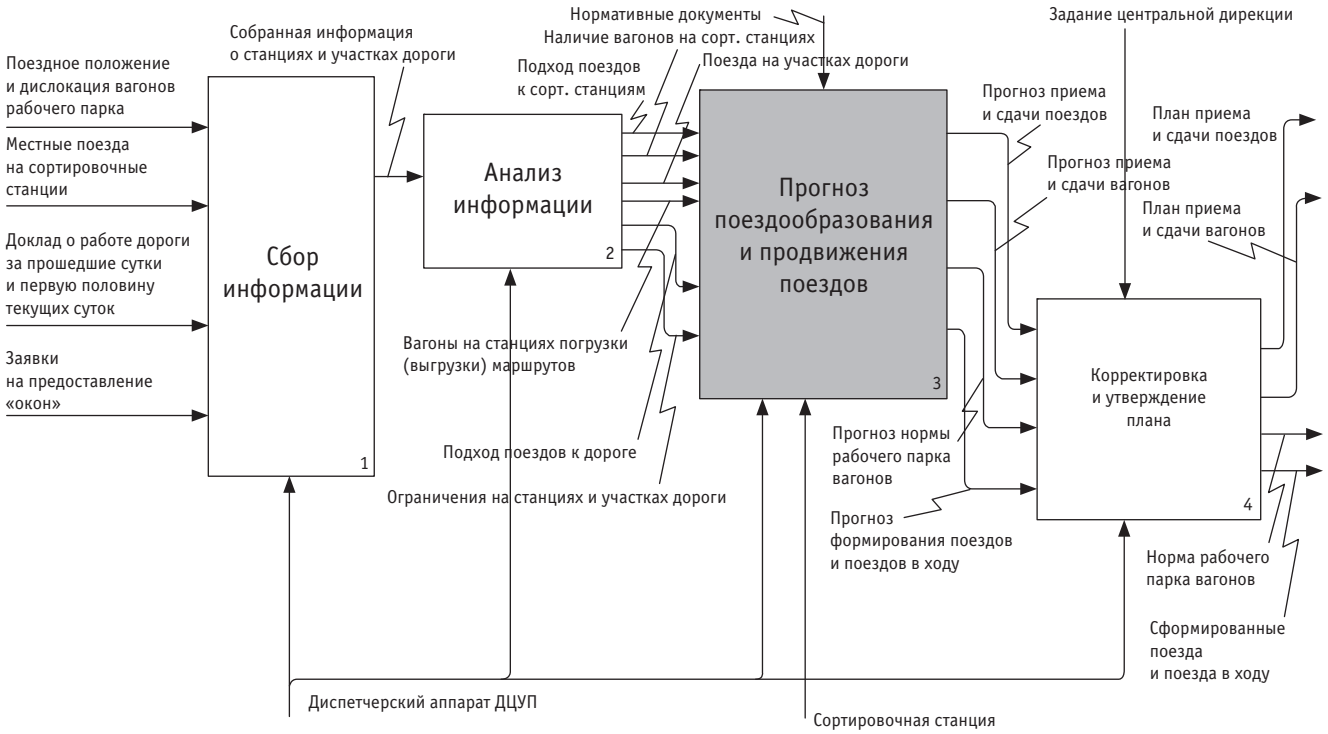


***Рис. 1*. Функциональная А1 диаграмма. Сменно-суточное планирование поездной работы дороги**

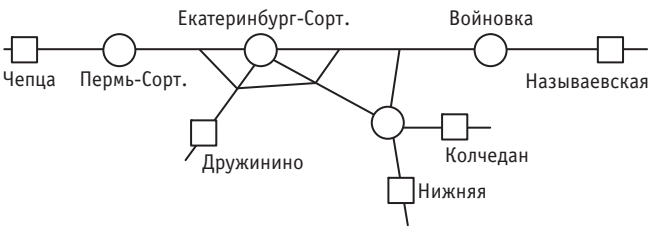


***Рис. 2*. Главный ход Свердловской железной дороги**

По дальним подходам:

список поездов, следующих в расформирование на станцию расчета прогноза (далее — станция прогноза) или проходящих транзитом без переработки по станции прогноза;

информация о поездах в объеме натурного листа поезда.

По ближним подходам:

список поездов, поступающих в разборку, сформированных станциями, близлежащими к станции прогноза;

информация о разборочных поездах в объеме натурного листа поезда;

список транзитных без переработки поездов, сформированных станциями, близлежащими к станции прогноза;

информация о транзитных без переработки поездах в объеме натурного листа поезда.

Для начальной ситуации на станции прогноза:

наличие поездов в парках приема и отправления;

информация о поездах в парках приема и отправления в объеме натурного листа поезда;

время выполнения и тип последней технологической операции с поездами в парках приема и отправления;

наличие вагонов в сортировочных парках;

информация о вагонах на каждом пути сортировочного парка в объеме натурного листа поезда;

план формирования поездов станции прогноза;

специализация путей сортировочных парков.

На примере станции Войновка рассмотрим последовательность расчетов и обмен данными между моделями.

Для получения прогноза сдачи поездов по стыкам на 2 сут вперед необходимо выполнить расчет прогноза поездообразования для станции Войновка на период 48 ч. На момент начала расчета для станции Войновка имеется информация о подходе поездов на период 12 ч со стороны станции Екатеринбург-Сортировочный и на период до 36 ч со стороны станции Называевская. Этих данных явно недостаточно для выполнения расчета.

Чтобы увеличить период прогноза, в качестве источника данных принимается результат расчета прогноза поездообразования станции Екатеринбург-Сортировочный на период 12 ч. После добавления источника данных период прогноза увеличился до 24 ч. Но и этих данных недостаточно для выполнения расчета на заданный период.

Для дальнейшего увеличения периода прогноза в качестве источника данных принимается результат расчета прогноза поездообразования станции Пермь-Сортировочная на период не менее 24 ч. После добавления двух источников данных период прогноза увеличился до 48 ч, что удовлетворяет условиям выполнения расчета прогноза поездообразования.

Таким образом, построение имитационной модели планирования поездообразования для станции Войновка на период 48 ч выполняется в три этапа. Для каждого из них создается имитационая модель станции, по которой выполняется расчет прогноза.

Для ***первого этапа*** расчета создается модель дальней для Войновки станции главного хода — Пермь-Сортировочная. Период прогноза выбирается исходя из времени хода поездов от станции Пермь-Сортировочная до станции Войновка. Прогноз поездообразования необходимо рассчитать на предстоящие сутки, а среднее время хода по участкам Войновка — Екатеринбург-Сортировочный и Пермь-Сортировочная — Екатеринбург-Сортировочный составляет порядка 12 ч. Поэтому период прогноза поездообразования для станции Пермь-Сортировочная на данном этапе должен составлять не менее 24 ч.

Исходные данные для модели: ситуация на станции Пермь-Сортировочная, сложившаяся на момент начала прогноза; поезда, находящиеся в движении на прилегающих к станции участках, и поезда, отправляемые с ближних станций на станцию Пермь-Сортировочная. Ближними считаются станции, среднее время хода от которых составляет менее 12 ч. Для станции Пермь-Сортировочная это Верещагино, Блочная, Осенцы.

Время прибытия поездов на станцию Пермь-Сортировочная получаем как результат расчета модели продвижения поездов по участкам, прилегающим к ней.

Исходные данные для модели продвижения поездов по этим участкам — информация о последних выполненных поездных операциях, т.е. тип поезда, направление движения, станция выполнения операции, тип операции, время выполнения.

Для ***второго этапа*** расчета создается модель следующей станции дороги по направлению к Войновке — Екатеринбург-Сортировочный. Период прогноза для этой станции составит 36 ч. Величина периода прогноза складывается из величины периода прогноза первого этапа (24 ч) и среднего времени хода от станции Пермь-Сортировочная (первый этап расчета) до станции Екатеринбург-Сортировочный.

Исходные данные для модели прогноза поездообразования — ситуация на станции, сложившаяся на момент начала расчета. В качестве прибывающих на Екатеринбург-Сортировочный поездов рассматриваются:

отправляемые со станции Пермь-Сортировочная в направлении станции Войновка согласно прогнозу, выполненному на первом этапе расчета;

находящиеся в движении на участках, примыкающих к станции Екатеринбург-Сортировочный в ее направлении;

отправляемые с ближних станций на Екатеринбург-Сортировочный. Ближними считаются станции, среднее время хода от которых составляет менее 12 ч. Для станции Екатеринбург-Сортировочный это Каменск-Уральский, Богданович, Дружинино, Смычка и др.

Время прибытия поездов на станцию Екатеринбург-Сортировочный получаем как результат расчета модели продвижения поездов по участкам, прилегающим к ней.

Исходные данные для модели продвижения поездов по этим участкам:

информация о последних выполненных поездных операциях;

моменты времени отправления поездов со станции Пермь-Сортировочная в направлении станции Екатеринбург-Сортировочный, полученные в результате расчета на первом этапе.

Для ***третьго этапа*** расчета прогноза поездообразования создается модель самой станции Войновка. Период прогноза расчета составит 48 ч.

Исходные данные для модели — ситуация на станции, сложившаяся на момент начала расчета. В качестве прибывающих на станцию Войновка поездов рассматриваются:

отправляемые со станции Пермь-Сортировочная согласно прогнозу, выполненному на первом этапе, и обработанные на станции Екатеринбург-Сортировочный на втором этапе;

сформированные на станции Екатеринбург-Сортировочный на втором этапе в направлении станции Войновка;

поезда, отправляемые с ближних станций на станцию Войновка. Ближними считаются станции, среднее время хода от которых составляет менее 12 ч. Для станции Войновка это Каменск-Уральский, Богданович, Камышлов.

Время прибытия поездов на станцию Войновка получается как результат расчета модели продвижения поездов по участкам, прилегающим к ней.

Исходные данные для модели продвижения поездов по участкам, прилегающим к станции Войновка:

информация о последних выполненных операциях с поездами;

моменты времени отправления поездов со станции Екатеринбург-Сортировочный в направлении станции Войновка, полученные в результате расчета на втором этапе.

В результате трех этапов расчета на период 48 ч получается полная картина продвижения поездов и вагонов по дороге от подхода к станции Пермь-Сортировочная до выхода со станции Войновка. Потоки информации о поездах на третьем этапе расчета прогноза поездообразования для станции Войновка представлены на рис. 3.

Результаты расчета прогноза поездообразования на сортировочных станциях можно использовать в сменно-суточном планировании для:

определения потребного количества локомотивов на предстоящие сутки;

формирования наряда локомотивных бригад на предстоящие сутки по станции;

уточнения планов работы дороги на текущие сутки;

уточнения потребного количества локомотивов;

уточнения наряда локомотивных бригад на текущие сутки;

планирования поездной работы на текущую смену по примыкающим к станции участкам.

Для определения технологического эффекта автоматизации сменно-суточного планирования поездообразования и поездной работы дороги разделим процесс расчета сдачи поездов по междорожным стыкам на действия, выполняемые диспетчерским аппаратом при расчете плана вручную. Путем хронометража для каждого действия и в целом для всего процесса определим диапазоны затрачиваемого времени для двух способов расчета (табл. 1).

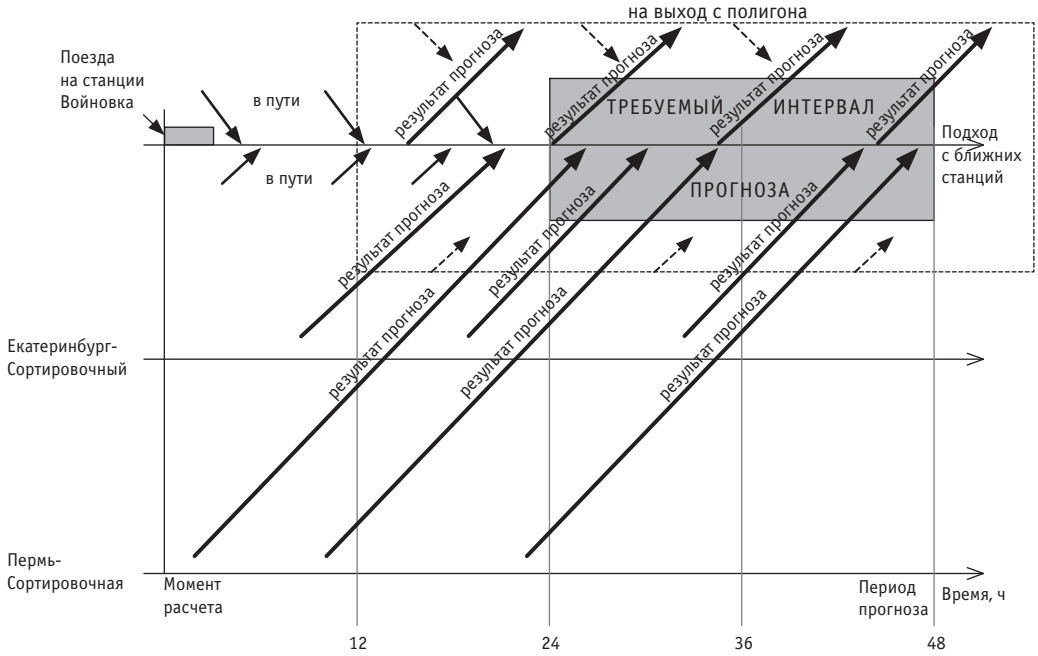


***Рис. 3*. Входная и выходная информация о поездах на заключительном этапе расчета прогноза поездообразования для станции Войновка**

Таблица 1

Сравнение продолжительности расчета прогноза сдачи по стыковым пунктам Свердловской железной дороги

Операция	Время на выполнение, мин	
	вручную	автоматизированно
Выборка информации по поездам, находящимся в движении:		5–7
– на Горьковской дороге	5–7	
– Южно-Уральской дороге	5–7	
– Западно-Сибирской дороге	5–7	
– Свердловской дороге	15–20	
Выборка информации по вагонам, находящимся:		
– на станции Пермь-Сортировочная и в поездах на подходе к ней	3–5	
– на станции Екатеринбург-Сортировочный и в поездах на подходе к ней	3–5	
– на станции Войновка и в поездах на подходе к ней	3–5	
– на станциях погрузки (выгрузки) маршрутов Пермского района управления	2–3	
– на станциях погрузки (выгрузки) маршрутов Свердловского района управления	2–3	
– на станциях погрузки (выгрузки) маршрутов Тюменского района управления	2–3	
– на станциях погрузки (выгрузки) маршрутов Сургутского района управления	1–2	
Выборка информации по поездам, идущим к станции концентрации полувагонов	2–3	
Анализ информации по поездам, находящимся в движении:		10–15
– на Горьковской дороге (запись результатов)	1–2	
– на Южно-Уральской дороге (запись результатов)	1–2	
– на Западно-Сибирской дороге (запись результатов)	1–2	
– на Свердловской дороге (запись результатов)	3–5	
Анализ информации по вагонам, находящимся:		
– на станции Пермь-Сортировочная и в поездах на подходе к ней (запись результатов)	3–5	
– на станции Екатеринбург-Сортировочный и в поездах на подходе к ней (запись результатов)	3–5	
– на станции Войновка и в поездах на подходе к ней (запись результатов)	3–5	
– на станциях погрузки (выгрузки) маршрутов Пермского района управления (запись результатов)	1–2	
– на станциях погрузки (выгрузки) маршрутов Свердловского района управления (запись результатов)	1–2	
– на станциях погрузки (выгрузки) маршрутов Тюменского района управления (запись результатов)	1–2	
– на станциях погрузки (выгрузки) маршрутов Сургутского района управления (запись результатов)	1	
Анализ информации по поездам, идущим к станции концентрации полувагонов (запись результатов)	1–2	
Подведение итогов по стыкам	2–3	
Итого	70–90	15–20

Из табл. 1 видно, что на расчет плана сдачи по стыкам вручную без отвлечения на управление диспетчер тратит от 70 до 90 мин. Автоматизация расчета плана позволяет сократить этот период до 15–20 мин. При этом автоматически рассчитываются и другие плановые показатели работы дороги.

При выполнении этого же расчета с отвлечением на управление процессом перевозок диспетчер тратит до 2,5–3 ч в зависимости от опыта работы.

Технологический эффект методики использования моделей можно определить, если сравнить отклонение количества фактически сданных поездов по стыкам с результатами ручного расчета и расчета с использованием имитационных моделей (табл. 2).

Таким образом, автоматизация сквозной технологии оперативного сменно-суточного планирования позволяет сократить время расчета плана более чем в три раза, увеличить точность планирования поездообразования для сортировочных станций и поездной работы дороги.

Таблица 2

Среднесуточное отклонение результатов расчетов от результатов работы

Междорожный стык	Среднесуточное количество поездов, сдаваемых по стыку	Расчет плана вручную		Расчет плана с использованием программных средств	
		Транзитные поезда	Поезда своего формирования	Транзитные поезда	Поезда своего формирования
Чепца	53	3	3	1	1
Называевская	45	1	3	1	0
Дружинино	46	2	2	1	1
Колчедан	57	1	3	1	1
Игра	1	0	1	0	0
Нижняя	18	1	3	1	1
Итого по дороге	220	8	15	3	4

Литература

1. Александров А. Э., Сурин А. В. Системный анализ сквозной технологии оперативного планирования поездообразования и поездной работы // Транспорт Урала. 2011. № 4 (31). С. 63–66. ISSN 1815-9400.
2. Александров А. Э., Сурин А. В. Автоматизация сквозной технологии оперативного планирования поездообразования и поездной работы // Вестник УрГУПС. 2013. № 3 (19). С. 50–59. ISSN 2079-0392.
3. Александров А. Э., Шипулин А. В. Автоматизация построения ГДП // Вестник УрГУПС. 2013. № 3 (19). С. 34–45. ISSN 2079-0392.
4. Александров А. Э., Сурин А. В., Шипулин А. В. Использование имитационных моделей в оперативном планировании поездной работы // Вестник РГУПС. 2015. № 4. С. 65–71. ISSN 0201-727X.
5. Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии : дис. … д-ра техн. наук. Липецк : ЛПИ, 1986. 377 с.

References

1. Alexandrov A. E., Surin A. V. Sistemnyj analiz skvoznoj tekhnologii operativnogo planirovaniya poezdoobrazovaniya i poezdnoj raboty [Systems analysis of cross-cutting technology of operational planning of trains' makeup and trains' operation] // Transport Urala. 2011. № 4 (31). S. 63–66. ISSN 1815-9400.
2. Aleksandrov A. E., Surin A. V. Avtomatizaciya skvoznoj tekhnologii operativnogo planirovaniya poezdoobrazovaniya i poezdnoj raboty [Automation of integrated technology of operational planning of train formation and train operation] // Vestnik UrGUPS. 2013. № 3 (19). S. 50–59. ISSN 2079-0392.
3. Aleksandrov A. E., Shipulin A. V. Avtomatizaciya postroeniya GDP [Automation of forecasting train scheduling] // Vestnik UrGUPS. 2013. № 3 (19). S. 34–45. ISSN 2079-0392.
4. Aleksandrov A. E., Surin A. V., Shipulin A. V. Ispolzovanie imitacionnykh modelej v operativnom planirovanii poezdnoj raboty [The use of simulations models in operational planning of train`s operation] // Vestnik RGUPS. 2015. № 4. S. 65–71. ISSN 0201-727X.
5. Kozlov P. A. Teoreticheskie osnovy, organizacionnye formy, metody optimizacii gibkoj tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya zavodov chernoj metallurgii : dis. … d-ra tekhn. nauk [Theoretical basis, organizational forms, methods of optimization of flexible transport service methods at ferrous metallurgy plants : DSc in Engineering Thesis]. Lipetsk : LPI, 1986. 377 s.

УДК 656.212.5

Дмитрий Валентинович Осипов, старший преподаватель кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия,
Александр Александрович Климов, кандидат технических наук, декан факультета «Управление процессами перевозок», доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ НА ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

Dmitriy Valentinovich Osipov, Senior Lecturer, Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia,
Alexander Alexandrovich Klimov, PhD in Engineering, Dean of Faculty of Railway Transportation Management, Associate Professor, Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

Impact of longitidunal profile of gravity part of hump on processing capacity

Аннотация

Предложен новый аналитический метод для количественной оценки влияния параметров конструкции продольного профиля перевальной части на перерабатывающую способность сортировочной горки. Учтено влияние на технологический горочный интервал основных эксплуатационных показателей, зависящих от продольного профиля горба горки, таких как число нерасцепов и саморасцепов вагонов, повреждение автосцепных устройств вагонов, скорость роспуска. Предлагаемая методика позволяет сравнивать варианты конструкций горбов проектируемых и эксплуатируемых горок и выбирать более рациональный с учетом обеспечения потребного уровня перерабатывающей способности.

Ключевые слова: перерабатывающая способность сортировочной горки, перевальная часть горки, продольный профиль горба горки, нерасцепы вагонов.

Summary

A new analytic method for estimating the impact of the longitudinal profile of the gravity part of hump on the processing capacity has been proposed. It takes into account the influence of the principal operating factors depending on the longitudinal profile of the hump, such as the number of failed uncouplings and unwanted uncouplings between cars, damage to couplers, speed of sorting yard movement. The proposed method allows comparing options of hump constructions of the designed and operating sorting yards and selecting the optimal for providing the required throughput performance.

Keywords: processing capacity, gravity part of hump, longitudinal profile of hump, uncouling failures.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-71-76

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и содержании сортировочных горок особое внимание уделяется перевальной части, которая оказывает воздействие на эксплуатационные свойства всего сортировочного устройства. Важнейшими ее конструктивными характеристиками являются параметры элементов продольного профиля горбов горки.

Правилами и нормами проектирования [1, 2] допускается некоторая свобода выбора конструктивных параметров продольного профиля перевальной части горки, определяющих эффективность и безопасность сортировочного процесса. Установленные правилами и нормами [1, 2] значения радиусов вертикальных кривых, сопрягающих надвижную и спускную части в зоне вершины горки (350 м со стороны надвижной части и 250 м со стороны спускной), являются минимально допустимыми. Они определяются условиями прохода через горб горки вагонов с неблагоприятными геометрическими параметрами (в частности, вагонов для перевозки автомобилей, легковесных грузов, изотермических и других длиннобазных вагонов) в сцепленном состоянии без повреждения автосцепного устройства и их самопроизвольного расцепления. В свою очередь, увеличение радиуса сопрягающей вертикальной кривой в зоне вершины горки до максимального значения, установленного нормами (400 м со стороны надвижной части и 300 м со стороны спускной), ухудшает условия отделения отцепов от состава, что может привести к нарушению технологии роспуска состава на отцепы [3].

В процессе эксплуатации сортировочной горки элементы продольного профиля перевальной части, как правило, деформируются, что вызывает искажение проектного очертания горба горки, усугубляя возникающие проблемы. При этом могут участиться такие события, как несвоевременный отрыв отцепов, нерасцепы или саморасцепы вагонов, повреждение

e-mail: goltemp@ngs.ru, aklimov@ngs.ru
Дата поступления: 09.10.2016

автосцепных устройств вагонов и т.п. Подобные негативные явления при расформировании снижают скорость роспуска, увеличивают объем повторной сортировки, а также могут нарушать план формирования поездов и создавать потенциальную угрозу для безопасности процесса расформирования. Вероятность возникновения тех или иных явлений, как известно, зависит от качества продольного профиля конкретной сортировочной горки и может быть определена по методике, приведенной в [4]. Таким образом, параметры продольного профиля перевальной части оказывают непосредственное воздействие на скорость роспуска, технологический горочный интервал и соответственно на перерабатывающую способность горки. В связи с этим оценка влияния продольного профиля горба горки на ее перерабатывающую способность является актуальной задачей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При проектировании и реконструкции сортировочных горок часто ставится задача сравнения вариантов продольного профиля перевальной части и выбора наиболее рационального с учетом обеспечения потребного уровня перерабатывающей способности.

Известно, что параметры продольного профиля горба горки влияют на число случаев:

саморасцепа вагонов на горбе горке;

повреждения автосцепного устройства вагонов;

нерасцепов вагонов,

а также на положение отцепов в момент их отрыва от состава.

Самопроизвольный расцеп вагонов при проходе через горб горки — явление достаточно редкое: даже если радиусы сопрягающих вертикальных кривых на горбе значительно ниже нормативных (менее 200 м), саморасцеп наблюдается в единичных случаях (значительно реже 1 раза в сутки). Поэтому можно считать, что в настоящее время он почти не оказывает влияния на перерабатывающую способность.

Видимое повреждение автосцепного устройства вагонов (обрыв маятниковых болтов, излом центрирующей балочки и т.п.) тоже встречается редко и на перерабатывающую способность сортировочной горки не влияет, поскольку выявляется и исправляется в парке отправления.

Таким образом, основной негативный фактор, зависящий от продольного профиля перевальной части горки и влияющий на перерабатывающую способность, — это нерасцепы вагонов.

Кроме того, на перерабатывающую способность горки оказывает влияние положение одновагонных отцепов в момент их отрыва от состава, от этого зависит образование начальных пространственных интервалов между отцепами и соответственно максимально реализуемая скорость роспуска состава.

Таким образом, чтобы количественно оценить воздействие конструкции продольного профиля перевальной части на перерабатывающую способность горки при сравнении вариантов достаточно учитывать два основных показателя, влияющих на горочный технологический интервал: изменение числа нерасцепов вагонов на горбе горке и изменение реализуемой скорости роспуска.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА НЕРАСЦЕПОВ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА ГОРОЧНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНТЕРВАЛ

Ранее проведенными исследованиями [5, 6] установлено, что на перерабатывающую способность горки значительное влияние оказывают нерасцепы в составах при роспуске, и получены следующие результаты:

вероятность остановок роспуска $P_н$ из-за нерасцепов в среднем по сети составляет 0,32 (32 остановки на 100 составов);

средняя задержка роспуска из-за одной остановки 2,4 мин;

вероятность остановок роспуска в значительной степени определяется технологией ликвидации нерасцепов вагонов;

на горках, где нерасцепы устраняются горочными составителями поездов с остановкой роспуска, среднее время на ликвидацию одного нерасцепа составляет 2 мин, а с учетом времени на разгон и торможение состава — 3 мин;

на горках (как правило, с суточной переработкой более 4000 вагонов), где нерасцепившиеся отцепы направляются на отдельные пути без остановки роспуска, среднее время на ликвидацию одного нерасцепа составляет около 5 мин. По окончании роспуска или частично с совмещением с другим роспуском нерасцепившиеся отцепы («чужаки»)* переставляются маневровым локомотивом на пути назначения. При наличии достаточного количества локомотивов и управлении процессом роспуска квалифицированным дежурным по горке среднее время задержек в работе горки значительно меньше и не превышает продолжительности ликвидации одного нерасцепа с остановкой роспуска;

общее число нерасцепов зависит от суточной переработки и средней длины отцепов. Для среднесетевых условий (средняя длина отцепа 2 вагона) при увеличении переработки вагонов на горке с 3 тыс. до 7 тыс. среднее число нерасцепов увеличивается с 13–15 до 32–35 случаев в сутки, а потери времени на их устранение — с 40 до 100 мин.

Для конкретной сортировочной горки показатели могут быть установлены индивидуально, а отдельные показатели для современных среднесетевых условий — уточнены. Для примера в табл. 1 представлены показатели по нерасцепам вагонов для двух горок сортировочных станций с последовательным расположением парков [6].

Таблица 1

Показатели по нерасцепам вагонов

Горка	Вероятность остановок роспуска $P_н$, 1/состав	Среднее время на ликвидацию нерасцепа, мин	Среднее время на ликвидацию нерасцепа в расчете на один состав, мин
Автоматизированная	0,20	1,8	0,36
Механизированная	0,35	2,3	0,80

*«Чужаки» — отцепы, направленные не на свой путь назначения.

Основная причина появления нерасцепов (в том числе «утягивания» одним отцепом другого с последующим их расцепом за горбом горки) — состояние тяговых поверхностей большого и малого зубьев автосцепок (из-за невысокого качества наплавки и обработки этих поверхностей, чрезмерного и неравномерного их износа, а также их залипания при коррозии, особенно в сухую жаркую погоду). Также причинами нерасцепов могут стать неисправности расцепного привода и механизма внутри корпуса автосцепки (изломы предохранителя и т.п.). В настоящее время доля нерасцепов вагонов на горке, происходящая из-за неисправности механизма автосцепки, крайне мала.

В работе [7] установлено, что число нерасцепов (в том числе несвоевременное отделение отцепов), не вызванных неисправностями автосцепок, в основном зависит от:

метеорологических условий;

продольного профиля и плана путей перевальной части горки;

конструктивных параметров перерабатываемых вагонов.

Известно, что более крутой продольный профиль с минимально допустимыми радиусами сопрягающих вертикальных кривых вызывает значительно меньшее число нерасцепов по сравнению с пологим профилем, у которого спускная часть сопряжена с надвижной частью вертикальными кривыми большего радиуса. Первый вариант продольного профиля обеспечивает лучшие показатели за счет:

лучших динамических («разгонных») характеристик для скатывающихся отцепов;

меньшей вероятности схватывания (залипания) тяговых поверхностей большого и малого зубьев автосцепок.

Меньшая вероятность схватывания (залипания) тяговых поверхностей большого и малого зубьев автосцепок обусловлена большим взаимным смещением автосцепок, вызванным проходом отцепов по профилю горба горки (показателем которого является величина дополнительного вертикального смещения центров взаимодействующих автосцепок при проходе горба горки $\Delta h_{\text{геом}}$ [4, 8]). Большее смещение (взаимный «ход» автосцепок) снижает вероятность взаимного контакта изношенных, имеющих коррозию или некачественно обработанных участков плоскостей зубьев взаимодействующих автосцепок. Это достигается за счет большей длины участка вертикального скольжения тяговых плоскостей зубьев автосцепок и возможности «отпускания» залипших автосцепок в результате прохода участка поверхности, имеющего дефекты.

В работах [4, 8] установлено, что показатель дополнительного вертикального смещения осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$ имеет два экстремума:

$\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ — в районе начала вертикальной кривой перед горбом горки со стороны надвижной части;

$\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ — в районе конца вертикальной кривой за горбом горки со стороны спускной части.

Очевидно, что снижение вероятности появления нерасцепов и затруднений с отделением отцепов может зависеть исключительно от $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$, так как $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ влияет только на расцеп вагонов уже на значительном удалении за горбом горки, фактически приводя к появлению «чужака».

С некоторой долей допущения можно считать, что существует обратно пропорциональная зависимость между величиной $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и вероятностью появления нерасцепа вагонов $P_{\text{н}}$, вызванного состоянием тяговых поверхностей автосцепок. В данном случае появляется возможность сравнить различные конфигурации продольного профиля горбов горок по показателю $P_{\text{н}}$. Для этого можно воспользоваться зависимостью

$$P_{\text{н}} = k_{\text{н}} \cdot P_{\text{н(Б)}} = \frac{\Delta h_{\text{геом(Б)}}^{\max(+)}}{\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}} \cdot P_{\text{н(Б)}}, \qquad (1)$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент, характеризующий продольный профиль исследуемой горки по показателю нерасцепов в сравнении с базовым продольным профилем;

$P_{\text{н(Б)}}$ — вероятность появления нерасцепа вагонов для базового продольного профиля сортировочной горки, 1/состав;

$\Delta h_{\text{геом (Б)}}^{\max(+)}$ — экстремум дополнительного вертикального смещения осей автосцепок со стороны надвижной части для базовой сортировочной горки (с известным показателем вероятности появления нерасцепов вагонов $P_{\text{н(Б)}}$);

$\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ — экстремум дополнительного вертикального смещения осей автосцепок со стороны надвижной части для исследуемой горки.

Приведенные в [5, 6] показатели по нерасцепам вагонов соответствовали среднесетевым условиям работы при установленном едином радиусе сопрягающих вертикальных кривых со стороны надвижной и спускной частей, равном 350 м. Данный вариант профиля принимается за базовый.

В табл. 2 представлены сравнительные показатели по нерасцепам вагонов для двух вариантов продольного профиля горбов горок и двух универсальных моделей вагонов.

Следует учитывать, что в настоящее время сложилась следующая структура парка вагонов на сети ОАО «РЖД»**: 45,4 % — полувагоны; 24,2 % — цистерны; 5,6 % — крытые вагоны; 5,4 % — платформы; 3,9 % — фитинговые платформы; 3,4 % — хопперы-зерновозы; 2,9 % — хопперы-минераловозы; 2,4 % — хопперы-ЦМВ; 0,4 % — вагоны для перевозки автомобилей; 6,4 % — прочие вагоны (в составе которых изотермические вагоны — 1 %, а также другие специализированные вагоны).

Таким образом, с учетом структуры парка вагонов для комплексной оценки продольного профиля по показателю $P_{\text{н}}$ целесообразно использовать средневзвешенный коэффициент, отражающий наибольшее число типов вагонов, перерабатываемых на горках:

$$k_{\text{н}} = \sum_{i=1}^{k} \alpha_i \cdot \frac{\Delta h_{\text{геом(Б)}i}^{\max(+)}}{\Delta h_{\text{геом}i}^{\max(+)}}, \qquad (2)$$

где α_i — доля вагонов i-го типа, перерабатываемых на сортировочной горке;

$\Delta h_{\text{геом}i}^{\max(+)}$, $\Delta h_{\text{геом(Б)}i}^{\max(+)}$ — экстремумы дополнительного вертикального смещения для i-го типа вагонов со стороны надвижной части соответственно для исследуемого и базового вариантов сортировочной горки.

**По данным ГВЦ ОАО «РЖД» на 01.08.2015 г.

Таблица 2

Сводная таблица расчета показателей оценки ориентировочного числа нерасцепов на горбах сортировочной горки по вариантам продольного профиля

Радиус вертикальной кривой со стороны спускной части $R_с$, м	Показатели для оценки числа нерасцепов на горбах сортировочной горки по вариантам продольного профиля							
	Вариант профиля без разделительной площадки с переломом 55 ‰				Вариант профиля с разделительной площадкой 10 м и переломом 70 ‰			
	$\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$, мм	$k_{\text{н}}$	$P_{\text{н}}$, 1/состав	$n_{\text{н}}$, нерасцеп/1000 ваг.	$\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$, мм	$k_{\text{н}}$	$P_{\text{н}}$, 1/состав	$n_{\text{н}}$, нерасцеп/1000 ваг.
Полувагон (стандартная модель с параметрами $l_{\text{б}} = 8{,}65$ м, $l_{\text{к}} = 2{,}635$ м)								
150	82	0,500	0,16	2,25	85	0,471	0,15	2,12
200	67	0,612	0,20	2,76	69	0,580	0,19	2,61
250	55	0,745	0,24	3,36	56	0,714	0,23	3,22
300	47	0,872	0,28	3,93	47	0,851	0,27	3,84
350	41	1,000	0,32	4,51	40	1,000	0,32	4,51
400	37	1,108	0,35	4,99	36	1,111	0,36	5,01
Крытый вагон (стандартная модель с параметрами $l_{\text{б}} = 10{,}0$ м, $l_{\text{к}} = 2{,}365$ м)								
150	77	0,519	0,17	2,34	79	0,494	0,16	2,22
200	65	0,615	0,20	2,77	66	0,591	0,19	2,66
250	53	0,755	0,24	3,40	54	0,722	0,23	3,26
300	46	0,870	0,28	3,92	45	0,867	0,28	3,91
350	40	1,000	0,32	4,51	39	1,000	0,32	4,51
400	36	1,111	0,36	5,01	34	1,147	0,37	5,17

Ориентировочное число нерасцепов в сутки можно определить по формуле

$$n_{\text{н}} = k_{\text{н}} \cdot P_{\text{н(Б)}} \cdot \frac{N_{\text{пер}}}{m_{1050(\text{Б})}} \cdot \frac{n_{\text{о(Б)}}}{n_{\text{о}}}, \qquad (3)$$

где $N_{\text{пер}}$ — число перерабатываемых вагонов на исследуемой сортировочной горке, ваг./сут;

$m_{1050(\text{Б})}$ — среднее число вагонов в составе при установленной длине поездов 1050 м, соответствующей среднесетевым условиям, ваг./состав;

$n_{\text{о}}$, $n_{\text{о(Б)}}$ — среднее число вагонов в отцепе соответственно для исследуемой горки и среднесетевое, ваг./отцеп.

Средние потери времени на устранение последствий нерасцепов за время переработки $N_{\text{пер}}$ вагонов могут быть определены по формуле

$$t_{\text{н}} = n_{\text{н}} \cdot t_{1\text{н}}, \qquad (4)$$

где $t_{1\text{н}}$ — среднее время на ликвидацию одного нерасцепа, зависящее от технологии устранения последствий нерасцепов вагонов на сортировочной горке, мин.

Известно, что влияние нерасцепов на технологический горочный интервал при расчете перерабатывающей способности сортировочной горки оценивается через коэффициент $\rho_{\text{гор}}$, учитывающий отказы технических устройств, нерасцепы вагонов и др., значение которого определяется по табл. 2.5 инструкции [9]. При расчете данного коэффициента использовались статистические среднесетевые данные, представленные в [5, 6]. Эти же данные в формулах (1)–(4) приняты за расчетные, соответствующие базовому варианту продольного профиля перевальной части горки. В результате для оценки влияния продольного профиля горба горки на горочный технологический интервал $t_{\text{ги}}$ и перерабатывающую способность по критерию частоты появления нерасцепов можно использовать зависимость

$$t_{\text{ги}} \cdot (1 + \rho_{\text{гор(Б)}}) = (t_{\text{ги(Б)}} - \Delta t_{\text{ги}}^{\text{н}}) \cdot (1 + \rho_{\text{гор(Б)}}), \qquad (5)$$

где $\rho_{\text{гор(Б)}}$ — коэффициент, учитывающий отказы технических устройств и нерасцепы вагонов, определяемый по табл. 2.5 [9];

$t_{\text{ги(Б)}}$ — величина горочного технологического интервала для базового варианта продольного профиля горки, мин;

$\Delta t_{\text{ги}}^{\text{н}}$ — изменение горочного технологического интервала, вызванное изменением числа нерасцепов в результате корректировки продольного профиля, мин, определяемое по формуле

$$\Delta t_{\text{ги}}^{\text{н}} = (P_{\text{н(Б)}} - P_{\text{н}}) \cdot t_{1\text{н}}. \qquad (6)$$

Преобразуя выражение (5), получим:

$$t_{\text{ги}} = t_{\text{ги(Б)}} - \Delta t_{\text{ги}}^{\text{н}}, \qquad (7)$$

где $t_{\text{ги(Б)}}$ — величина горочного технологического интервала для базового варианта продольного профиля горки, которая может быть определена для эксплуатируемой горки статистическими методами либо по формуле (6.36) пособия [3], мин.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ НА СКОРОСТЬ РОСПУСКА И ГОРОЧНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНТЕРВАЛ

Динамические качества продольного профиля горба горки будут меняться из-за корректировки радиуса вертикальной кривой. Соответствующее изменение горочного технологического интервала (при известном изменении времени роспуска) можно определить с использованием технологического графика работы сортировочной горки или по формуле

$$\Delta t_{\text{ги}}^{\text{д}} = \beta_1 \cdot (t_{\text{р(Б)}} - t_{\text{р(П)}}) - \beta_5 \cdot (\kappa_{\text{оп(Б)}} - \kappa_{\text{оп(П)}}), \qquad (8)$$

где β_1, β_5 — коэффициенты регрессии, значения которых принимаются в зависимости от числа горочных локомотивов по табл. 6.32 пособия [3];

$t_{\text{р(Б)}}$, $t_{\text{р(П)}}$ — среднее время роспуска составов при существующем (базовом) профиле горба горки и соответственно при проектируемом профиле, мин/состав;

$\kappa_{\text{оп(Б)}}$, $\kappa_{\text{оп(П)}}$ — коэффициент параллельности выполнения маневровых операций при существующем (базовом) профиле горба горки и соответственно при проектируемом профиле, определяемый по пособию [3, с. 139].

Среднее время роспуска состава без учета дополнительного времени на съем вагонов, запрещенных к спуску с горки без локомотива, определяется по известной формуле, мин:

$$t_{\text{р}} = \frac{l_{\text{с}}}{60 \cdot v_{\text{р}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2 \cdot g_{\text{о}}}\right), \qquad (9)$$

где $l_{\text{с}}$ — длина состава, м;

$g_{\text{о}}$ — среднее число отцепов в составе.

Скорость роспуска составов в результате изменения радиуса вертикальной кривой и соответственно динамических качеств продольного профиля горба горки можно рассчитать по формуле

$$v_{\text{р}} = v_{\text{р(Б)}} \cdot \frac{l_i - x_{\text{о},i}^{\text{П}} + x_{\text{о},i+1}^{\text{Х}}}{l_i - x_{\text{о},i\text{(Б)}}^{\text{П}} + x_{\text{о},i+1\text{(Б)}}^{\text{Х}}}, \qquad (10)$$

где $v_{\text{р}}$, $v_{\text{р(Б)}}$ — скорость роспуска составов для проектируемого профиля горба горки и соответственно для существующего (базового) профиля, м/с;

l_i — длина i-го отцепа, м;

$x_{\text{о},i}^{\text{П}}$, $x_{\text{о},i+1}^{\text{Х}}$ — соответственно координата отрыва i-го и следующего за ним отцепа для проектируемого профиля, м;

$x_{\text{о},i\text{(Б)}}^{\text{П}}$, $x_{\text{о},i+1\text{(Б)}}^{\text{Х}}$ — соответственно координата отрыва i-го и следующего за ним отцепа при существующем (базовом) продольном профиле горба горки, м.

Координаты точек отрыва одновагонных отцепов, соответствующие их ходовым свойствам, могут быть определены по методикам, приведенным в работах [10–12].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ НА ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ГОРКИ

Таким образом, суммарное изменение горочного технологического интервала в результате изменения продольного профиля (в том числе выправки) горба горки составит:

$$\Delta t_{\text{ги}} = \Delta t_{\text{ги}}^{\text{н}} + \Delta t_{\text{ги}}^{\text{д}}. \qquad (11)$$

Отсюда можно определить среднесуточное число дополнительно перерабатываемых вагонов на сортировочной горке, ваг./сут:

$$\Delta n = \left(\frac{1}{t_{\text{ги}} - \Delta t_{\text{ги}}} - \frac{1}{t_{\text{ги}}}\right) \cdot \frac{1440 \cdot \alpha_{\text{г}} - \sum T_{\text{пост}}^{\text{г}}}{(1 + \rho_{\text{гор}}) \cdot \mu_{\text{повт}}} \cdot m_{\text{с}}, \qquad (12)$$

где $\alpha_{\text{г}}$ — коэффициент, учитывающий возможные перерывы в использовании горки из-за враждебных передвижений, принимается равным 0,97;

$\sum T_{\text{пост}}^{\text{г}}$ — суммарное время занятия горки в течение суток для выполнения постоянных операций, не изменяющихся пропорционально с увеличением объема переработки, мин/сут;

$\rho_{\text{гор}}$ — коэффициент, учитывающий отказы технических устройств, нерасцепы вагонов и др., значение которого определяется по табл. 2.5 [9];

$\mu_{\text{повт}}$ — коэффициент, учитывающий повторную сортировку части вагонов в процессе окончания формирования с горки и из-за недостатка числа и длины сортировочных путей, значение которого определяется по табл. 2.6 [9], для средних условий можно принимать равным 1,05 для сортировочных систем с парками отправления и 1,12 — без парков отправления;

$m_{\text{с}}$ — среднее число вагонов в расформировываемом составе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана новая методика оценки влияния продольного профиля перевальной части на перерабатывающую способность горки, основанная на анализе таких факторов, как число нерасцепов и реализуемая скорость роспуска.

Предлагаемая методика позволяет сравнить варианты конструкций горбов горок и выбрать более рациональный по критерию обеспечения потребного уровня перерабатывающей способности сортировочной горки, а также оценить возможный рост перерабатывающей способности при планировании выправки продольного профиля перевальной части эксплуатируемых сортировочных горок.

Литература

1. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм / МПС РФ. М. : Техинформ, 2003. 168 с.
2. СП 225.1326000.2014. Станционные здания, сооружения и устройства. М., 2015. 135 с.
3. Пособие по применению Правил и норм проектирования сортировочных устройств / Ю. А. Муха, Л. Б. Тишков, В. П. Шейкин и др. М. : Транспорт, 1994. 220 с.
4. Осипов Д. В., Климов А. А. Методика оценки качества продольного профиля перевальной части сортировочной горки // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 63–68. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-63-68. ISSN 1815-9400.
5. Муха Ю. А. Харланович И. В., Шейкин В. П. Автоматизация и механизация переработки вагонов на станции. М. : Транспорт, 1985. 248 с.
6. Шейкин В. П. Эксплуатация механизированных сортировочных горок. М. : Транспорт, 1992. 240 с.
7. Осипов Д. В. Экспериментальное исследование процесса отрыва отцепов на перевальной части сортировочных горок Западно-Сибирской железной дороги // Политранспортные системы : матер. VII всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. С. 476–484.
8. Климов А. А., Осипов Д. В. Моделирование проходимости вагонов без саморасцепа по перевальной части сортировочной горки // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3 (47). С. 154–160. ISSN 1813-9108.
9. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог / ОАО «РЖД». М. : Техинформ, 2010. 289 с.
10. Осипов Д. В. Аналитический метод расчета положения одновагонных отцепов на перевальной части сортировочных горок в момент их отрыва от состава // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 2. С. 9–13. ISSN 2071-3827.
11. Осипов Д. В. Уточнение методики расчета сортировочных горок в части определения точек отрыва отцепов от состава // Наука и современность : сб. статей междунар. науч.-практ. конф. Уфа : РИО МЦИИ «Омега сайнс», 2014. С. 40–44.
12. Осипов Д. В. Метод расчета координат точек отрыва одновагонных отцепов на перевальной части сортировочных горок // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 3. С. 62–66. ISSN 0236-1914.

References

1. Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustrojstv na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm [Rules and regulations for design of sorting devices on 1520 mm railways tracks] / MPS RF. M. : Tekhinform, 2003. 168 s.
2. SP 225.1326000.2014. Stancionnye zdaniya, sooruzheniya i ustrojstva [Station buildings, facilities and equipment]. M., 2015. 135 s.
3. Posobie po primeneniyu Pravil i norm proektirovaniya sortirovochnykh ustrojstv / Yu. A. Mukha, L. B. Tishkov, V. P. Sheykin i dr. [Guide for use of The rules and regulations for design of sorting devices]. M. : Transport, 1994. 220 s.
4. Osipov D. V., Klimov A. A. Metodika ocenki kachestva prodolnogo profilya perevalnoj chasti sortirovochnoj gorki [A method to evaluate longitudinal profile quality of gravity part of hump] // Transport Urala. 2015. № 4 (47). S. 63–68. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-63-68. ISSN 1815-9400.
5. Mukha Yu. A., Kharlanovich I. V., Sheykin V. P. Avtomatizaciya i mekhanizaciya pererabotki vagonov na stancii [Automation and mechanizaton of railway cars processing at a station]. M. : Transport, 1985. 248 s.
6. Sheykin V. P. Ekspluataciya mekhanizirovannykh sortirovochnykh gorok [Operation of mechanized sorting yard humps]. M. : Transport, 1992. 240 s.
7. Osipov D. V. Eksperimentalnoe issledovanie processa otryva otcepov na perevalnoj chasti sortirovochnykh gorok Zapadno-Sibirskoj zheleznoj dorogi [Experimental research of the car sets uncoupling process in the hump parts of sorting yards of the West Siberian railway] // Politransportnye sistemy : mater. VII vseros. nauch.-tekhn. konf. Novosibirsk : Izd-vo SGUPS, 2010. S. 476–484.
8. Klimov A. A., Osipov D. V. Modelirovanie prokhodimosti vagonov bez samorascepa po perevalnoj chasti sortirovochnoj gorki [Simulation of cars passing without decoupling over the hump crest] // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2015. № 3 (47). S. 154–160. ISSN 1813-9108.
9. Instrukciya po raschyotu nalichnoj propusknoj sposobnosti zheleznykh dorog [Instruction on calculation railways capacity] / OAO «RZhD». M. : Tekhinform, 2010. 289 s.
10. Osipov D. V. Analiticheskij metod raschyota polozheniya odnovagonnykh otcepov na perevalnoj chasti sortirovochnykh gorok v moment ikh otryva ot sostava [Analytical method of calculation of position one-carload cuts on the hump crest of humps at the moment of their separation from the train] // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka. 2010. № 2. S. 9–13. ISSN 2071-3827.
11. Osipov D. V. Utochnenie metodiki raschyota sortirovochnykh gorok v chasti opredeleniya tochek otryva otcepov ot sostava [Elaboration of the sorting yard hump calculation methods in regard to defining the point of sets separation from the train] // Nauka i sovremennost : sb. statej mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ufa : RIO MCII «Omega sajns», 2014. S. 40–44.
12. Osipov D. V. Metod raschyota koordinat tochek otryva odnovagonnykh otcepov na perevalnoj chasti sortirovochnykh gorok [The method of calculating of points of separation of one-car cuts on the hump crest] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2016. № 3. S. 62–66. ISSN 0236-1914.

УДК 656.073.72

Елена Дмитриевна Псеровская, кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия,
Игорь Николаевич Кагадий, аспирант кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЕ СВЯЗИ ЗАГРУЖЕННОСТИ ГРУЗОВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ

Elena Dmitrievna Pserovskaya, PhD in Engineering, Associate Professor, Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia,
Igor Nikolayevich Kagadiy, postgraduate student, Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

Relationships of cause and effect of loading of cargo railway stations from the position of the theory of system dynamics

Аннотация

В статье рассмотрены проблемы взаимодействия железнодорожных станций и промышленных предприятий в условиях неравномерности эксплуатационной работы, вызванной переходом российских железных дорог к работе с приватным вагонным парком.

Проанализированы характерные особенности процесса перевозок грузов железнодорожным транспортом, приведены принципиальные схемы ключевых факторов, влияющих на качественное взаимодействие между основными участниками этого процесса. Основное содержание статьи составляет анализ взаимодействия железнодорожных станций и обслуживаемых ими объектов промышленного транспорта. Выявлена и обоснована необходимость моделирования транспортных процессов на грузовых станциях и местах необщего пользования. Предложены рекомендации по созданию имитационной модели функционирования грузовой станции. Разработанная с применением адаптивного программирования AnyLogic модель соответствует структуре и технологическому процессу работы станций и грузовых пунктов и дает возможность оптимизировать перерабатывающую способность железнодорожных грузовых станций. Процессный подход во взаимодействии станции примыкания и объектов промышленного транспорта позволяет сократить транспортные затраты, возникающие при обслуживании путей необщего пользования.

Ключевые слова: местная грузовая работа, системная динамика, грузовая станция, место необщего пользования, имитационное моделирование.

Summary

In this work problems of interaction of railway stations and industrial enterprises in the conditions of unevenness of the operational work caused by transition of Russian Railways to work with private carriage park are considered.

Characteristics of process of transportation of goods are analysed by railway transport, schematic diagrams of influence of the major factors influencing high-quality interaction of the main participants of transportation process are provided. The main content of research makes the analysis of interaction of railway stations and the objects of industrial transport served by them. Need of modeling of transport processes at cargo stations and places of uncommon use is revealed and proved. The model developed with application of adaptive programming by AnyLogic corresponds to structure and technological process of work of stations and cargo points and allows to resolve an issue of optimization of the overworking ability of railway cargo stations. Use of imitating model of functioning of cargo station, carrying out optimizing experiments with model and an assessment of the overworking ability promote adjustment of the amount of local work with the purpose of the best use capacities of places of simultaneous loading unloading of freight cars and optimum loading of station objects. Process approach in interaction of station of an adjunction and objects of industrial transport will allow to reduce the transport expenses arising at service of ways of uncommon use.

Keywords: local cargo work, system dynamics, cargo station, place of uncommon use, imitating modeling.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-77-82

Анализ функционирования грузовых железнодорожных станций и мест необщего пользования (МНОП) — необходимый элемент при составлении Единого технологического процесса работы станций примыкания и объектов промышленного транспорта [1]. При несоответствии возможностей станции обработать поступающий объем заявок на обслуживание нарушается технологический процесс ее работы, замедляется оборот вагонов, не выполняются плановые показатели. Вагоны в ожидании выгрузки приходится распределять по станциям региона, что создает серьезную угрозу для продвижения вагонопотоков на участках железных дорог. В сложившейся ситуации на станциях и путях необщего пользования (ПНП) не освобождается подвижной состав, из-за занятости железнодорожных путей возникают технологические затруднения в работе станций, производятся дополнительные маневровые работы, компания ОАО «РЖД» несет существенные убытки от многодневного простоя вагонов и несоблюдения сроков доставки грузов. При изучении возможностей освоения растущих объемов грузовой работы и анализе показателей использования технических средств и подвижного состава необходимо учитывать детерминированный характер местной работы и конструктивные параметры всей исследуемой системы перевозок.

В случае нелинейного характера взаимодействие любых исследуемых параметров приводит к тому, что «интенсивность реакции не всегда пропорциональна интенсивности воздействия» [2]. Такой эффект запаздывания усложняет описание функционирования системы, в том числе транспортной.

Согласно методологии качественного аспекта системно-динамического анализа — построения причинно-следственных диаграмм [3], существует несколько вариантов поведения системы:

осцилляция — рост, спад, корректировка, рост и т.д.;

e-mail: eldp-55@yandex.ru, kagaigor@mail.ru
Дата поступления: 07.09.2016

S-образный — рост, замедление, равновесие;

S-образный с превышением — рост, замедление, превышение, сдерживание;

превышение и коллапс — сбалансированный рост, превышение, спад.

Из всех перечисленных комбинаций для рынка транспортных услуг, а именно для железных дорог, характерен S-образный рост с превышением. Такой характер функционирования системы грузоперевозок закономерен в силу реформирования железнодорожной отрасли. Так, согласно закону от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ [4], перевозка является публичной, ОАО «РЖД» не вправе отказать в ней грузоотправителю, при этом предоставление вагонов считается рыночной услугой. Наблюдается планомерный рост объемов перевозок, причем как во внутреннем, так и в международном сообщении. Но в новых условиях предоставления подвижного состава клиентам, подавшим заявки на перевозку грузов, приходится самим договариваться с ними. В результате порожние вагоны, простаивая на станциях, занимают пути, что приводит к снижению пропускной способности станций и, как следствие, к росту нагрузки на инфраструктуру [5].

После перераспределения вагонов из инвентарного парка в приватный изменились принципы управления вагонами — технически происходит замедление ритма функционирования железнодорожных транспортных систем. Компании-операторы стараются получить максимум прибыли, несмотря на ущерб технологии перевозочного процесса, что приводит к превышению надежности грузоперевозочных систем: повышению доли порожнего пробега, излишним простоям вагонов [6], снижению числа сдвоенных операций на станциях, увеличению встречного порожнего пробега однотипных вагонов [7].

Одной из мер по стабилизации перевозочного процесса стал приказ Минтранса России от 03.10.2011 г. № 258 [8], который регламентирует правила перевозки грузов железнодорожным транспортом в части перемещения приватных порожних вагонов и направлен на обеспечение управляемости парками вагонов, принадлежащими различным собственникам, а также на снижение загруженности станций погрузки. Теперь в момент, когда оператор отправляет порожний вагон на станцию погрузки, он должен подтвердить, что имеет заявку и согласие грузоотправителя для перевозки груза в данном вагоне [5].

Таким образом, для системы железнодорожных перевозок S-образный рост с учетом эффекта запаздывания приходит в равновесие после превышения допустимого ограничения, которым является перенасыщение рынка приватными вагонами и лимита в количестве обслуживаемых клиентов, затем корректируется, после чего рост происходит снова. Система показывает небольшие затухающие колебания вокруг устойчивого уровня инфраструктурного оснащения дорог, станций и объектов промышленного транспорта.

Чтобы успешно управлять сложными системами, необходимо прежде всего понять механизм их функционирования, а затем определить точки воздействия на систему и соответствующие меры по корректировке ее поведения. В сложившихся условиях принятие тех или иных мер должно рассматриваться как стремление оптимизировать управление вагонными парками, находящимися в распоряжении компаний-операторов, разработать научно обоснованные методики и рекомендации по совершенствованию перевозочного процесса. А для управления им необходима информация о предстоящих событиях, и эту задачу нужно решать с помощью моделирования [9].

Системно-динамические модели состоят из петель обратной связи, которые формируют поведение системы. Этот вид моделирования полезен при выявлении важных переменных и установлении взаимосвязей между ними.

Причинно-следственные диаграммы помогают наглядно представить, каким образом устроены системы. Однако даже самая точная диаграмма не позволит предсказать, каким будет поведение системы (т.е. как будет вести себя кривая на графике с течением времени — будет ли это экспоненциальный рост, осцилляция, превышение и коллапс и т.п.).

Представить систему помогает концепция потоков (flows) и накопителей (stocks). Согласно системной динамике, динамическое поведение системы возникает вследствие принципа аккумуляции, т.е. когда потоки аккумулируются в накопителях.

На физическом уровне моделирования входящий вагонопоток после грузовых операций может быть классифицирован как **переработанный**. При этом **входящий вагонопоток** пополняет **переработанный**, а **выходящий**, наоборот, уменьшает. Таким образом, простейшая потоковая диаграмма представляет собой **переработанный вагонопоток**, являющийся накопителем, а **входящий** и **выходящий вагонопотоки** будут его входящим и исходящим потоками соответственно (рис. 1).

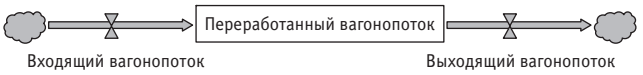


Рис. 1. **Начальная потоковая диаграмма**

Моделирование переменной **«входящий вагонопоток»** возможно при изменении **инфраструктурной обеспеченности станции** и путевого развития. Этот накопитель ограничивает возможности в потенциально перерабатываемом вагонопотоке. Дополненная потоковая модель представлена на рис. 2.

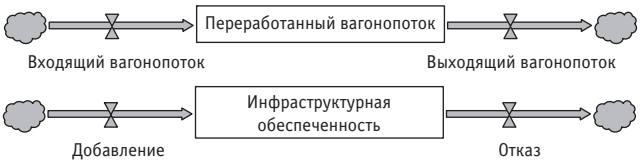


Рис. 2. **Дополненная потоковая модель**

Взаимосвязь данных переменных в единой модели основывается на следующих предположениях:

объем входящего вагонопотока зависит от переменной **«инфраструктурная обеспеченность»**;

инфраструктурная обеспеченность будет определяться такими переменными, как **необходимое количество локомотивов** и **время на оптимизацию** (т.е. время для приведения текущей оснащенности станции к необходимому уровню).

Дополнительно вводятся накопитель **«рабочий парк вагонов»**, исходящий поток **«темп местной работы»** и переменные **«количество грузовых операций»** и **«степень использования вагонов»** (рис. 3).

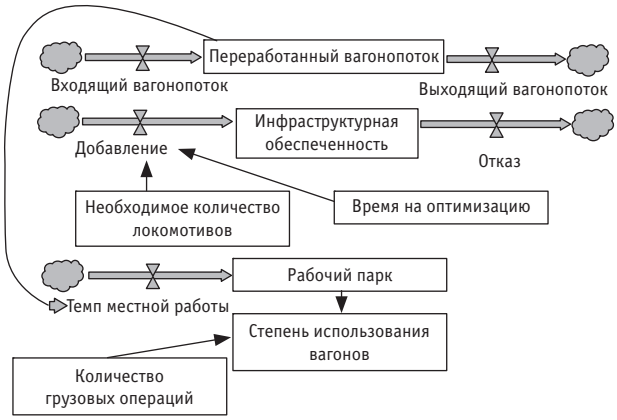


***Рис. 3*. Потоковая диаграмма с указанием связей**

Изменим модель следующим образом: введем накопители **«выполнение заявок»**, **«грузовой пункт»** и **«клиенты»**, а также переменные **«корректировка заявок»** и **«планируемый объем грузовой работы»**. Выполнение заявок представляет собой количество заявок, которое требуется удовлетворить, ориентируясь на предположения о загруженности станции и возможности их рассмотрения. Переменная **«корректировка заявок»** представляет собой корректировку накопителя **«выполнение заявок»** при его отклонении от возможного значения. Переменная **«планируемый объем грузовой работы»** показывает реальную загрузку грузового пункта и коррелирует фактически выполняемое количество заявок и использование станционных мощностей. **Клиенты** — это накопитель пользователей услуг железнодорожного транспорта, привлечение и отток которых зависит от работы грузового пункта. Таким образом, в модели появляются новые контуры обратной связи (рис. 4).

На основе анализа зависимости исследуемых переменных от времени моделирования реального технологического процесса работы станции можно прийти к следующим основным результатам. Переменная **«корректировка заявок»** влияет на переменную **«планируемый объем грузовой работы»**, а также по цепочке приводит к изменению переменных **«выполнение заявок»**, **«инфраструктурная обеспеченность»**, **«рабочий парк вагонов»** и **«переработанный вагонопоток»**. Эти зависимости в модели представляют осцилляции с затухающими колебаниями (рис. 5). В начале моделируемого месяца входящий поток одномоментно вырастает, заставляя увеличиваться переменную **«рабочий парк»**. Соответственно возрастает переменная **«корректировка заявок»**, поскольку **переработанный вагонопоток** занимает **грузовой пункт**, вызывая увеличение его загрузки. Однако существует эффект запаздывания, поскольку станции требуется время, чтобы откорректировать число заявок, которое возможно реализовать, и **планируемый объем грузовой работы**.

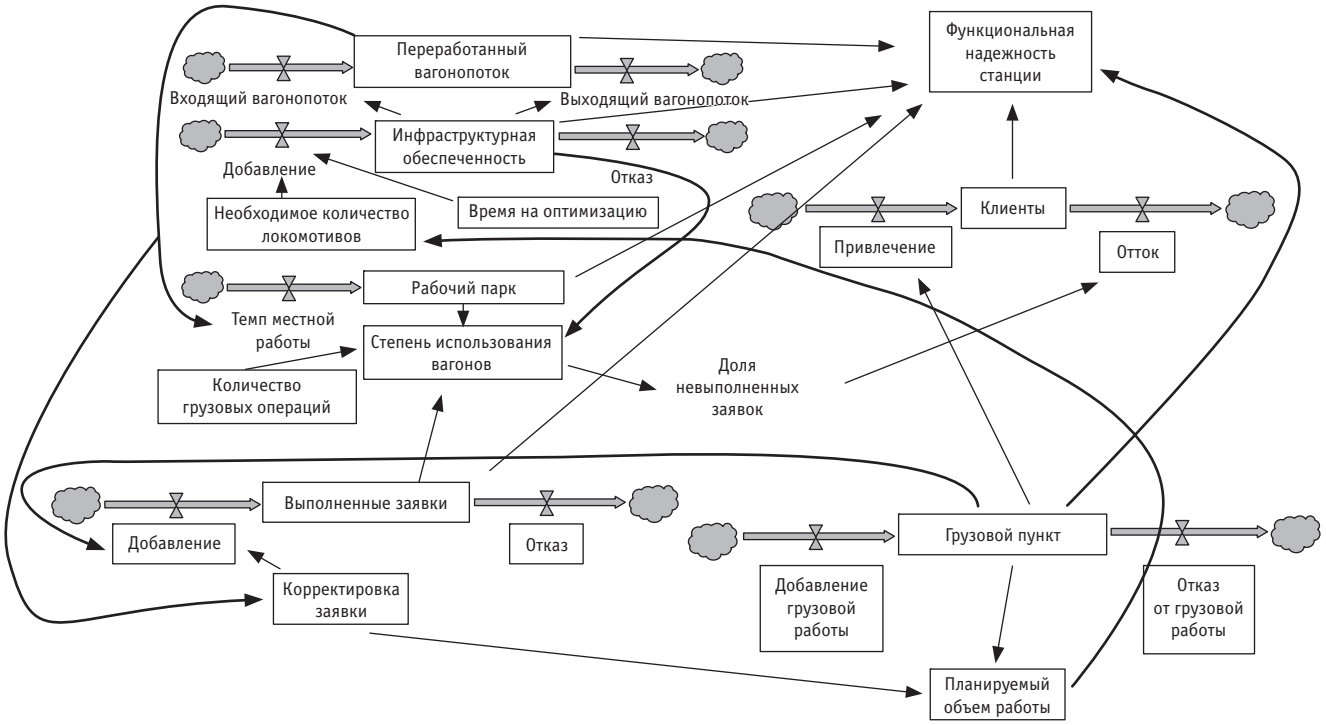


***Рис. 4*. Окончательная потоковая диаграмма функционирования грузовой станции**

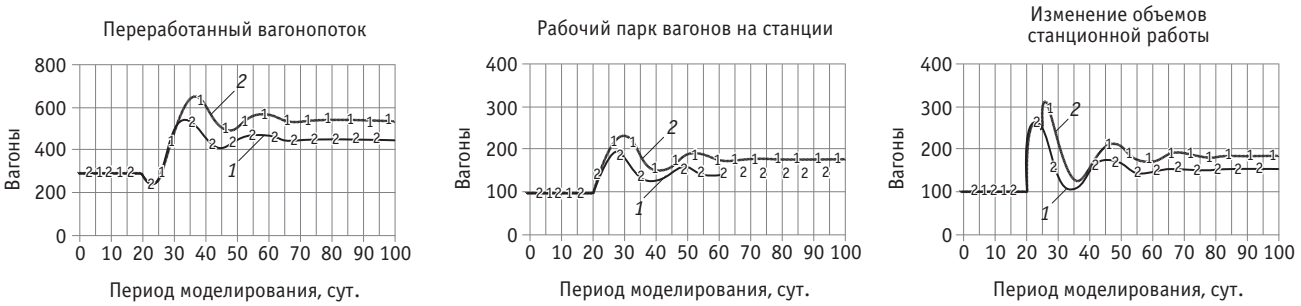


***Рис. 5*. Функциональные показатели работы грузовой станции:**
1 — ситуационная базовая модель; *2* — ситуационная модель с увеличением рабочего парка вагонов

Приблизительно к N-й неделе уровень накопителя **«переработанные вагоны»** выравнивается с уровнем загрузки станционных объектов (**инфраструктурная обеспеченность**) по технологическому обороту вагонов (**рабочий парк**) и обслуживанию клиентов (**клиенты**) и их заявок (**выполненные заявки**).

Согласно Ю. Г. Карпову [10], имитационное моделирование имеет преимущество перед аналитическим в следующих случаях: когда отношения между переменными в модели нелинейны, и поэтому аналитические модели трудно или невозможно построить; когда модель содержит стохастические компоненты; когда для понимания поведения системы требуется визуализация динамики происходящих в ней процессов; когда модель содержит множество взаимодействующих компонентов, функционирующих параллельно.

Имитационная модель дает возможность получить широкий простор в проведении оптимизационных экспериментов. Анализ чувствительности позволяет рассмотреть множество сценариев при изменении одной или нескольких переменных в модели [3]. Например, возможность более оперативно корректировать величину рабочего парка, а следовательно, объем входящего вагонопотока. Работа модели описана в [1, 11, 12].

Модель функционирует на основе данных о нахождении вагонов с грузом и без него в соответствующих блоках исследуемой транспортной системы. Переход от одного блока к другому осуществляется согласно технологии работы станции примыкания с учетом временных интервалов, величины которых зависят от моделируемых в конкретный момент операций с вагонами. Для расчета параметров имитации функционирования грузовой станции и ПНП используется статистика о прибытии поездов на станцию И-В, данные о технологическом процессе и сведения из работ [13, 14].

Выполнение расчетов с помощью имитационной модели работы станции и грузового пункта позволяет при оптимальном уровне загрузки грузовых фронтов определить максимальное число вагонов, ожидающих подачи на грузовые фронты. Отсюда можно вычислить требуемый для станции вагонный парк. Число и длина путей, количество локомотивов и средств механизации на складах будут определяться моделированием изменения искомых параметров и нахождением их оптимальных значений. Таким образом, технология обработки заявки на обслуживание клиента железнодорожного транспорта включает в себя: занятие путей станции примыкания группой вагонов назначением на данный складской комплекс, занятие и использование маневрового локомотива для подачи вагонов на место одновременной погрузки-выгрузки, собственно подачу вагонов и расстановку на погрузочно-разгрузочных путях, грузовые операции, сборку и уборку вагонов обратно на станцию примыкания [15].

Данные моделирования приведены в табл. 1. Графическая интерпретация экспериментальных процессов с моделью представлена на рис. 5.

Таким образом, как показал выполненный нами анализ, необходимо регулировать растущий грузопоток, оценивать реальные технологические возможности станций, корректировать планы местной работы, эффективно взаимодействовать с владельцами подвижного состава, а с помощью имитационного моделирования при многократном экспериментальном воздействии на всю исследуемую транспортную систему возможно оптимизировать количество перерабатываемых вагонов.

Определенные этапы перевозочного процесса образуют многооперационную систему с большой технологической, эксплуатационной и экономической разнородностью. Пребывание вагонов на станционных объектах не должно быть затратным ни по техническим, ни по материальным ресурсам станции. Поэтому управление вагонным парком — важнейшая задача, позволяющая сократить транспортные расходы.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования работы грузовой станции

Этап моделирования	Организация работы станции в соответствии с технологическим процессом	Фактическое распределение операций на станции
Этап 1. Прибытие поездов на грузовую станцию. Ожидание расформирования	По графику движения поездов на станцию примыкания в среднем за сутки прибывает 3 передаточных, или 1 передаточный и 1 маршрутный, или 2 маршрутных поезда	Обработка поезда по прибытии: треугольное распределение от 60 до 70 мин. Ожидание расформирования моделируется в зависимости от загруженности маневрового локомотива
Этап 2. Расформирование	На станции нет отдельных сортировочных путей, поэтому расформирование прибывающих поездов ведется с занятием приемо-отправочных путей. Всего на станции три таких пути без учета двух главных, по которым осуществляется сквозной пропуск поездов без расформирования, т.е. транзитных и пассажирских. Моделирование обслуживания поездов предполагает, что их нужно расформировать, если это передаточный, или делить на отцепы для подачи на грузовой фронт, если это маршрутный. В обоих случаях занимаются приемо-отправочные пути	Локомотив, освобождаясь от маневровых операций, приступает к расформированию передаточного поезда с занятием приемо-отправочных путей. Время операций на расформирование составов принимается по нормам затрат времени на расформирование-формирование составов на вытяжных путях. Число вагонов в отцепах распределяется случайным образом
Этап 3. Формирование подач на грузовой фронт	Происходит занятие маневрового локомотива и приемо-отправочных путей. По окончании процесса формирования подач и незанятости локомотива грузового пункта происходит занятие соединительного пути, и маневровым порядком вагоны доставляются на фронт погрузки-выгрузки	Технологическое время на сортировку вагонов для их подборки по местам одновременной погрузки-выгрузки определяется в зависимости от числа групп в подаче, среднего числа вагонов в подаче, а также норм времени на подборку вагонов
Этап 4. Следование со станции на грузовой пункт	Происходит занятие маневрового локомотива и соединительного пути	В соответствии с [14] время подачи вагонов на грузовой пункт зависит от числа вагонов в маневровом составе и длины соединительного пути, а также от того, включено ли опробование тормозов. Дополнительно к табличным значениям время на получение разрешения на подачу вагонов, проход составителя к стрелкам для их перевода, опробование тормозов у маневрового состава, а в конце передвижений и укладку тормозных башмаков составит около 20 мин на каждый рейс
Этап 5. Ожидание погрузки-выгрузки	Вагоны маневровым порядком локомотивом ПНП выставляются на выставочные пути	Расстановка вагонов по фронтам погрузки-выгрузки зависит от их длины и числа вагонов. Вместимость мест одновременной погрузки-выгрузки: первого — 15 ваг., второго — 20 ваг., третьего — 30 ваг. В соответствии с [14] время расстановки вагонов на местах погрузки-выгрузки зависит от количества вагонов в маневровом составе
Этап 6. Погрузочно-выгрузочные операции с вагонами и автомобилями при наличии прямого варианта	Одновременно с погрузкой или выгрузкой груза в вагоны при наличии прямого варианта осуществляется погрузка-выгрузка в автомобили	В зависимости от числа поданных вагонов методом линейной интерполяции рассчитывается время простоя под грузовыми операциями. Прибытие автотранспорта на грузовой пункт осуществляется в интервале 3 маш/ч
Этап 7. Ожидание на отправление с грузового пункта	Происходит занятие маневрового локомотива и выставочных путей. По окончании процесса формирования подачи и незанятости локомотива грузового пункта происходит занятие соединительного пути, и маневровым порядком вагоны доставляются на станцию	Технологическое время на сборку вагонов определяется в зависимости от числа вагонов, переставляемых на путь сборки формируемого состава, числа путей, с которых переставляются вагоны, а также норм времени на подборку вагонов
Этап 8. Следование с грузового пункта на станцию	Происходит занятие маневрового локомотива и соединительного пути	В соответствии с [14] время подачи вагонов на грузовой пункт зависит от числа вагонов в маневровом составе и длины соединительного пути, а также от того, включено ли опробование тормозов. Дополнительно к табличным значениям время на получение разрешения на подачу вагонов, проход составителя к стрелкам для их перевода, опробование тормозов у маневрового состава, а в конце передвижений и укладку тормозных башмаков составит около 20 мин на каждый рейс
Этап 9. Ожидание формирования и отправление	Происходит занятие маневрового локомотива и приемо-отправочных путей. По окончании процесса формирования состава и подачи поездного локомотива происходит освобождение приемо-отправочного пути, и вагоны отправляются со станции	Формирование одногруппного состава при накоплении вагонов на одном пути зависит от времени на расстановку вагонов в соответствии с требованиями ПТЭ, времени на подтягивание вагонов со стороны вытяжных путей, числа вагонов в формируемом составе, количества расцепок, необходимых для расстановки вагонов по требованиям ПТЭ, а также норм для определения технологического времени на расстановку вагонов в составе по требованиям ПТЭ

Литература

1. Псеровская Е. Д., Кагадий И. Н. Исследование системы «грузовая станция — путь необщего пользования» с использованием имитационной модели // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 4. С. 4–6. ISSN 2071-3827.
2. Акофф Р. Л. Искусство решения проблем. М., 1982. С. 108.
3. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении : учеб. пособие ; 2-е изд., перераб. и доп. М., 2011. 304 с.
4. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации : федер. закон Рос. Федерации от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ. М. : Книга Сервис, 2003. 120 с.
5. Рахимов К. Р. Необходимость и проблемы организации вагонопотоков на сети дорог в современных условиях // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2012. № 3 (32). С. 66–73. ISSN 1815-588X.
6. Саакян Ю. З. Анализ эффективности // Коммерсантъ Businnes Guide. 2011. № 64. С. 3–5.
7. Институт проблем естественных монополий [Сайт]. URL: http://ipem.ru (дата обращения: 31.08.2016).
8. О внесении изменений в некоторые акты Министерства путей сообщения Российской Федерации : приказ Минтранса России от 03.10.2011 г. № 258 [Электронный ресурс]. URL: http://www.6pl.ru/transp2/pMt_258.htm (дата обращения: 31.08.2016).
9. Кагадий И. Н. К вопросу о влиянии перерабатывающей способности станций на регулирование вагонопотоков в современных условиях // Сб. науч. тр. SWorld. 2014. Т. 1. № 2. С. 67–74.
10. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем: введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб. : БХВ-Петербург, 2009. С. 13.
11. Кагадий И. Н. Использование метода имитационного моделирования в местной работе железнодорожных станций // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : матер. 6-й междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 40-летию со дня образования Иркут. гос. ун-та путей сообщ. Иркутск, 2015. С. 96–98.
12. Кагадий И. Н. Системная динамика функционирования грузовой станции // Транспортный комплекс в регионах: опыт и перспективы организации движения : матер. междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2015. № 1. С. 226.
13. Нормы времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожных станциях ОАО «РЖД», нормативы численности бригад маневровых локомотивов. М., 2007. 98 с.
14. Сборник правил перевозок и тарифов железнодорожного транспорта Союза ССР № 306. М. : Транспорт, 1985. 31 с.
15. Псеровская Е. Д., Кагадий И. Н. Моделирование грузовой работы станции во взаимодействии с путями необщего пользования // Известия Транссиба. 2016. № 1 (25). С. 91–96. ISSN 2220-4245.

References

1. Pserovskaya E. D., Kagadiy I. N. Issledovanie sistemy «gruzovaya stanciya — put neobshhego polzovaniya» s ispolzovaniem imitacionnoj modeli [Research of system «cargo station — a way of uncommon use» with use of simulation model] // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka. 2015. № 4. S. 4–6. ISSN 2071-3827.
2. Akoff R. L. Iskusstvo resheniya problem [The art of solving problems]. M., 1982. 108 s.
3. Katalevskiy D. Yu. Osnovy imitacionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii : ucheb. posobie ; 2-e izd., pererab. i dop. [Foundations of imitation modeling and system analysis in management : textbook ; 2 ed., rev. and exp.]. M., 2011. 304 s.
4. Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossijskoj Federacii : feder. zakon Ros. Federacii ot 10.01.2003 g. № 18-FZ [RF Statute on Railway Transportation : Federal Law of the Russian Federation of 10.01.2003. No. 18-FZ]. M. : Kniga Servis, 2003. 120 s.
5. Rakhimov K. P. Neobkhodimost i problemy organizacii vagonopotokov na seti dorog v sovremennykh usloviyakh [Urgent need in empty wagon flows on the railway network in today's conditions] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya. 2012. № 3 (32). S. 66–73. ISSN 1815-588X.
6. Saakyan Yu. Z. Analiz effektivnosti [Performance analysis] // Kommersant Businnes Guide. 2011. № 64. S. 3–5.
7. Institut problem estestvennykh monopolij [Institute of the Natural Monopolies Problems]. [Site]. URL: http://ipem.ru (date access: 31.08.2016).
8. O vnesenii izmenenij v nekotorye akty Ministerstva putej soobshheniya Rossijskoj Federacii : prikaz Mintransa Rossii ot 03.10.2011 g. № 258 [On amending certain acts of the Ministry of Railways of the Russian Federation : decree of Russian Federation Mintransport of 03.10.2011 No. 258 [Electronic resource]. URL: http://www.6pl.ru/transp2/pMt_258.htm (date access: 31.08.2016).
9. Kagadiy I. N. K voprosu o vliyanii pererabatyvayushhej sposobnosti stancij na regulirovanie vagonopotokov v sovremennykh usloviyakh [Regarding the effect of stations processing capability on the regulation of railcar traffic volume in the modern conditions] // Sb. nauch. tr. SWorld. 2014. T. 1. № 2. S. 67–74.
10. Karpov Yu. G. Imitacionnoe modelirovanie sistem: vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5 [Imitation modeling of systems: introduction to modeling with AnyLogic 5]. SPb. : BHV-Peterburg, 2009. S. 13.
11. Kagadiy I. N. Ispolzovanie metoda imitacionnogo modelirovaniya v mestnoj rabote zheleznodorozhnykh stancij [Use of the imitation modeling method in the local operation of railway stations] // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona : mater. 6-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashh. 40-letiyu so dnya obrazovaniya Irkut. gos. un-ta putej soobshh. Irkutsk, 2015. S. 96–98.
12. Kagadiy I. N. Sistemnaya dinamika funkcionirovaniya gruzovoj stancii [System dynamics of a freight station functioning] // Transportnyj kompleks v regionakh: opyt i perspektivy organizacii dvizheniya : mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Voronezh, 2015. № 1. S. 226.
13. Normy vremeni na manevrovye raboty, vypolnyaemye na zheleznodorozhnykh stanciyakh OAO «RZhD», normativy chislennosti brigad manevrovykh lokomotivov [Time norms for shunting operations performed at railway stations of «RZhD» JSC, norms for shunting locomotive personnel crews]. M., 2007. 98 s.
14. Sbornik pravil perevozok i tarifov zheleznodorozhnogo transporta Soyuza SSR № 306 [Collected transporting rules and tariffs of the Soviet Union railway transport No. 306]. M. : Transport, 1985. 31 s.
15. Pserovskaya E. D., Kagadiy I. N. Modelirovanie gruzovoj raboty stancii vo vzaimodejstvii s putyami neobshhego polzovaniya [Modeling station's cargo work in interaction with ways of uncommon use] // Izvestiya Transsiba. 2016. № 1 (25). S. 91–96. ISSN 2220-4245.

УДК 656.21

Ольга Павловна Югрина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия,
Юлия Андреевна Танайно, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ НА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Olga Pavlovna Yugrina, PhD in Engineering, Associate Professor, Track Maintenance Management Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia,
Yulia Andreyevna Tanaino, PhD in Engineering, Associate Professor, Track Maintenance Management Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

Specifics of heavyweight trains forming on the West Siberian railway

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы организации тяжеловесного движения, а также определен объем вагонопотоков для формирования поездов повышенной массы и длины на станции Алтайской Западно-Сибирской железной дороги. Установлено, что при формировании тяжеловесных поездов в парке станции возникают дополнительные затраты времени, связанные с пополнением состава группой вагонов. Положительным результатом формирования поездов весом 9000 т при проследовании по участку Алтайская — Иртышское является повышение производительности локомотива. В целом эффективность тяжеловесного движения при используемом парке локомотивов заключается в увеличении пропускной способности полигона, т.е. в сокращении числа поездов.

Ключевые слова: тяжеловесные поезда, сортировочная станция, транзитные вагонопотоки, график движения.

Summary

The article reviews the issues of heavyweight transport organization, and defines the amount of car traffic volume for forming trains of increased weight and length at the Altayskaya station of the West Siberian railway. It has been ascertained that shaping heavyweight trains at the park incurs additional time spending due to adding groups of cars to a train. The positive result of shaping trains of 9000 tons weight for passage over the Altayskaya — Irtyshskoe section is the improvement in locomotive performance. Overall, the effect of heavyweight train operation with the used locomotive fleet is the improvement of the section throughput increase, i. e. the decrease of the number of trains.

Keywords: heavyweight train, sorting yard, transit car traffic, movement schedule.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-83-86

В среднесрочной перспективе обеспечить увеличение провозной способности на сети железных дорог в условиях ограниченных инвестиционных ресурсов возможно за счет повышения эффективности перевозочного процесса, в том числе за счет организации тяжеловесного движения. Эффект от тяжеловесного движения достигается за счет сокращения потребной пропускной способности, увеличения веса поезда, следующего по конкретной нитке графика, что способствует повышению производительности локомотивов [1]. Также грузовые поезда с увеличенной массой и длиной могут быть эффективны при полном заполнении графика движения и исчерпании пропускной способности перегонов и участков, особенно при проведении летних путевых работ.

Для развития тяжеловесного движения необходимо определить факторы, влияющие на его организацию. Это необходимая инфраструктура железных дорог, обеспечивающая безопасный пропуск составов по перегонам, выполнение технических операций с ними в пути следования, формирование грузовых поездов определенных назначений на сортировочных станциях, а также технология пропуска поездопотока. Полигоном для отработки формирования и пропуска поездов повышенной массы можно считать Среднесибирский ход Западно-Сибирской железной дороги, обеспечивающий пропуск массового грузопотока (угля) в северо-западную часть страны для экспорта через морские порты.

Исторически сложилось, что порожние полувагоны для погрузки угля на юге Кузбасса, следующие с запада России через станцию Входную, направляются далее Среднесибирским ходом Входная — Иртышское — Артышта-2 — углепогрузочные станции Кузбасса. Это позволяло не загружать Транссибирский ход большими объемами пассажирских перевозок, а главное, не загружать направление Инская — Белово — Артышта с недостаточной пропускной способностью. С целью усиления пропускной способности Среднесибирского хода были проведены

e-mail: yugrinaop@ya.ru, chechulinau@gmail.com
Дата поступления: 24.10.2016

реконструктивные мероприятия, и в настоящее время станции имеют технические возможности для пропуска, а сортировочная станция Входная — для формирования составов длиной 100 усл. ваг. Чтобы обеспечить парность движения поездов на этом полигоне, целесообразен пропуск тяжеловесных составов в груженом нечетном направлении, поэтому ограничениями будут весовые нормы для используемых локомотивов.

Полигон для пропуска тяжеловесных поездов требует использования локомотивного парка с определенными техническими характеристиками. В настоящее время пропуск поездов с увеличенной массой уже осуществляется не только в пределах Среднесибирского хода, но и на направлении Алтайская — Северо-Запад (ст. Лужская), так как по маршруту следования этого вагонопотока имеются участки с ограничением пропускной способности, а парк локомотивов достаточно обновлен.

Длина путей общего и необщего пользования на углепогрузочных станциях Кузбасса не позволяет формировать поезда длиной более 71 усл. ваг., поэтому в качестве полигона для тяжеловесного движения в нечетном направлении можно рассматривать вышеупомянутый Алтайская — Северо-Запад (ст. Лужская) через Называевскую — Екатеринбург либо Исилькуль — Колчедан — Екатеринбург. Формирование поездов массой 9000 т производится, как правило, за счет пополнения отправительского маршрута с кузбасского направления готовой группой вагонов соответствующего назначения в парке Г станции Алтайской [2]. Для этого на Алтайской необходимо иметь группу из 28–29 вагонов, которая маневровым порядком доставляется в парк Г из парка Б. Далее эта группа прицепляется к транзитному поезду, прибывшему с Кузбасса.

Вагонопоток на Северо-Запад складывается из погруженных на Кузбассе вагонов, следующих через сортировочные станции Инскую или Алтайскую. Для тяжеловесных поездов назначением Кузбасс — Алтайская — Омск — Называевская — Исилькуль в нечетном направлении целесообразно для Алтайской отдельно рассмотреть транзитный вагонопоток без переработки и с переработкой.

Транзитными без переработки поездами, пригодными для тяжеловесного движения, являются, как правило, отправительские маршруты с углепогрузочных станций Кузбасса. Объемы погрузки по назначениям и станциям, а также типы поездных формирований, следующих через Алтайскую, представлены на рис. 1.

Поездопоток назначением Лужская составляет 2 состава в сутки, а маршрутизированный за Называевскую — 14, что позволяет формировать тяжеловесные поезда в этом направлении путем пополнения разборочным потоком.

Транзитный вагонопоток с переработкой, формируемый на станции Алтайской, с разложением по назначениям следования представлен на рис. 2.

Для организации тяжеловесного движения путем пополнения отправительских маршрутов могут быть использованы вагонопотоки назначением Лянгасово и Екатеринбург-Сортировочный. Сейчас их объемы составляют 168 и 180 ваг./сут соответственно, т.е. имеющимся вагонопотоком можно пополнить назначением Екатеринбург до 6 поездов в сутки, а Лянгасово — до 5. В то же время при формировании тяжеловесных поездов в сортировочном парке станции Алтайской для тех же назначений потребуется всего по 2 состава (на станции уже имеются пути достаточной длины).

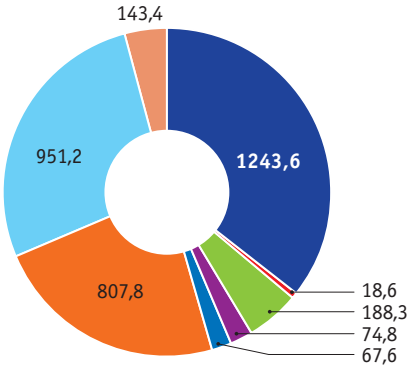


***Рис. 1*. Соотношение транзитного потока без переработки по направлениям следования:**
■ — Алтайская; ■ — Барнаул; ■ — Заринская; ■ — Инская; ■ — Аблык; ■ — за Исилькуль; ■ — за Называевскую, кроме Лужской; ■ — за Называевскую на Лужскую

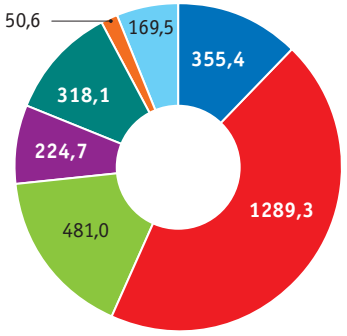


***Рис. 2*. Транзитные потоки с переработкой по направлениям следования:**
■ — Инская; ■ — на станции ЗСЖД; ■ — за Называевскую, кроме Лужской; ■ — Лужская ЭКС; ■ — за Исилькуль на Челябинск-Главный; ■ — за Кулунду на Павлодар; ■ — за Локоть на Семипалатинск

Обусловленные формированием тяжеловесных поездов дополнительные технологические операции сопровождаются затратами времени и технических средств, что находит отражение в основном показателе, характеризующем качество работы станции, — простое вагонов. В составе поезда повышенной массы простой вагонов складывается из простоя транзитных вагонов без переработки (простой транзитного поезда для пополнения) и простоя транзитных вагонов с переработкой (пересылаемых из парка Б в пополнение) и рассчитывается по формуле

$$t = \sum \frac{nt_{\text{с}}}{n_{\text{с/п}}} + \sum \frac{nt_{\text{б}}}{n_{\text{б/п}}},$$

где $nt_с$ — простой вагонов с переработкой на станции А, ваг.-ч;

$nt_б$ — простой вагонов без переработки в парке Г, ваг.-ч;

$n_{с/п}$, $n_{б/п}$ — количество вагонов с переработкой и без переработки соответственно.

На рис. 3 представлена схема выполняемых операций и соответствующих им элементов простоя вагонов при формировании тяжеловесного поезда на станции Алтайской.

В соответствии с графиком в парке Г затраты времени на обработку транзитного состава составляют 129 мин (2,15 ч). Но так как возникает элемент ожидания операций, это время увеличивается на величину ожидания (ожидание обработки, локомотива, отправления). Тогда простой транзитного вагона без переработки составляет 3,47 ч, что на 1,38 ч больше значения, установленного в технологическом графике обработки.

Простой транзитного вагона с переработкой составляет на станции 10,29 ч, в парке Г — 4,28 ч. Согласно технологическому графику, операции по технической обработке составов производят параллельно обработке основной группы (транзитного поезда), т.е. группа вагонов технически обслуживается в парке Б и повторно не обрабатывается в парке Г, так как эта группа следует в парк Г по перегону и должна быть пригодной для нахождения в составе поезда. Затем осуществляется полное и сокращенное опробование тормозов всего состава. Общий простой с учетом ожидания группы вагонов в пополнение составляет 14,57 ч, что превышает установленные нормативы. Дополнительные расходы для транзитных вагонов без переработки, согласно нашим расчетам, составляют 32,5 тыс. руб./сут, с переработкой — 15,2 тыс. руб., общая сумма дополнительных затрат — 47,7 тыс. руб./сут.

При наличии достаточной длины путей для тяжеловесного поезда в разных парках станции возможны формирование, обработка в пути следования и расформирование составов, но при сложившейся мощности струи вагонопотока время накопления формируемых назначений увеличивается из-за большего количества вагонов в составе. Расформирование отправительских маршрутов до станции назначения нарушает технологию пропуска транзитного поездопотока и усложняет работу станций назначения с прибывшими под выгрузку составами. Поэтому количество формируемых тяжеловесных поездов на направлении ограничено размерами вагонопотока соответствующих назначений.

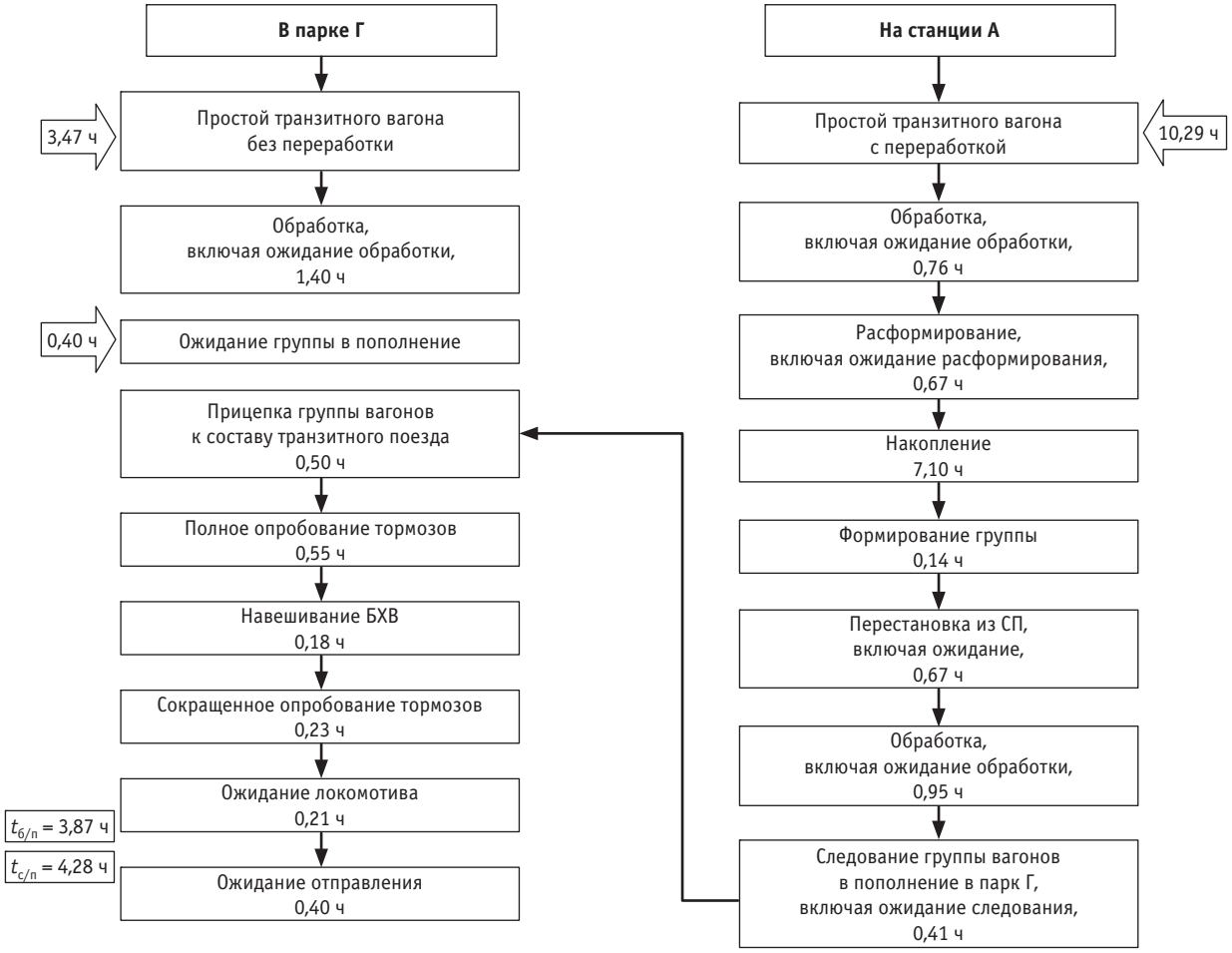


***Рис. 3*. Элементы простоя вагонов тяжеловесного поезда в парке Г**

Для отправления тяжеловесных поездов со станции Алтайской за стык Исилькуль нормативным графиком предусмотрено 17 ниток, за стык Называевская — 8 ниток. Таким образом, исходя из расчетов в зависимости от мощностей назначения на Челябинск и Екатеринбург-Сортировочный следует, что вагонопотока достаточно для пополнения 14 отправительских маршрутов за стык Исилькуль и 6 маршрутов — за стык Называевская. При заданных графиковых размерах и существующих объемах перевозок задача невыполнима из-за недостатка вагонопотока, но при изменении направления следования вагонов на запад с Транссибирского хода на Среднесибирский увеличение числа тяжеловесных поездов возможно.

Для определения целесообразности формирования тяжеловесных поездов применяются показатели использования локомотивного парка — вес поезда и производительность локомотива. При расчете производительности по действующей методике получается, что производительность на локомотив увеличивается, а на секцию в силу некратности существующих и критических весовых норм она больше при движении поездов весом 6300 т, поскольку более полно используется мощность локомотива [3]. При проследовании по участку Алтайская — Иртышское увеличение производительности локомотива составляет 1041,8 тыс. т-км/лок-сут. Но учитывая, что при весе состава 6300 т используются 2 секции, а при весе 9000 т — 3 секции, производительность локомотива на секцию на этом же полигоне снижается на 86,8 тыс. т-км/лок-сут. Следует также отметить, что при тяжеловесном движении уменьшается потребное количество локомотивных бригад, а это значительная экономия эксплуатационных расходов.

Основной эффект от тяжеловесного движения при используемом парке локомотивов и росте вагонопотока заключается в увеличении пропускной способности всего направления следования Кузбасс — Урал, а также в снижении непарности графика на полигоне Алтайская — Входная. В дальнейшем обновление локомотивного парка позволит повысить массу поездов за счет их формирования пополнением отправительских маршрутов без дополнительного удлинения путей на углепогрузочных станциях Кузбасса.

Литература

1. Явриянц К. В. Пропуск тяжеловесных поездов: проблемы и скрытые резервы // Железнодорожный транспорт. 2014. № 3. С. 41–43. ISSN 0044-4448.
2. Пехтерев Ф. С. Эффективность организации движения поездов весом 9000 тонн на выделенных направлениях // Железнодорожный транспорт. 2012. № 6. С. 25–29. ISSN 0044-4448.
3. Танайно Ю. А. Исследование параметров обращения тяжеловесных и соединенных поездов на Западно-Сибирской железной дороге // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 4. С. 9–11. ISSN 2071-3827.

References

1. Yavriyants K. V. Propusk tyazhelovesnykh poezdov: problemy i skrytye rezervy [Heavyweight train passage: problems and hidden reserves] // Zheleznodorozhnyj transport. 2014. № 3. S. 41–43. ISSN 0044-4448.
2. Pekhterev F. S. Effektivnost organizacii dvizheniya poezdov vesom 9000 tonn na vydelennykh napravleniyakh [Efficiency of organizing 9000 tons train circulation on dedicated directions] // Zheleznodorozhnyj transport. 2012. № 6. S. 25–29. ISSN 0044-4448.
3. Tanaino Yu. A. Issledovanie parametrov obrashheniya tyazhelovesnykh i soedinyonnykh poezdov na Zapadno-Sibirskoj zheleznoj doroge [Studying the parameters of train operations for heavy freight and coupled trains at the West Siberian railway] // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka. 2015. № 4. S. 9–11. ISSN 2071-3827.

УДК 629.4.027.115

Анатолий Васильевич Бородин, доктор технических наук, профессор кафедры «Теория механизмов и детали машин» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Дмитрий Борисович Гриц, преподаватель кафедры «Теория механизмов и детали машин» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

СНИЖЕНИЕ КОНТАКТНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ В ПОДШИПНИКАХ БУКС ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Anatoliy Vasiliyevich Borodin, DSc in Engineering, Professor, Theory of Mechanisms and Machine Parts Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Dmitriy Borisovich Grits, Lecturer, Theory of Mechanisms and Machine Parts Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Decreasing contact stress in bearings of freight car boxes

Аннотация

Предложены конструктивные решения подшипниковых узлов грузовых вагонов для эксплуатации при перспективных нагрузках. Рассматриваются два варианта модернизации шейки оси колесной пары: выполнение ее ступенчатой и с уменьшенной консольной частью. Проанализированы контактные напряжения, возникающие на поверхностях дорожек качения типового подшипника и подшипников, используемых в предлагаемых конструкциях, при перспективных нагрузках. В соответствии с полученными результатами сделаны выводы о наиболее благоприятном распределении контактных напряжений для ступенчатой оси.

Ключевые слова: подшипник, нагрузка, контактные напряжения, распределение, модернизация.

Summary

Proposed are design solutions for freight cars bearing units for operation with prospective loads. Two options of the wheel set journal axle modernization are proposed: implementing it stepped or with a decreased console part. The contact stresses arising on the typical bearing raceways surfaces and bearings used in the proposed implementations, under prospective loads, are analyzed. In accordance with the obtained results conclusions are made that the most acceptable distribution of contact stresses is achieved in the case of stepped axle.

Keywords: bearing, load, contact stresses, distribution, modernization.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-87-90

При планируемом увеличении скоростей движения и осевой грузоподъемности грузовых вагонов [1] одна из важнейших задач заключается в сохранении работоспособности подшипниковых узлов.

В работе [2] для повышения жесткости оси колесной пары и снижения взаимного перекоса колец подшипников предложены два варианта модернизации шейки оси: первый — выполнение ее ступенчатой с увеличенным диаметром для посадки заднего подшипника (рис. 1*а*), второй — применение шейки с уменьшенной консолью (рис. 1*б*).

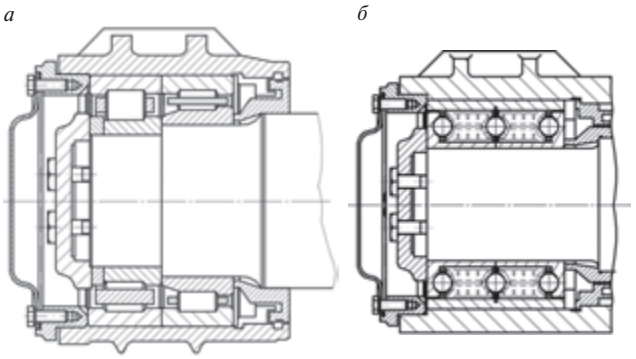


Рис. 1. **Модернизированная шейка оси:**
а — ступенчатая ось; *б* — ось с уменьшенной консолью

В процессе эксплуатации на дорожки качения подшипниковых узлов действуют переменные контактные напряжения, что приводит к усталостному выкрашиванию поверхностных слоев материала. Оценим контактные напряжения, возникающие при перспективных нагрузках на дорожках качения типовых подшипников и подшипников, применяемых для модернизированных шеек осей колесных пар.

e-mail: tmdm@omgups.ru, gritstmdm@mail.ru
Дата поступления: 28.10.2016

Контактные напряжения можно определить по формуле [3], МПа:

$$\sigma_{\text{Н}} = 1{,}925 \cdot \sqrt{\frac{P_i}{l_{\text{р}}} \cdot \left(\frac{2}{d_{\text{р}}} \pm \frac{1}{R_{\text{В(Н)}}} \right)}, \quad (1)$$

где P_i — нагрузка на ролик, Н;

$l_{\text{р}}$ и $d_{\text{р}}$ — соответственно длина и диаметр ролика, м;

$R_{\text{В}}$ и $R_{\text{Н}}$ — радиус дорожки качения внутреннего и наружного колец соответственно, м (знак плюс берется для внутреннего, знак минус — для наружного кольца).

Для цилиндрических подшипников с учетом радиального зазора, деформации колец и роликов при установке колец в жестком корпусе нагрузка на наиболее нагруженный ролик рассчитывается по выражению, Н:

$$P_0 = \frac{4{,}6 \cdot P_{\text{п}}}{z_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{п}}$ — радиальная нагрузка на подшипник, Н;

$z_{\text{п}}$ — число роликов в одном ряду.

Чтобы определить нагрузку на ролики, находящиеся в зоне нагружения, необходимо рассмотреть условие равновесия внутреннего кольца подшипника:

$$P_{\text{п}} = P_0 + 2 \cdot P_1 \cdot \cos(\psi) + 2 \cdot P_2 \cdot \cos(2 \cdot \psi) + \ldots$$
$$\ldots + 2 \cdot P_i \cdot \cos(i \cdot \psi), \quad (3)$$

где P_i — силы, действующие на кольцо от i-го тела качения, Н;

i — номер тела качения (отсчет ведется от центрального тела качения, расположенного на оси симметрии нагруженной зоны);

ψ — угловой шаг тела качения.

Тогда из формулы (3) можно получить зависимость для определения нагрузки от i-го тела качения:

$$P_i = \frac{4{,}6 \cdot P_{\text{п}}}{z_{\text{п}}} \cdot \cos^2(i \cdot \psi). \quad (4)$$

Исходя из условия, что действующая на подшипник радиальная нагрузка воспринимается телами качения в зоне, ограниченной дугой не более 180° [4], примем следующие допущения для расчетов:

нагрузка между подшипниками распределена неравномерно: 60 % нагрузки воспринимает задний подшипник и 40 % — передний [5];

геометрические размеры тел качения и дорожек качения идеально точные.

При увеличении числа тел качения необходимо применять конструкцию сепаратора, отличную от типового полиамидного сепаратора, имеющего 15 гнезд для размещения тел качения. Используем конструкцию [6], представленную на рис. 2.

Для модернизированных подшипниковых узлов в зоне нагружения будет находиться 11 тел качения, в то время как в типовом нагружены только 7 тел качения.

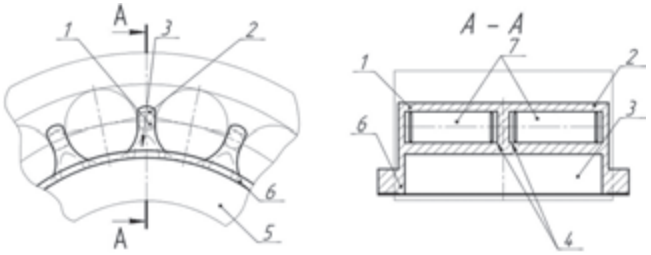


Рис. 2. **Сепаратор роликоподшипника:**
1 — стойка; *2* — головка стойки; *3* — полость для размещения смазки; *4* — гнезда для сепарирующих тел качения; *5* — внутреннее кольцо подшипника; *6* — кольцо сепаратора; *7* — сепарирующие тела качения

Рассматривая в качестве перспективных нагрузки 250 и 300 кН, выполним расчет нагрузки на тела качения (табл. 1) и действующие контактные напряжения с учетом принятых допущений.

Таблица 1

Результаты расчета нагрузки, действующей на нагруженные тела качения

Подшипник	Кольцо	Номер ролика	Нагрузка, Н	
			250 кН	300 кН
Типовой	Внутреннее	3, 3′	1436	1723
		2, 2′	6732	8079
		1,1′	12549	15059
		0	15037	18044
	Внешнее	3, 3′	2154	2585
		2, 2′	10099	12119
		1, 1′	18824	22589
		0	22555	27066
С увеличенным посадочным диаметром	Внутреннее	5, 5′	208	249
		4, 4′	1769	2123
		3, 3′	4397	5276
		2, 2′	7256	8706
		1, 1′	9439	11326
		0	10252	12303
	Внешнее	5, 5′	311	374
		4, 4′	2654	3185
		3, 3′	6595	7914
		2, 2′	10884	13060
		1, 1′	14158	16990
		0	15379	18454
С уменьшенной консолью и увеличенным посадочным диаметром	Внутреннее	5, 5′	208	249
		4, 4′	1769	2123
		3, 3′	4397	5276
		2, 2′	7256	8706
		1, 1′	9439	11326
		0	10252	12303
	Внешнее	5, 5′	311	374
		4, 4′	2654	3185
		3, 3′	6595	7914
		2, 2′	10884	13060
		1, 1′	14158	16990
		0	15379	18454

В связи с увеличением числа тел качения в модернизированных подшипниках нагрузка на них становится меньше, чем в типовом подшипнике, что благоприятно сказывается на их работоспособности. Таким образом, ролик входит в рабочую зону с меньшей нагрузкой, и пиковая нагрузка достигается более плавно. Эту зависимость можно проиллюстрировать графиком на рис. 3.

Поскольку нагрузка на тело качения зависит только от общей нагрузки на подшипник и от положения нагружаемого ролика, то для обоих вариантов модернизации (с уменьшенной консольной частью и с увеличенным посадочным диаметром) нагрузки на тела качения совпадают.

Рассмотрим контактные напряжения, возникающие на поверхностях дорожек качения внутреннего и внешнего колец заднего и переднего подшипников при этих нагрузках и представим их в виде эпюр (рис. 4).

Анализ полученных эпюр позволяет сделать вывод, что на поверхностях дорожек качения подшипника для оси с уменьшенной консолью контактные напряжения выше, чем для типового, следовательно, несмотря на снижение нагрузок на тела качения, этот вариант использовать нецелесообразно. Наиболее благоприятное распределение контактных напряжений наблюдается для подшипника с увеличенным посадочным диаметром.

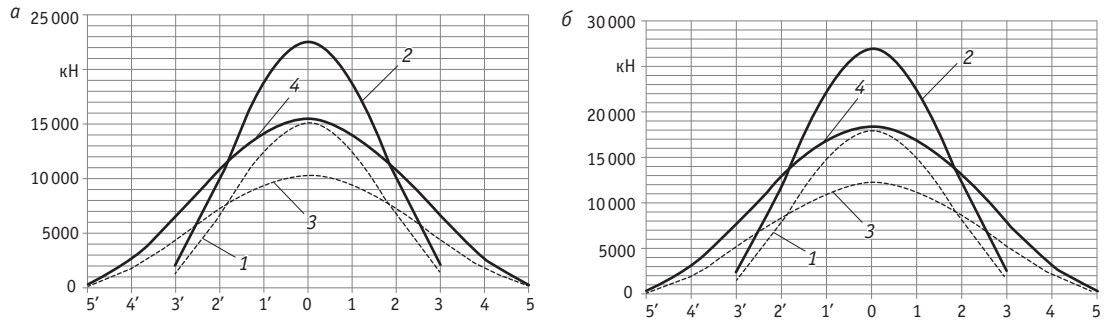


***Рис. 3*. Распределение нагрузки на тела качения при нагрузке 250 кН (*а*) и 300 кН (*б*):**
1, *2* — передний и задний типовые подшипники; *3*, *4* — передний и задний модернизированные подшипники

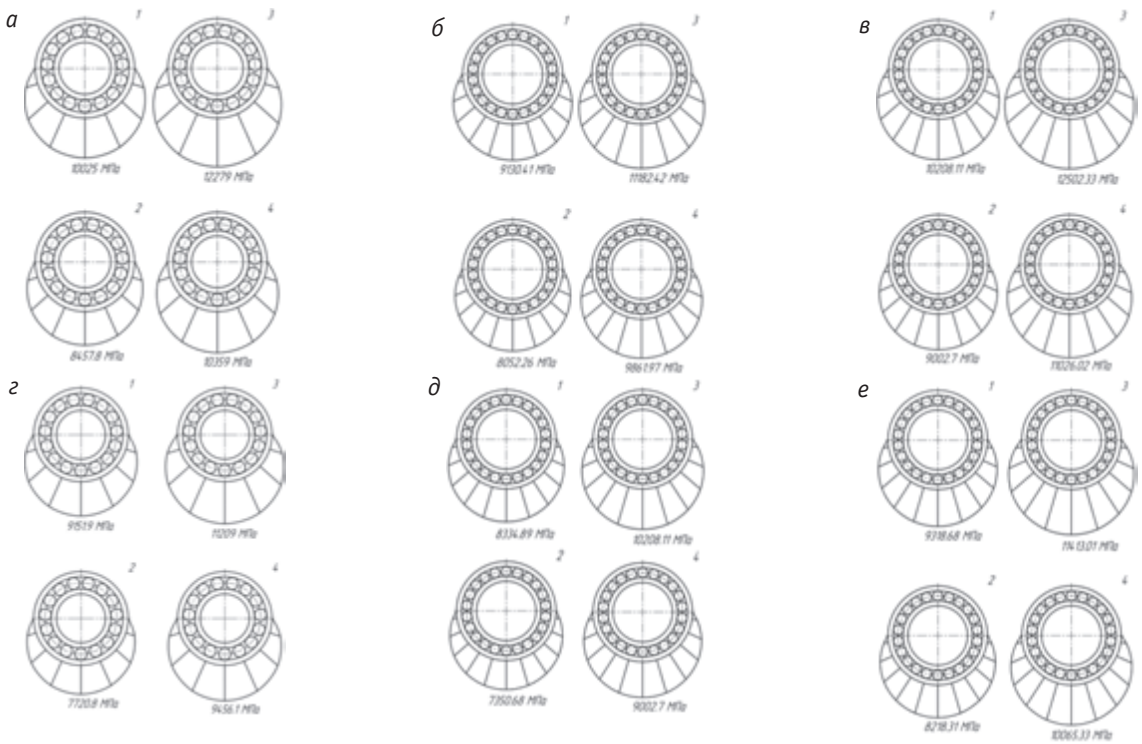


***Рис. 4*. Эпюры контактных напряжений:**
1, *2* — внутреннее и наружное кольца переднего подшипника; *3*, *4* — внутреннее и наружное кольца заднего подшипника;
а — нагрузка 250 кН, типовой подшипник; *б* — нагрузка 250 кН, подшипник с увеличенным посадочным диаметром;
в — нагрузка 250 кН, подшипник с уменьшенной консолью; *г* — нагрузка 300 кН, типовой подшипник;
д — нагрузка 300 кН, подшипник с увеличенным посадочным диаметром; *е* — нагрузка 300 кН, подшипник с уменьшенной консолью

Таким образом, оценка контактной напряженности типовых и модернизированных подшипников показала, что наименьшие напряжения испытывают подшипники на ступенчатой оси. При монтаже внутреннего кольца заднего подшипника посадочная поверхность под передний подшипник не повреждается. Выполнение ступенчатой шейки позволяет увеличить жесткость оси колесной пары, снизить контактные напряжения на дорожках колец подшипника и вероятность проворота его внутреннего кольца.

Литература

1. О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 17.06.2008 № 877-р // Рос. газета. 2011. 30 марта.
2. Бородин А. В., Иванова Ю. А., Гриц Д. Б. Буксовый узел грузового вагона с повышенной жесткостью шейки оси // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2016. Вып. 4. С. 5–8. ISSN 1813-8225.
3. Вагоны. Конструкция, теория и расчет : учеб для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. Л. А. Шадура ; 3-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1980. 439 с.
4. Биргер И. Б., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин : справ. М. : Машиностроение, 1979. 702 с.
5. Волков Н. Н., Родзевич Н. В. Подшипники качения колесных пар вагонов и локомотивов. М. : Машиностроение, 1972. 168 с.
6. Сепаратор роликоподшипника / А. В. Бородин, Д. Б. Гриц : пат. 156949 Рос. Федерация. № 2015114128/11 ; заявл. 16.04.15 ; опубл. 20.11.15, Бюл. № 32.

References

1. O Strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii do 2030 goda : rasporyazhenie Pravitelstva Ros. Federacii ot 17.06.2008 № 877-r [On the strategy of railway transport development in the Russian Federation up to 2030 : decree of the Russian Federation government of 17.06.2008 No. 877-r] // Ros. gazeta. 2011. 30 marta.
2. Borodin A. V., Ivanova Yu. A., Grits D. B. Buksovyj uzel gruzovogo vagona s povyshennoj zhestkostyu shejki osi [Freight car box unit with increased journal axle rigidity] // Omskij nauchnyj vestnik. Ser. Pribory, mashiny i tekhnologii. 2016. Vyp. 4. S. 5–8. ISSN 1813-8225.
3. Vagony. Konstrukciya, teoriya i raschyot : ucheb. dlya vuzov zh.-d. transp. / Pod red. L. A. Shadura ; 3-e izd., pererab. i dop. [Railway cars. Design, theory and calculations : textbook / Ed. by L. A. Shadur ; 3rd ed., rev. and exp.]. M. : Transport, 1980. 439 s.
4. Birger I. B., Shorr B. F., Iosilevich G. B. Raschyot na prochnost detalej mashin : sprav. [Strength calculation of machine parts : reference book]. M. : Mashinostroenie, 1979. 702 s.
5. Volkov N. N., Rodzevich N. V. Podshipniki kacheniya kolesnykh par vagonov i lokomotivov [Rolling bearings of railway cars and locomotive axle pairs]. M. : Mashinostroenie, 1972. 168 s.
6. Separator rolikopodshipnika [Roller bearing separator] / A. V. Borodin, D. B. Grits : pat. 156949 Ros. Federaciya. № 2015114128/11 ; zayavl. 16.04.15 ; opubl. 20.11.15, Byul. № 32.

УДК 621.43.01

Борис Александрович Шароглазов, доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), Челябинск, Россия,
Олег Григорьевич Машков, аспирант Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), Челябинск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ЦИКЛА И ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ РАБОТУ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, НА СТАДИИ ПРЕДПРОЕКТНЫХ И ПРОЕКТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Boris Alexandrovich Sharoglazov, DSc in Engineering, Professor, Combustion Engines Department, South Ural State University (National Research University), SUSU, Chelyabinsk, Russia,
Oleg Grigorievich Mashkov, postgraduate student, South Ural State University (National Research University), SUSU, Chelyabinsk, Russia

Modeling the working cycle and parameters influencing the operation of a combined power plant at the pre-project and project research stages

Аннотация

В статье применительно к стадии предпроектных и проектных работ предложен метод численного моделирования процессов рабочего цикла (и цикла в целом) поршневого двигателя, снабженного агрегатом наддува со свободным ротором. Задача решена для условий работы энергетической установки на режимах полных нагрузок, в частности на режимах безрегуляторной ветви внешней скоростной характеристики. Приведена система уравнений для расчета параметров и показателей цикла. Даны рекомендации по выбору исходных данных для расчета.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, поршневой двигатель, газотурбинный нагнетатель, режим работы, компрессор, турбина, рабочий цикл, внешняя скоростная характеристика.

Summary

The article proposes a method of numerical modeling for the working cycle processes (and cycle overall) of a piston engine equipped with a free-rotor supercharger unit, in application to pre-project and project research. The task is solved for the full-load operation conditions of the power plant, including for the modes of regulator-free branch of external speed characteristic. A system of equations for calculating the cycle parameters and values is presented. Recommendations for selecting initial data for calculation are provided.

Keywords: internal combustion engine, piston engine, gas turbine supercharger, operating mode, compressor, turbine, working cycle, external speed characteristic.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-91-97

Поршневой двигатель внутреннего сгорания (ПДВС) благодаря малой массе и габаритам, высокому коэффициенту полезного действия (КПД) и надежности есть и останется на долгие годы основным источником механической энергии на транспортных энергетических установках. С развитием конструкций ПДВС возникает необходимость в повышении их удельной мощности и улучшении качеств рабочего цикла (РЦ). К числу широко распространенных средств, применяемых для этих целей, относится оснащение ПДВС устройствами, которые позволяют подавать в цилиндры повышенные количества окислителя за счет его уплотнения. Чаще всего такое уплотнение, наддув, обеспечивается агрегатами газотурбинного наддува (ГТН).

Параметры состояния рабочего тела (РТ), текущие и показатели цикла в целом, в такой комбинированной энергетической установке (КЭУ), включающей ПДВС и ГТН, взаимообусловлены. Сегодня при создании форсированных по среднему эффективному давлению цикла энергетических установок эту взаимосвязь процессов, протекающих в агрегатах КЭУ, необходимо учитывать уже на стадии предпроектных и проектных разработок, что требует соответствующего аналитического описания.

Важно отметить, что первые шаги аналитического описания сложных теплофизических процессов, составляющих РЦ (пусть еще очень простых, некомбинированных ЭУ), были сделаны у нас, в России, в начале прошлого столетия. Первый в мире тепловой расчет РЦ был предложен видным отечественным ученым В. И. Гриневецким [1] и в дальнейшем усовершенствован Н. Р. Брилингом [2], Е. К. Мазингом [3], Н. В. Иноземцевым, В. К. Кошкиным [4, 5] и др.

e-mail: sharoglazovba@susu.ru, migro25@mail.ru
Дата поступления: 15.10.2016

Во второй половине прошлого столетия на пороге внедрения ЭВМ в практику расчетных исследований отечественными учеными Б. М. Гончаром [6] и И. И. Вибе [7, 8] были предложены новые аналитические схемы расчета сгорания (и рабочего цикла), которые до сих пор широко используются и в России, и за рубежом. К 1970–1990 гг. относится начало работ по численному моделированию процессов в КЭУ (ПДВС и ГТН) [9–12 и др.]. Для этого же периода характерно и повышение интереса к ЭВМ-разработкам иностранных компаний, реализуемым сегодня в программных продуктах (ПП), имеющих коммерческую значимость. Наиболее известные среди таких ПП — AVL BOOST (Австрия) [13], Engine Analyzer Pro (США) [14], Lotus Engineering Software (Англия) [15]. К достоинствам названных ПП можно отнести наличие независимой модели работы каждого элемента двигателя (или КЭУ), что позволяет гибко формировать схему расчета с учетом реальной конфигурации ПДВС (или КЭУ) [16]. Главный недостаток импортных ПП — недоступность решаемой математической модели (двигателя или КЭУ) для отечественного пользователя, что побуждает к разработке собственного (российского) аналитического, алгоритмического и программного обеспечения.

Для целей рассматриваемой в статье задачи важным является аналитическое описание процессов (и их взаимосвязей), протекающих в агрегатах (цилиндре ПДВС, компрессоре, турбине, впускных и выпускных трубопроводах) газотурбинной энергетической установки в условиях ее работы на полных нагрузках. Имеются в виду установившиеся режимы работы КЭУ по безрегуляторной ветви внешней скоростной характеристики (ВСХ). Применительно к названным условиям процессы, протекающие в каждом из агрегатов КЭУ, связаны и взаимообусловлены, поскольку рабочее тело после сжатия в компрессоре подается в ПДВС, а из ПДВС (в уже измененном качестве по химическому составу и параметрам состояния) — в турбину. Турбина большую часть энергии выпускных газов передает компрессору.

Этой совокупностью процессов, условиями их протекания в каждом из агрегатов комбинированной установки определяется качество реализуемого в ней рабочего цикла.

Особенности изменения состояния РТ (давления, температуры, объема и др.) с учетом воздействия на них меняющихся при реализации цикла теплофизических, механических и газодинамических обстоятельств описываются системой уравнений:

$$p = p_a \cdot \left[\frac{\psi(\alpha_a)}{\psi(\alpha)}\right]^{n_1} \cdot \zeta_1 + \left[\frac{2q_z(x_j - x_{j-1}) + p_{j-1}(K_{j-(j-1)}v_{j-1} - v_j)}{K_{j-(j-1)}v_j - v_{j-1}}\right] \cdot \zeta_2 + p_z \cdot \left[\frac{\psi(\alpha)}{\psi(\alpha_b)}\right]^{n_2} \cdot \zeta_3; \quad (1)$$

$$T = T_a \cdot \left[\frac{\psi(\alpha_a)}{\psi(\alpha)}\right]^{n_1 - 1} \cdot \zeta_1 + \left[\frac{T_y}{p_y \cdot v_y} \cdot \frac{p_j \cdot v_j}{\beta_j}\right] \cdot \zeta_2 + T_z \cdot \left[\frac{\psi(\alpha)}{\psi(\alpha_b)}\right]^{n_2 - 1} \cdot \zeta_3; \quad (2)$$

$$x = 1 - \exp\left[-6{,}908 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}\right]; \quad (3)$$

$$q_z = \frac{\xi \cdot H_u}{\alpha_c \cdot L_0(1+\gamma)} \cdot x; \quad (4)$$

$$K = \frac{k+1}{k-1};$$

$$k = 1{,}259 - \frac{76{,}7}{T} - \left(0{,}005 - \frac{0{,}0372}{\alpha_c}\right) \cdot x; \quad (5)$$

$$\psi(\alpha) = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \sigma(\alpha); \quad (6)$$

$$\sigma(\alpha) = 1 + \frac{1}{\lambda} - \left(\cos\alpha + \frac{1}{\lambda}\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2\alpha}\right); \quad (7)$$

$$v = \frac{v_a}{\varepsilon} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \sigma(\alpha)\right). \quad (8)$$

В системе (1)–(8) используются следующие обозначения: p, T, v — текущие параметры состояния РТ в цилиндре поршневой машины (соответственно давление, МПа; температура, К; удельный объем РТ, м^3/кг); $\psi(\alpha)$, $\sigma(\alpha)$ — текущие значения кинематических функций изменения объема РТ и хода поршня соответственно (α — текущее значение угла поворота коленчатого вала, град ПКВ); x — текущее значение доли выгоревшего топлива (определяется значением угла ПКВ φ, отсчитываемого от начала горения, точка α_y; продолжительностью сгорания $\varphi_z = \alpha_z - \alpha_y$, а также параметром m — показателем характера сгорания); k — отношение теплоемкости РТ (определяется с учетом доли x и численного значения α_c — коэффициента избытка воздуха); n_1 и n_2 — показатели политропы сжатия и расширения РТ соответственно; L_0 — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива; H_u — низшая теплотворная способность топлива, МДж/кг; γ — коэффициент остаточных газов; K — фактор теплоемкости (характеризует изменение качественного состава РТ).

Индексы при параметрах указывают на отношение последних к характерным (a, y, z) или текущим (при сгорании — j) точкам процессов цикла (рис. 1).

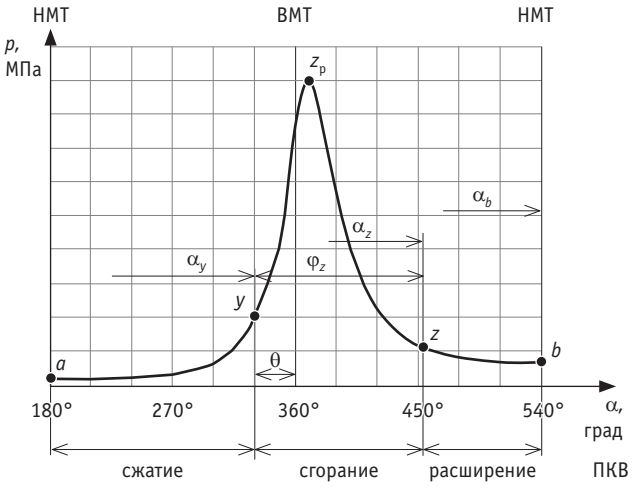


Рис. 1. **Схема индикаторной *p*-α-диаграммы и расположения характерных точек**

Системой (1)–(8) описывается изменение параметров РТ в течение каждого из процессов цикла, протекающих в цилиндре ПДВС. Включение в механизм вычислений с изменением α определенного компонента уравнений обеспечивается функциями Хевисайда [17], численные значения которых для рассматриваемой задачи определяются правилом

$$\zeta_1 = \begin{cases} 1, & 180 \le \alpha \le \alpha_y, \\ 0, & \alpha_y \le \alpha \le \alpha_z, \\ 0, & \alpha_z \le \alpha \le 540; \end{cases} \quad \zeta_2 = \begin{cases} 0, & 180 \le \alpha \le \alpha_y, \\ 1, & \alpha_y \le \alpha \le \alpha_z, \\ 0, & \alpha_z \le \alpha \le 540; \end{cases} \quad \zeta_3 = \begin{cases} 0, & 180 \le \alpha \le \alpha_y, \\ 0, & \alpha_y \le \alpha \le \alpha_z, \\ 1, & \alpha_z \le \alpha \le 540. \end{cases} \quad (9)$$

Единственность и степень достоверности решения системы (применительно к рассматриваемому режиму работы установки) определяется численными значениями начальных условий, к которым следует отнести значения параметров (прежде всего параметров состояния РТ) в момент, соответствующий $\alpha = \alpha_a = 180$ град ПКВ. Для него $p = p_a$; $T = T_a$; $v = v_a$; $\psi(\alpha) = \psi(\alpha_a)$; $\sigma(\alpha) = \sigma(\alpha_a)$.

Вместе с начальными значениями термодинамических параметров состояния РТ должны учитываться численные значения некоторых конструктивных параметров двигателя (и установки в целом). В частности, таких как ε — геометрическая степень сжатия, λ — отношение радиуса кривошипа (r) к длине шатуна ($l_ш$), особенности впускной и выпускной систем, камеры сгорания (КС), наддувочного агрегата и др. В настоящее время накоплен и в значительной мере обобщен большой объем статистического материала, который может быть использован в схемах выбора и корректировки численных значений исходных параметров с учетом названных обстоятельств. Иными словами, выбор исходных данных отчасти может быть автоматизирован [18]. Некоторые возможности такого решения реально (статистически) существуют.

Как правило, проектирование машины (транспортной, тяговой) начинается с ее тягового расчета, результаты которого служат основанием для формирования требований к параметрам энергетической установки транспортного (тягового) средства. Среди этих параметров прежде всего следует выделить значение эффективной мощности $N_{ен}$ (или среднего эффективного давления $p_{ен}$), относящееся к номинальному режиму работы, а также коэффициенты приспособляемости к нагрузке $K_м = p_{ем}/p_{ен}$ и частоте вращения $K_n = n_н/n_м$ ($n_н$ и $n_м$ — частоты вращения на номинальном режиме и режиме максимального крутящего момента двигателя соответственно). То есть тяговая характеристика машины определяет требования к энергетической установке и в первую очередь к ее параметрам в условиях работы на режимах полных нагрузок, соответствующих использованию ЭУ в диапазоне частот вращения с максимальными значениями мощности (как правило, соответствующей $N_{ен}$) и крутящего момента (M_{max}).

Названные обстоятельства всегда находят отражение в заданиях заказчика на проектирование (создание или доводку) ЭУ. И, таким образом, выбор исходных данных для выполнения расчетов энергетической установки обязательно связан с анализом задания заказчика.

Номенклатура исходных параметров (и их численные значения) для расчета КЭУ довольно значительна и может быть рассмотрена в качестве отдельной задачи, решение которой не относится к предмету излагаемого в статье материала. Тем не менее важно помнить, что многие исходные параметры, необходимые для выполнения расчетов, взаимообусловлены если не функционально, то статистически. Обратим внимание на некоторые из этих обстоятельств.

Уже отмечалось, что из задания практически известно $N_{ен}$ ($p_{ен}$). Это условие позволяет определить степень форсирования $\lambda_н$ вновь создаваемой (или совершенствуемой) ЭУ (КЭУ):

$$\lambda_н = \frac{N_{ен}}{N_e} = \frac{p_{ен}}{p_e}, \quad (10)$$

где $N_{ен}$, $p_{ен}$ — мощность и среднее эффективное давление наддувного двигателя;

N_e, p_e — мощность и среднее эффективное давление безнаддувного двигателя.

Степень форсирования статистически связана с важнейшим показателем наддувочного агрегата (компрессора) соотношением [19]

$$\lambda_н \approx \left(\frac{p_к}{p_о}\right)^{\frac{1}{n_к}}, \qquad (11)$$

где $p_к$ — давление на выходе из компрессора (давление наддува), МПа;

$p_о$ — давление на входе в компрессор, МПа;

$n_к$ — показатель политропы сжатия в компрессоре.

Таким образом, исходя из (10), (11) и полагая процесс сжатия заряда в компрессоре политропическим (считая показатель политропы сжатия в компрессоре $n_к$ известным или вычисляемым с использованием соответствующих соотношений), мы можем легко определить степень повышения давления РТ в компрессоре $\pi_к = p_к/p_о$, давление и температуру наддува $p_к$, $T_к$, а также численные значения термодинамических параметров состояния РТ в точке a индикаторной диаграммы (см. рис. 1) p_a, T_a, v_a [см. уравнения (1), (2), (8)].

Еще раз отметим, что мы не ставим задачу детально охарактеризовать методические особенности выбора исходных данных для решения системы уравнений, а обращаем внимание на взаимосвязь значительной части параметров, необходимых для решения. К одним из них относится коэффициент избытка воздуха α_c. Его численное значение не всегда может быть отражено в задании, так как величина α_c определяется многими факторами (например, режимом нагрузки, способом смесеобразования, типом камеры сгорания, характером движения воздушного заряда в КС, степенью форсирования двигателя и др.). Учесть совокупное влияние этих факторов сложно. В свою очередь, и от α_c зависят численные значения многих параметров, таких как T_a, $T_г$, $T_т$ (соответственно температура РТ в конце впуска, температура выпускных газов и газов на выходе из турбины, т.е. в выпускном коллекторе) и φ_z. В частности, для $T_т$ статистически справедливо

$$T_т = 1{,}03\ldots1{,}05\cdot(a\cdot\alpha_c^b + c), \qquad (12)$$

где a, b, c — эмпирические коэффициенты (см., например, [18, 19]).

Продолжительность сгорания (град ПКВ) [см. (3)] может быть оценена соотношением

$$\varphi_z = 1{,}25\cdot(132\alpha_c^{-1{,}36} + 20),$$

а показатель характера сгорания m, его численное значение (для дизелей), определяется взаимосвязью [20]

$$\varphi_z^m = \left[1{,}09\cdot(1+m)\right]^{5{,}12}.$$

Для оценки коэффициента эффективности сгорания ξ в (4) также может быть использовано эмпирическое соотношение [21]

$$\xi = 1 - 2{,}38\cdot\frac{\varphi_z}{n\cdot\alpha},$$

где n — частота вращения двигателя.

Так как речь идет о моделировании РЦ энергетической установки с газотурбинным наддувом при работе на установившихся режимах, то при оценке численных значений исходных параметров необходимо учитывать равенство мощностей турбины и компрессора ($N_т = N_к$). Из этого условия вытекает соотношение [22]

$$\pi_к^{\frac{k_в-1}{k_в}} = 1 + \beta\cdot\tau\cdot\left[1 - \left(\frac{1}{\pi_т}\right)^{\frac{k_г-1}{k_г}}\right], \qquad (13)$$

где $\pi_т$ — степень понижения давления в турбине;

$k_в$ — показатель адиабаты воздуха;

$k_г$ — показатель адиабаты выпускных газов;

β — параметр, определяемый теплофизическими свойствами свежего заряда и выпускных газов,

$$\beta = \frac{k_г}{k_г - 1}\cdot\frac{k_в - 1}{k_в}\cdot\frac{R_г}{R_в};$$

τ — параметр, характеризующий нагрузку на двигатель,

$$\tau = \eta_{гтн}\cdot\left(1 + \frac{1}{\alpha_c\cdot L_0^{\backslash}\cdot\varphi}\right)\cdot\frac{T_г}{T_0},$$

где $\eta_{гтн}$ — коэффициент полезного действия газотурбинного нагнетателя;

$L_0^{\backslash}$ — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива;

φ — коэффициент продувки.

Параметры, входящие в (13), поддаются предварительной численной оценке. Например, для расчета $k_в$ можно использовать уравнение (5), положив в нем $x = 0$, а $T = (T_0 + T_к)/2$. Это же уравнение (5) можно применять для вычисления $k_г$ при $x = 1$ и T, определенной по (12).

Таким образом, используя равенство мощностей $N_т$ и $N_к$, мы можем (предварительно) оценить значение $\pi_т$ и, учитывая условия выпуска отработавших газов в турбине, — давление $p_т$ на входе в нее.

Численная оценка каждого из параметров, входящих в номенклатуру исходных данных (и начальных условий), определяющих реализацию РЦ и последующее решение рассматриваемой системы уравнений, позволяет выявить характер протекания параметров состояния РТ (в частности, p, T, v) в функции α. Это дает основания (на стадии предпроектных и проектных работ) для численной оценки основных конструктивных параметров (диаметра цилиндра, хода поршня и др., если такая задача ставится) и показателей работы ЭУ применительно к условиям рассчитываемого режима. В частности, расчетом определяются индикаторные показатели (КПД и удельный расход топлива — η_i и g_i соответственно), эффективный КПД η_e и среднее

эффективное давление p_e, максимальное давление p_{max} и максимальная температура T_{max}, массовые расходы газа через турбину и компрессор ($G_т$, $G_в$) и уточняются значения $\pi_к$ и $\pi_т$.

Режим работы ЭУ с номинальной нагрузкой относится к числу основных нагрузочных режимов. К другим, особенным с точки зрения нагрузки, относится режим с максимальным значением крутящего момента, реализуемый при меньшей частоте вращения ($n_м = n_н/K_n$). Как правило, значения K_n указываются в задании. И практически в обязательном порядке в задании указывается численное значение коэффициента $K_м = M_{max}/M_н = p_{eм}/p_{eн}$. В таком случае при завершении процедуры оценки параметров КЭУ на частотах вращениях, равных $n_н$, становится известным и $p_{eм}$ (на режиме, соответствующем частоте вращения $n_м$, и при максимальной величине крутящего момента $p_{eм} = K_м \cdot p_{eн}$), что позволяет сделать предварительную оценку численного значения степени форсирования ПДВС, отнесенную к условиям его работы с частотой вращения, равной $n_м$.

Вообще говоря, может быть несколько вариантов решения этой задачи. Рассмотрим наиболее простой. Суть его заключается в том, что при отсутствии предварительного сжатия заряда на входе в цилиндр (т.е. при отсутствии наддува) получить p_e в цилиндре поршневой машины, превышающее 0,7 МПа, проблематично: мы не сможем обеспечить поданное в цилиндр количество топлива окислителем. В таком случае интересующая нас степень наддува определяется как $\lambda_н = \frac{K_м \cdot p_{eн}}{0,7}$.

Определив $\lambda_н$ и опираясь на взаимосвязь этого параметра и $\pi_к$, мы можем численно оценить давление $p_к$. Это, в свою очередь, при использовании значений K_n и условий состояния свежего заряда на выходе из компрессора (поскольку оказываются известными $p_к$, $T_к$, $n_к$, а также конструктивные параметры двигателя — диаметр цилиндра и ход поршня) позволяет сделать оценку массового наполнения цилиндра свежим зарядом.

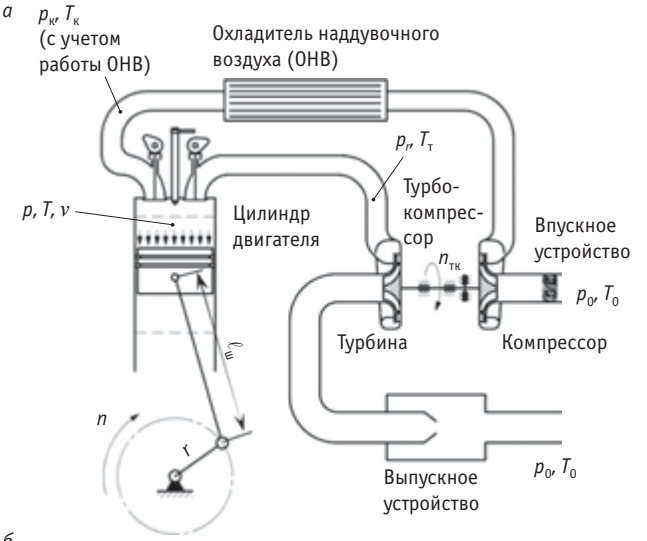
При работе ПДВС на режимах ВСХ, в том числе на режиме, соответствующем $n_м$, одной из причин повышения крутящего момента становится увеличение цикловой подачи топлива. Это дает основания для расчетного определения ее величины при $n_м$, а значит, могут быть установлены необходимое теоретически количество воздуха для сжатия поданного в КС топлива и величина α_c.

Последовательность определения численных значений других параметров, необходимых для расчета индикаторной диаграммы цикла, аналогична описанной выше. А совокупность приемов, используемых для расчетной оценки параметров и показателей РЦ КЭУ на режимах работы по ВСХ, правомерно распространить на любую из частот работы ЭУ в пределах от $n_н$ до $n_м$ безрегуляторной ветви ВСХ.

Принципиальная схема установки получения экспериментального материала для оценки правомерности использования изложенного метода расчета параметров и показателей цикла двигателя с газотурбинным наддувом (применительно к условиям работы по ВСХ) приведена на рис. 2*а*. Здесь же (рис. 2*б*) приведена блок-схема (порядок действий) численной оценки параметров и показателей полноразмерного (многоцилиндрового) двигателя (ЭУ), соответствующей его работе на режимах с полной нагрузкой.

Отметим, что параметры полноразмерной ЭУ определяются (применительно к каждому из рассматриваемых режимов по n) из условия идентичности протекания РЦ в каждом из ее цилиндров.

а



б

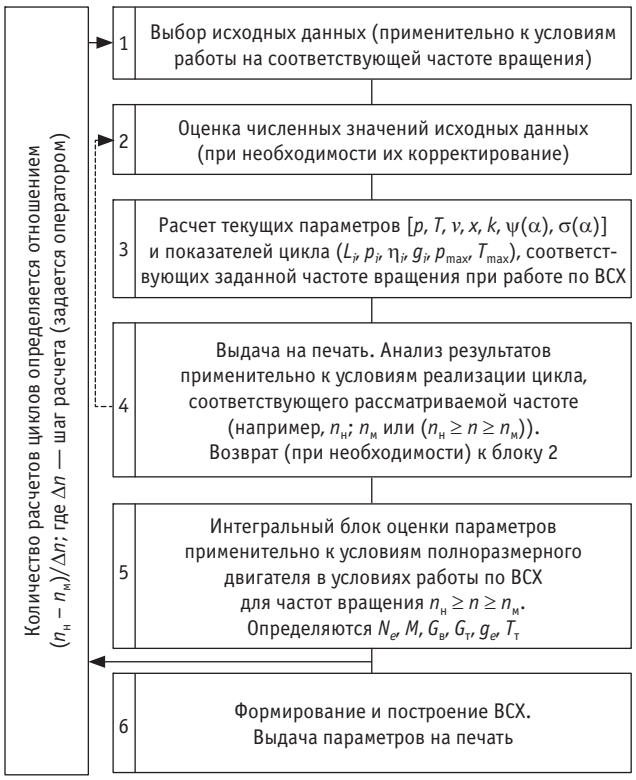


***Рис. 2.* Принципиальная схема экспериментальной установки (*а*) и последовательность определения (*б*) интегральных показателей полноразмерной ЭУ по результатам расчета циклов, относящихся к различным частотам вращения**

Результаты расчетных и экспериментальных исследований при работе ЭУ с ГТН на режимах полных нагрузок представлены на рис. 3 и 4.

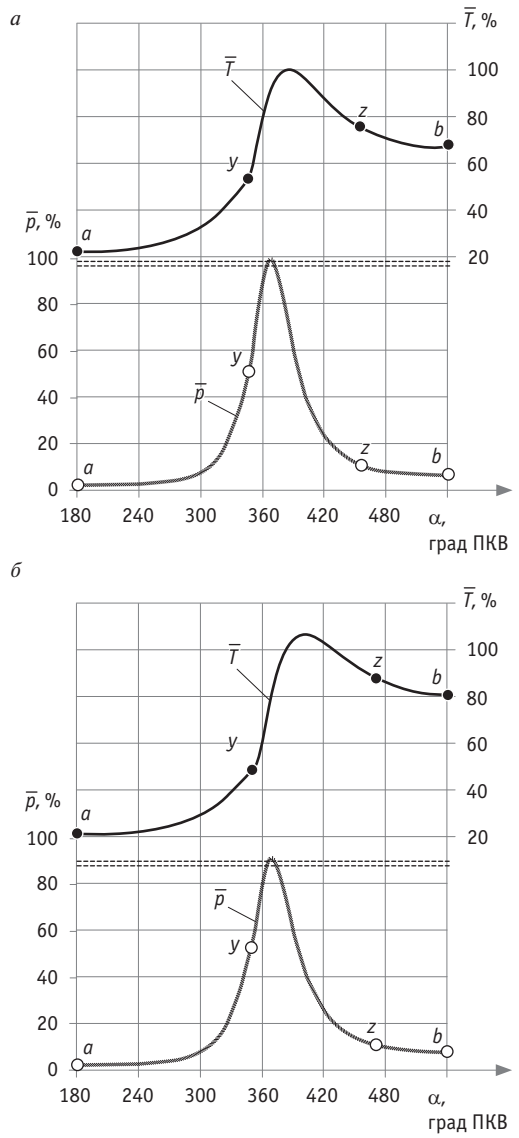


Рис. 3. **Индикаторные *p*-α- и *T*-α-диаграммы рабочего цикла наддувного ПДВС 12ЧН15/16:**
а — режим номинальной мощности (θ = 13 град ПКВ, $\alpha_c = 1{,}81$, $\pi_к = 3{,}65$); *б* — режим максимального крутящего момента (θ = 11 град ПКВ, $\alpha_c = 1{,}51$, $\pi_к = 2{,}84$). Пунктиром отмечены показания максиметра при работе ЭУ на соответствующих режимах. $\overline{p}$ и $\overline{T}$ — текущие относительные давление и температура РТ соответственно (за 100 % приняты p_{max} и T_{max}, относящиеся к номинальному режиму работы дизеля)

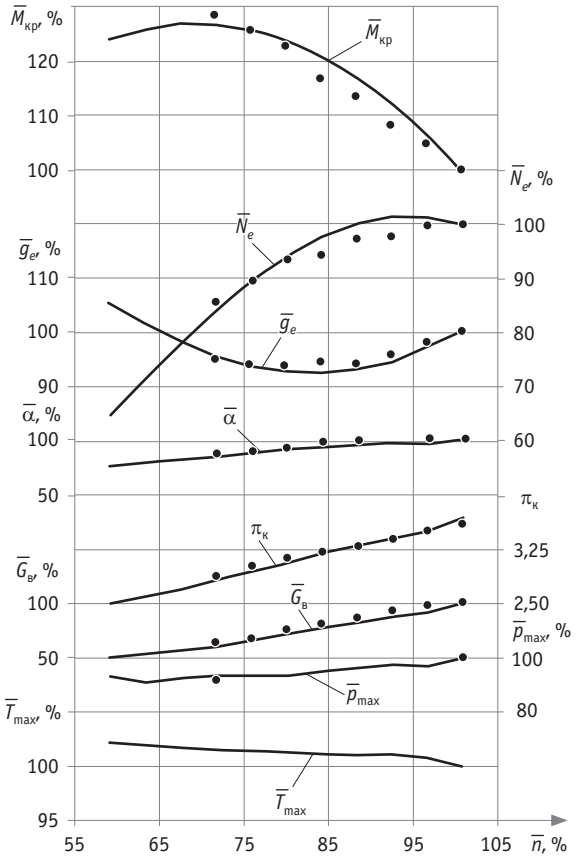


Рис. 4. **Изменение параметров комбинированной энергетической установки с ГТН при работе по внешней скоростной характеристике (безрегуляторная ветвь):**
——— — результаты численного исследования;
• — результаты экспериментального исследования.
За 100 % приняты численные значения параметров, соответствующих номинальному режиму работы

Внешняя скоростная характеристика (безрегуляторная ветвь) полноразмерного дизеля 12ЧН15/16, полученная тормозными испытаниями и расчетом на основе изложенного метода, приведена на рис. 4. Анализ характера протекания и численных значений параметров и показателей цикла при работе на различных частотах вращения позволяет отметить, что характеристики идентичны. Расхождение в численных значениях параметров $M_{кр}$ (крутящий момент), N_e, g_e, $G_в$ и др. не превышает 4,09 %.

Таким образом, на основе термодинамических уравнений, описывающих состояние рабочего тела в цилиндре комбинированной энергетической установки, уравнений выгорания топлива, соотношений, учитывающих механическое воздействие основных конструктивных элементов и механизмов ЭУ на характер протекания процессов в камере сгорания ПД, предложен метод расчета текущих параметров РТ в цилиндре и показателей цикла применительно к условиям работы ЭУ на различных частотах вращения, соответствующих режимам полных нагрузок (безрегуляторная ветвь ВСХ).

Расхождение результатов расчетных и экспериментальных исследований по таким параметрам, как крутящий момент, мощность и удельный расход топлива, не превышает 4,09 %. Это дает основания утверждать, что предлагаемый метод может быть использован на стадии предпроектных и проектных работ по созданию машин, предназначенных для применения в промышленности, транспортном машиностроении и других отраслях. В частности, он использовался в работах по модернизации и доводке КЭУ типа 12ЧН15/16 производства ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК».

Литература

1. Гриневецкий В. И. Тепловой расчет рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания. М. : Типо-лит. т-ва И. Н. Кушнерев и К°, 1907. 26 с.
2. Брилинг Н. Р. Исследование рабочего процесса и теплопередачи в двигателе Дизель. М. ; Л. : ГОНТИ, 1931. 320 с.
3. Мазинг Е. К. Тепловой процесс двигателей внутреннего сгорания. М. ; Л. : ОНТИ НКТП СССР, 1937. 82 с.
4. Иноземцев Н. В. Физико-химическое исследование и расчет рабочего процесса быстроходного дизеля // Дизелестроение. 1939. № 4, 7.
5. Иноземцев Н. В., Кошкин В. К. Процессы сгорания в двигателях. М. : Машгиз, 1949.
6. Гончар Б. М. Уточненный способ расчета и построения индикаторной диагараммы двигателя // Труды ЦНИДИ. 1954. Вып. 25. С. 3–36.
7. Вибе И. И. О законе скорости сгорания в двигателях // Сб. статей по горной электротехнике. Вып. XX. Свердловск : Углетехиздат, 1953.
8. Сгорание и смесеобразование в дизелях : тр. науч.-техн. конф. М. : Изд-во АН СССР, 1960. 241 с.
9. Портнов Д. А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. Теория, рабочий процесс и характеристики. М. : Машгиз, 1963. 639 с.
10. Лейдерман С. Р. Теоретические основы грузовых автомобилей : дис. … д-ра техн. наук. М., 1963. 250 с.
11. Дьяченко Н. Г. Теория двигателей внутреннего сгорания. Харьков : ХНАДУ, 2009. 500 с.
12. Иванов П. В. Особенности работы двигателя совместно с турбокомпрессором с регулируемой турбиной // Энергомашиностроение. 1963. № 5. С. 152–160.
13. AVL BOOST Virtual Engine Development [Сайт AVL]. URL: https://www.avl.com/boost (дата обращения: 15.08.2016).
14. Engine Analyzer Pro v3.9 is a Computer Program for Professional Engine Builders [Сайт Engine Analyzer Pro]. URL: http://performancetrends.com/Engine-Analyzer-Pro.htm (дата обращения: 15.08.2016).
15. Lotus Engineering Software (LESOFT) [Электронный ресурс]. URL: http://www.lotuscars.com/engineering/engineering-software (дата обращения: 15.08.2016).
16. Кулешов А. С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС : дис. … д-ра техн. наук. М., 2011.
17. Функция Хевисайда [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Функция_Хевисайда (дата обращения: 15.08.2016).
18. Шароглазов Б. А., Машков О. Г., Вакенгут П. Б. Автоматизированная оценка численных значений исходных параметров при моделировании процессов в поршневых двигателях // Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение. 2013. Т. 13. № 1. С. 80–85. ISSN 1990-8504.
19. Шароглазов Б. А., Шишков В. В. Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчет процессов. Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2011. 525 с.
20. Петриченко Р. М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания : учеб. пособие для вузов. Л. : Изд-во ЛГУ, 1983. 244 с.
21. Особенности организации рабочего цикла в дизеле высокой литровой мощности / Е. А. Лазарев, В. С. Мурзин, В. Е. Лазарев и др. // Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение. 2013. Т. 13. № 1. С. 36–43. ISSN 1990-8504.
22. Андреевский Н. А., Баранов С. М., Ванштейдт В. А. Дизели : справ. пособие конструктора. Л. : Машгиз, 1957. 442 с.

References

1. Grinevetsky V. I. Teplovoj raschyot rabochego processa dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Heat calculation of the internal combustion engine working process]. M. : Tipo-lit. t-va I. N. Kushnerev i K°, 1907. 26 s.
2. Briling N. R. Issledovanie rabochego processa i teploperedachi v dvigatele Dizel [Study of the Diesel engine working process and heat transfer]. M. ; L. : GONTI, 1931. 320 s.
3. Mazing E. K. Teplovoj process dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engine heat process]. M. ; L. : ONTI NKTP SSSR, 1937. 82 s.
4. Inozemtsev N. V. Fiziko-khimicheskoe issledovanie i raschyot rabochego processa bystrokhodnogo dizelya [Physical-chemical research and working process calculation of the rapid diesel] // Dizelestroenie. 1939. № 4, 7.
5. Inozemtsev N. V., Koshkin V. K. Processy sgoraniya v dvigatelyakh [Combustion processes in engines]. M. : Mashgiz, 1949.
6. Gonchar B. M. Utochnyonnyj sposob raschyota i postroeniya indikatornoj diagrammy dvigatelya [A refined method of calculating and building an engine's indicator diagram] // Trudy TsNIDI. 1954. Vyp. 25. S. 3–36.
7. Vibe I. I. O zakone skorosti sgoraniya v dvigatelyakh [On the law of combustion in engines] // Sb. statej po gornoj elektrotekhnike. Vyp. XX. Sverdlovsk : Ugletekhizdat, 1953.
8. Sgoranie i smeseobrazovanie v dizelyakh : tr. nauch.-tekhn. konf. [Combustion and mixture formation in diesel engines : proceedings of a scientific technical conference]. M. : Izd-vo AN SSSR, 1960. 241 s.
9. Portnov D. A. Bystrokhodnye turboporshnevye dvigateli s vosplamenenie-m ot szhatiya. Teoriya, rabochij process i kharakteristiki [High-speed turbine piston engines with compression ignition. Theory, working process and characteristics]. M. : Mashgiz, 1963. 639 s.
10. Leiderman S. R. Teoreticheskie osnovy gruzovykh avtomobilej : dis. … d-ra tekhn. nauk [Theoretic foundations of freight automobiles : DSc in Engineering Thesis]. M., 1963. 250 s.
11. Dyachenko N. G. Teoriya dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engine theory]. Kharkov : KhNADU, 2009. 500 s.
12. Ivanov P. V. Osobennosti raboty dvigatelya sovmestno s turbokompressorom s reguliruemoj turbinoj [Specifics of engine operation in conjunction with an adjustable turbine supercharger] // Energomashinostroenie. 1963. № 5. S. 152–160.
13. AVL BOOST Virtual Engine Development [Site AVL]. URL: https://www.avl.com/boost (date access: 15.08.2016).
14. Engine Analyzer Pro v3.9 is a Computer Program for Professional Engine Builders [Site Engine Analyzer Pro]. URL: http://performancetrends.com/Engine-Analyzer-Pro.htm (date access: 15.08.2016).
15. Lotus Engineering Software (LESOFT). [Electronic resource]. URL: http://performancetrends.com/Engine-Analyzer-Pro.htm (date access: 15.08.2016).
16. Kuleshov A. S. Razvitie metodov raschyota i optimizaciya rabochikh processov DVS : dis. … d-ra tekhn. nauk [Development of calculation methods and optimization of ICE working processes : DSc in Engineering Thesis]. M., 2011.
17. Funkciya Hevisajda [Heavyside's Function]. [Electronic resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Функция_Хевисайда (date access: 15.08.2016).
18. Sharoglazov B. A., Mashkov O. G., Vakengut P. B. Avtomatizirovannaya ocenka chislennykh znachenij iskhodnykh parametrov pri modelirovanii processov v porshnevykh dvigatelyakh [The automated assessment of values of initial parameters at numerical modeling of processes in piston engines] // Vestnik YuUrGU. Ser. Mashinostroenie. 2013. T. 13. № 1. S. 80–85. ISSN 1990-8504.
19. Sharoglazov B. A., Shishkov V. V. Porshnevye dvigateli: teoriya, modelirovanie i raschyot processov [Piston engines: theory, modeling and calculation of processes]. Chelyabinsk : Izd. centr YuUrGU, 2011. 525 s.
20. Petrichenko R. M. Fizicheskie osnovy vnutricilindrovykh processov v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya : ucheb. posobie dlya vuzov [Physical foundation of intra-cylinder processes of internal combustion engines : university textbook]. L. : Izd-vo LGU, 1983. 244 s.
21. Osobennosti organizacii rabochego cikla v dizele vysokoj litrovoj moshhnosti [The features of operating cycle for diesel engine with high specific capacity] / E. A. Lazarev, V. S. Murzin, V. E. Lazarev i dr. // Vestnik YuUrGU. Ser. Mashinostroenie. 2013. T. 13. № 1. S. 36–43. ISSN 1990-8504.
22. Andreevsky N. A., Baranov S. M., Vansteidt V. A. Dizeli : sprav. posobie konstruktora [Diesels : industrial desiner's reference guide]. L. : Mashgiz, 1957. 442 s.

УДК 621.332:3(07)

Юрий Александрович Кочунов, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КРОНШТЕЙНА

Yuriy Alexandrovich Kochunov, Senior Lecturer, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Operational testing of a polymer bracket

Аннотация

В статье приведены результаты эксплуатационных испытаний полимерного кронштейна для самонесущих изолированных проводов (КПСИП-3) трехфазной воздушной линии электропередачи напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и линии продольного электроснабжения.

В ходе опытной эксплуатации проведены технические осмотры, которые позволили оценить теоретические положения и лабораторные испытания полимерного кронштейна в реальных рабочих условиях.

Ключевые слова: полимерный кронштейн, опытная эксплуатация, технический осмотр.

Summary

The article presents the results of operation testing performed on a polymer bracket for self-bearing insulated wires (KPSIP-3) of a three-phase air power line of 6–10 kV voltage for signals and interlocking devices and longitudinal power supply line.

The operational testing included technical inspections that allowed to evaluate the theoretical prepositions and laboratory test results of the polymer bracket in real operating conditions.

Keywords: polymer bracket, operational testing, technical inspection.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-98-100

Повышение надежности воздушной линии электропередачи (ВЛЭП) устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и линии продольного электроснабжения (ПЭ), питающих нетяговые потребители напряжением 6–10 кВ, — неотъемлемая часть технологического процесса в работе системы тягового и нетягового электроснабжения. По результатам исследований [1] установлено, что около 10 % нарушений нормальной работы устройств СЦБ и ПЭ приходится на долю повреждений поддерживающих конструкций (кронштейнов и изоляторов). Так как кронштейны и изоляторы имеют свои нормы эксплуатации, методы диагностирования, срок службы, то отказ одного из этих элементов ведет к отказу поддерживающей конструкции и всей ВЛЭП. Анализ российских и зарубежных разработок показал, что одним из эффективных способов повышения надежности воздушной линии устройств СЦБ и ПЭ является применение современных полимерных материалов при изготовлении кронштейнов. В общем процесс создания и ввода в эксплуатацию полимерного кронштейна можно представить в виде алгоритма (рис. 1).

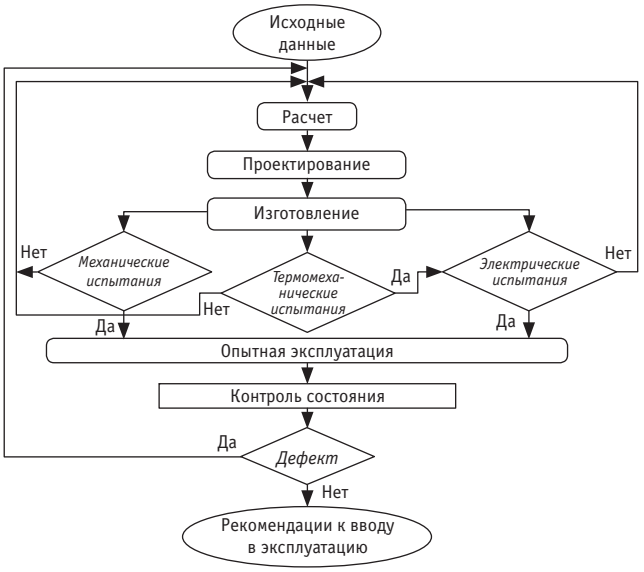


Рис. 1. **Алгоритм разработки полимерного кронштейна**

e-mail: yukochunov@mail.ru

Дата поступления: 26.10.2016

Исследования, проведенные на первых трех этапах (исходные данные, расчет, проектирование), позволили научно обосновать применение полимерного материала для изготовления кронштейна, а также рассчитать его геометрические параметры, при которых соблюдаются требования ГОСТа по надежности. Полимерный кронштейн для трехфазной воздушной линии с использованием самонесущих изолированных проводов (КПСИП-3) представлен на рис. 2.

Теоретические исследования позволили оценить работоспособность полимерного кронштейна в различных механических и электрических режимах. Полученные результаты были верифицированы путем сравнения с экспериментальными данными.

1. Механические испытания показали, что при приложении статической нагрузки 2,0 кН прогиб траверсы составляет 12 мм, это соответствует требованиям по прогибу и не превышает соотношения 1/150.

2. Натурные испытания электрической прочности КПСИП-3 позволили определить зависимость $U_{\text{вр}} = f(\chi)$, которая характеризует изменение величины разрядного напряжения при изменении степени загрязнения и сравнение полученных данных с нормативными значениями по уровню напряжения. Результаты исследований подтвердили, что без защитной оболочки кронштейн КПСИП-3 может эксплуатироваться в 1-й и 2-й зонах степени загрязнения, а в защитной оболочке Виксинт ПК-68 — в 1–4-й зонах [2].

3. В ходе термомеханических испытаний эмпирическим путем определены перемещения нагруженной траверсы при изменении температурных режимов (от –58 °С до +50 °С), наибольшее значение которых составляет $\Delta h = 0{,}017$ мм, что не влияет на соотношение 1/150 к длине элемента. Кроме того, при последующих электрических испытаниях определена величина импульсного напряжения, которая составила $U = 180$ кВ [3].

Таким образом, по результатам проведенных исследований полимерный кронштейн КПСИП-3 в защитной оболочке Виксинт ПК-68 был рекомендован к опытной эксплуатации. Эксплуатационные испытания — обязательное звено внедрения нового оборудования для дальнейшего серийного выпуска и ввода в полноценный рабочий цикл.

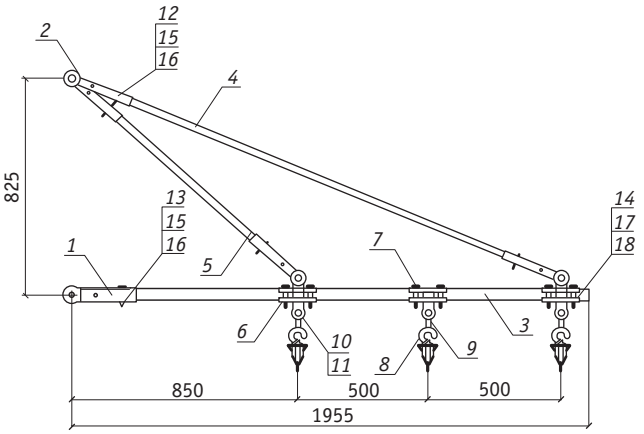


***Рис. 2*. Полимерный кронштейн КПСИП-3:**
1 — оконцеватель траверсы; *2* — оконцеватель тяги; *3* — траверса; *4* — тяга первая; *5* — тяга вторая; *6* — плашка нижняя (ЛЭ3.42.1678-Ш); *7* — плашка (ЛЭ3.42.2348); *8* — седло одинарное под пестик (КС 009); *9* — серьга (КС 075); *10* — валик 22Ч55 (КС 084); *11* — шплинт 5Ч40; *12* — болт М6Ч50; *13* — болт М6Ч70; *14* — болт М12Ч75; *15* — гайка М6; *16* — шайба 6; *17* — гайка М12; *18* — шайба 12

Опытный образец кронштейна смонтирован 22 июня 2015 г. на опоре № 80 станции Шувакиш участка Свердловской дистанции электроснабжения на действующей ВЛЭП напряжением 6 кВ с самонесущими изолированными проводами СИП-3Ч50. Технология монтажа полимерного кронштейна показана на рис. 3.

Так как по сравнению с существующими металлическими аналогами полимерный кронштейн имеет меньшую массу, его подъем осуществляется одним монтером, а монтаж в рабочее положение с укладкой проводов занимает не более 10 мин. Это позволяет значительно экономить на капитальных расходах, а отсутствие изоляторов сокращает эксплуатационные затраты [4].

За период эксплуатационных испытаний с 22 июня 2015 г. по 22 июня 2016 г. проведены четыре осмотра технического состояния кронштейна (27.07.2015, 30.11.2015, 21.03.2016 и 22.06.2016), в ходе которых КПСИП-3 проверяли на стойкость к климатическим условиям, воздействию вибрации, степени загрязнения.

а *б* *в*

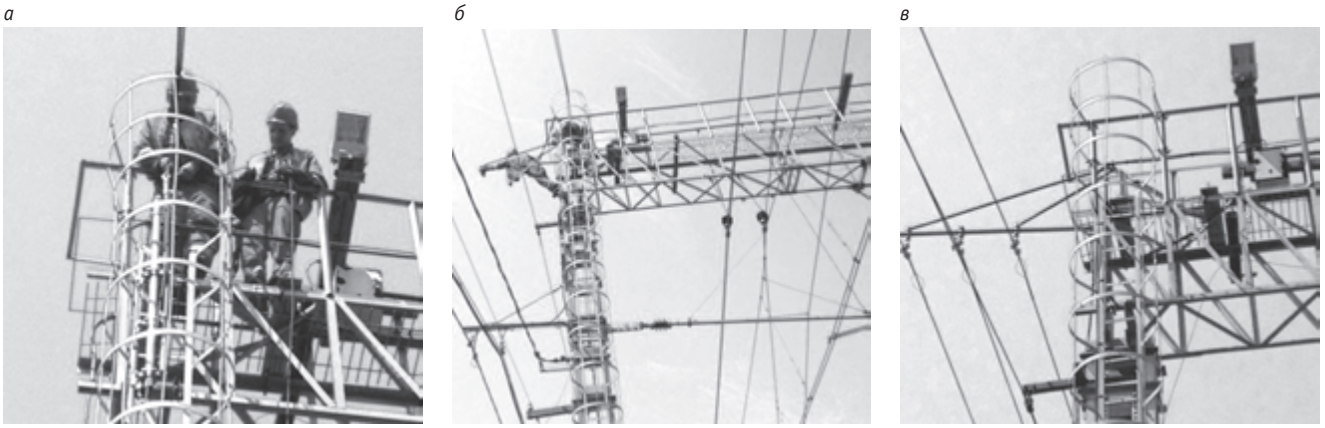


***Рис. 3*. Фрагменты монтажа кронштейна КПСИП-3:**
а — подъем кронштейна; *б* — монтаж проводов на кронштейн; *в* — кронштейн в рабочем положении

При фиксации годовых изменений погоды на станции Шувакиш зафиксированы осадки в виде дождей — 90 случаев (из них 6 с грозами) и снега — 96 случаев (данные Gismeteo). Минимальная температура составила –23 °С, максимальная +33 °С, максимальная скорость ветра 8 м/с. Таким образом, кронштейн КПСИП-3 выдержал летние дождевые и грозовые, а также зимние снежные и гололедные эксплуатационные испытания.

Полимерный кронштейн установлен на действующей ВЛЭП, расположенной с полевой стороны опоры контактной сети, причем Шувакиш является транзитной и грузовой станцией нижнетагильского направления с ежесуточным размером движения не менее 30 грузовых и 10 пассажирских пар поездов. Осмотры показали, что вибрация от прохождения поездов не повлияла на работоспособность КПСИП-3.

Станция Шувакиш расположена в северо-западной части Екатеринбурга и находится на значительном удалении от крупных промышленных объектов, поэтому степень загрязнения атмосферы не превышает уровня 2-й зоны, что соответствует расчетным значениям и не вызвало поверхностного перекрытия изоляционной части КПСИП-3 в процессе опытной эксплуатации.

В целом проведенные осмотры не выявили дефектов технического состояния и нарушений в работе кронштейна.

Таким образом, на основании результатов эксплуатационных испытаний полимерный кронштейн КПСИП-3 может быть рекомендован к серийному выпуску и внедрению в производство.

Литература

1. Кочунов Ю. А., Ягодин А. А., Никифоров Р. А. Анализ работы поддерживающих конструкций ВЛ 6–10 кВ // Вестник УрГУПС. 2016. № 1 (29). С. 123–131. DOI: 10.20291/2079-0392-2016-1-123-131. ISSN 2079-0392.
2. Сухогузов А. П., Иванов Н. Л., Кочунов Ю. А. Электрические испытания полимерного кронштейна // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 119–123. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-119-123. ISSN 1815-9400.
3. Сухогузов А. П., Иванов Н. Л., Кочунов Ю. А. Термомеханические испытания полимерного кронштейна // Транспорт Урала. 2016. № 1 (48). С. 93–96. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-93-96. ISSN 1815-9400.
4. Аржанников Б. А., Афанасьева Н. А., Кочунов Ю. А. Технико-экономическое обоснование применения кронштейна ВЛ СЦБ и ПЭ, выполненного из композитного материала // Транспорт Урала. 2015. № 2 (45). С. 92–95. ISSN 1815-9400.

References

1. Kochunov Yu. A., Yagodin A. A., Nikiforov R. A. Analiz raboty podderzhivayushhikh konstrukcij VL 6–10 kV [Analysis of performance of supporting structures of 6–10 kV overhead lines] // Vestnik UrGUPS. 2016. № 1 (29). S. 123–131. DOI: 10.20291/2079-0392-2016-1-123-131. ISSN 2079-0392.
2. Sukhoguzov A. P., Ivanov N. L., Kochunov Yu. A. Elektricheskie ispytaniya polimernogo kronshtejna [Electrical testing of a polymer bracket] // Transport Urala. 2016. № 2 (49). S. 119–123. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-119-123. ISSN 1815-9400.
3. Sukhoguzov A. P., Ivanov N. L., Kochunov Yu. A. Termomekhanicheskie ispytaniya polimernogo kronshtejna [Thermomechanical testing of a polymer bracket] // Transport Urala. 2016. № 1 (48). S. 93–96. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-93-96. ISSN 1815-9400.
4. Arzhannikov B. A., Afanasieva N. A., Kochunov Yu. A. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie primeneniya kronshtejna VL STsB i PE, vypolnennogo iz kompozitnogo materiala [Feasibility study of the use of composite arm of signaling and interlocking overhead line and longitudinal power supply line] // Transport Urala. 2015. № 2 (45). S. 92–95. ISSN 1815-9400.

УДК 621.43.001.5

Александр Владимирович Гриценко, доктор технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск, Россия,
Станислав Семенович Куков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск, Россия,
Олег Николаевич Ларин, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Российского института стратегических исследований (РИСИ), Москва, Россия,
Константин Вячеславович Глемба, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), ЮУрГУ (НИУ), доцент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск, Россия

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ МЕТОДОМ ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ НА СТЕНДЕ С ИМИТАЦИЕЙ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Alexander Vladimirovich Gritsenko, DSc in Engineering, Associate Professor, Operation of Machine and Tractor Park Department, South Ural State Agrarian University (SUSAU), Chelyabinsk, Russia,
Stanislav Semyonovich Kukov, PhD in Engineering, Associate Professor, Operation of Machine and Tractor Park Department, South Ural State Agrarian University (SUSAU), Chelyabinsk, Russia,
Oleg Nikolayevich Larin, DSc in Engineering, Professor, Lead Researcher, Russian Institute for Strategic Studies (RISS), Moscow, Russia,
Konstantin Vyacheslavovich Glemba, PhD in Engineering, Associate Professor, Motor Transport Department, South Ural State University (National Research University), SUSU (NRU), Associate Professor, Operation of Machine and Tractor Park Department, South Ural State Agrarian University (SUSAU), Chelyabinsk, Russia

Daignosting automobile generators by oscillography on a testbed with imitation of failures

Аннотация

Одна из главных проблем, возникающих при эксплуатации автомобилей, — отказы элементов электрооборудования. Динамика растущих неисправностей электрооборудования требует совершенствования методов и средств диагностирования.

В статье представлен метод диагностирования генераторов автомобилей по осциллограммам напряжения, основанный на замене аккумуляторной батареи активной нагрузкой, и даны рекомендации по выявлению и устранению неисправностей генераторов. При проведении экспериментальных исследований в качестве осциллографического средства использовался мотор-тестер МТ-10КМ, в качестве базы для формирования различных неисправностей генераторной установки автомобиля — стенд-тренажер «Система зажигания и энергоснабжения» СЗЭ-01. Все неисправности заранее вводились в испытуемый генератор и включались при помощи блока ввода неисправностей с рабочей панели стенда.

Анализ осциллограмм напряжения, полученных по результатам экспериментальных исследований, показал, что использование метода осциллографирования совместно с подключением активной нагрузки позволяет значительно повысить чувствительность и информативность диагностического сигнала.

Ключевые слова: диагностирование, электрооборудование, автомобильный генератор, осциллограмма напряжения, метод, параметры, имитация.

Summary

One of the principal issues in automobile operation is the failures of electric equipment components. The dynamics of growing electric components failures demands improvements in the methods and means of diagnostics.

The article presents a method for diagnostics of automotive generators using voltage oscillograms based on replacement of the accumulator battery with an active load, and presents recommendations on detecting and repairing generator failures. During experimental testing, a motor tester MT-10KM was used as the oscilographic device, and the base for reproducing various failures of the vehicle's generator system was based on the «Ignition system and energy supply» training testbed. All the failures were pre-programmed into the generator and activated by a failure input block form the testbed control panel.

The analysis of voltage oscillograms obtained from the results of experimental research showed that using the oscillography method together with connecting an active load allows to make the electric signal significantly more sensitive and informative.

Keywords: diagnostics, electric equipment, vehicle generator, voltage oscillogram, method, parameters, imitation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-101-107

e-mail: alexgrits13@mail.ru, kukov24@mail.ru, larin_on@mail.ru, glemba77@mail.ru
Дата поступления: 10.10.2016

Главной проблемой отечественных автомобилей и иномарок является высокий уровень отказов элементов электрооборудования [1–4]. Система электрооборудования стабильно удерживает лидирующую позицию по количеству отказов, и именно она определяет основные параметры качества и надежности автомобиля [5–9]. При этом особое внимание следует уделять генераторным установкам (ГУ) современных автомобилей в комплексе с аккумуляторными батареями (АКБ). Отказ одного или другого узла приводит к серьезным последствиям, как правило, к невозможности нормальной эксплуатации техники [7, 8, 10–13].

Теоретические исследования. К числу наиболее распространенных неисправностей ГУ относятся: повреждение диодного моста или отдельных диодов выпрямительного блока; пробой или полный отказ регулятора напряжения; изнашивание щеток, токосъемных колец или коллектора; обрывы и замыкания проводов зарядной цепи; повреждение, износ приводного шкива или ремня; межвитковые замыкания обмоток статора и обмотки возбуждения ротора; выход из строя подшипников [1, 4, 10]. Так как автомобильный генератор представляет собой электромеханическое устройство, всевозможные его неисправности разделяют на две категории — механические и электрические [3].

Заводские испытания АКБ и диагностирование ГУ проводятся в соответствии с рекомендациями [4–6, 14–16]. Эти методики достаточно известны и используются повсеместно [10, 13–16]. Сделаем краткий анализ основных средств диагностирования.

Цифровой или стрелочный мультиметр — комбинированный прибор, который чаще всего объединяет в себе несколько функций: вольтметра, амперметра и омметра [4, 6, 10]. Он активно используется в практике диагностирования АКБ и ГУ, но имеет ряд недостатков: невозможность анализа быстропеременных процессов, низкая точность и информативность.

В последнее время широкое применение нашли осциллографы и мотор-тестеры [4, 6, 10–16].

Цифровой осциллограф USB Autoscope III (осциллограф Постоловского) используется при просмотре, сохранении и анализе цифровых и аналоговых сигналов с электрических цепей для поиска неисправностей в электронных системах автомобиля и диагностики механики бензиновых двигателей [14]. Обладает существенными достоинствами, такими как возможность снятия, записи и анализа знакопеременных быстроизменяющихся процессов, высокая точность, информативность и приспособленность к диагностированию электрооборудования.

Диагностический комплекс мотор-тестер МТ-10КМ [15, 16] предназначен для проверки технического состояния и поиска неисправностей в автомобильных бензиновых (и в ограниченном объеме дизельных) двигателях внутреннего сгорания (рис. 1). Он имеет те же преимущества, что и цифровой осциллограф USB Autoscope III. В наших экспериментальных исследованиях при помощи мотор-тестера МТ-10КМ осуществлялось снятие осциллограмм напряжения, их запись, последующая обработка и анализ. При проведении измерений использовались универсальные аналоговые входы с высоким входным сопротивлением «Вход 1 — вход 5 ($IN1$–$IN5$)», которые предназначены для подключения к низковольтным цепям ЭСУД — датчикам, исполнительным механизмам, первичным цепям системы зажигания (см. рис. 1) [15, 16]. Для подключения применяются кабели-пробники АМ4-С11-Ж, АМ4-С21-Г, АМ4-С31-3, АМ4-С41-К и АМ4-С51-Ф (желтого, голубого, зеленого, красного и фиолетового цвета — соответствуют цветам лучей в режиме осциллографа/самописца).



Рис. 1. **Мотор-тестер МТ-10КМ: вид сверху и спереди (со стороны разъемов)**

Также при испытаниях генераторных установок используют специальные стенды, например СКИФ 1–01, который предназначен для диагностирования технического состояния электрооборудования автотранспортных средств. Стенд позволяет выполнять проверку: технических характеристик генераторов постоянного и переменного (с выпрямителем) тока с номинальным напряжением 12 и 24 В и мощностью до 3 кВт в режиме холостого хода и под нагрузкой до 1,2 кВт; параметров реле-регуляторов к генераторам; параметров стартеров с номинальным напряжением 12 и 24 В мощностью до 9 кВт в режиме холостого хода; работоспособности коммутационных реле и реле-регуляторов; параметров электродвигателей вспомогательных механизмов автомобиля; исправности полупроводниковых приборов; сопротивлений. Однако недостатком стенда СКИФ 1–01 является неприспособленность к проведению экспериментов (отсутствие последовательного ввода различных неисправностей).

При выполнении научных исследований нами использовался стенд-тренажер собственного изготовления «Система зажигания и энергоснабжения» СЗЭ-01 [10]. Рассмотрим подробнее его устройство и принцип работы.

Стенд представляет собой головной модуль, на котором расположены блок-схемы, а также элементы системы зажигания и энергоснабжения различных автомобилей [4, 10, 17–20] (рис. 2).

Для контроля частоты вращения приводного вала генератора на передней панели стенда установлен тахометр, который позволяет преобразовать электрические импульсы первичной обмотки катушки зажигания в частоту вращения вала стенда. Для плавного изменения частоты вращения приводного вала стенд оснащен тиристорным регулятором напряжения питания электродвигателя привода, ручка управления которым выведена на переднюю панель. Замок зажигания подключает к источнику питания постоянного тока клеммы на передней панели

с обозначением «+12 В». Для их подключения ключ зажигания необходимо повернуть по направлению вращения часовой стрелки в положение I. При повороте ключа зажигания в положение II включается привод прерывателя-распределителя и генератора. Для контроля режима работы генератора на передней панели стенда закреплены вольтметр, измеряющий напряжение на выходе генератора, и амперметр, контролирующий ток нагрузки генератора. Величина нагрузки изменяется ручкой управления нагрузочным реостатом, которая располагается под столешницей стенда.

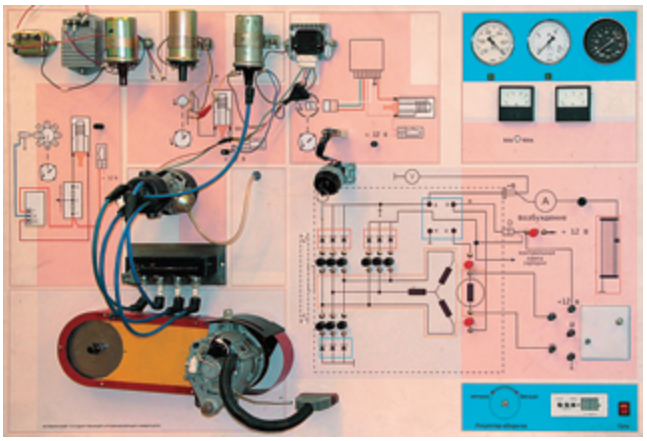


Рис. 2. **Стенд-тренажер «Система зажигания и энергоснабжения» С3Э-01**

На передней панели стенда изображена принципиальная схема ГУ переменного тока [10]. На схему выведены контрольные точки всех элементов ГУ, позволяющие без разборки генератора контролировать их техническое состояние. При использовании некоторых методов технического контроля элементы генератора необходимо отсоединять от общей схемы. Для этого предусмотрены выключатели, которые соединяют элементы схемы при закручивании винта выключателя и разъединяют — при выкручивании. Выключатель «Сеть» включает питание блока питания напряжением 12 В, подключает цепи управления приводом стенда, включает питание блока ввода неисправностей. Для оперативного ввода типичных неисправностей в системы зажигания и энергоснабжения стенд снабжен соответствующим электронным блоком, панель управления которым располагается на лицевой панели.

При моделировании пробоев и замыканий в элементах генератора ток по контактам исполнительных реле лимитируется последовательным включением в цепи ограничивающих сопротивлений, которые защищают контакты реле от перегрузок. В связи с этим не рекомендуется создавать ток нагрузки генератора более 40 А [4, 10]. Перспективным методом является диагностирование ГУ по осциллограммам напряжения [10]. Вместе с тем он характеризуется низкой чувствительностью к техническому состоянию элементов генератора при работе совместно с АКБ. Повысить чувствительность и информативность диагностического сигнала позволяет замена АКБ активной нагрузкой [4, 10], что и проверялось в ходе наших экспериментальных исследований, результаты которых рассмотрены ниже.

Экспериментальные исследования. Во время экспериментов осциллограммы снимались мотор-тестером МТ-10КМ, затем подвергались обработке штатной программой мотор-тестера. В исследованиях использовался генератор марки 37.3701 номинальной мощностью $P_{ном} = 770$ Вт (при его работе без АКБ нагрузка создавалась реостатом и составляла $P_{факт} = 0{,}2\ P_{ном}$), частота вращения приводного вала генератора составляла n = 3000 мин$^{-1}$. При проведении испытаний нагрузка задавалась при помощи реостата на уровне $I = 10$ А. На всех осциллограммах введены следующие обозначения: Вх 1 — сигнал напряжения с основного силового вывода генератора «+»; Вх 4 — сигнал напряжения с вывода питания обмотки возбуждения «+Б» реле-регулятора. Эталонная осциллограмма исправно работающего генератора представлена на рис. 3.

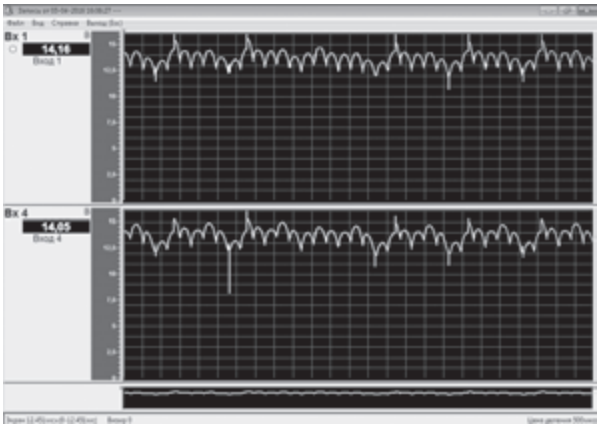


Рис. 3. **Осциллограмма напряжения *U* (В) исправного генератора во времени *t* (с)**

Далее при помощи блока ввода неисправностей последовательно вводились различные отказы и снимались осциллограммы генератора. Первой рассмотрим осциллограмму напряжения генератора при обрыве диода питания обмотки возбуждения (рис. 4).

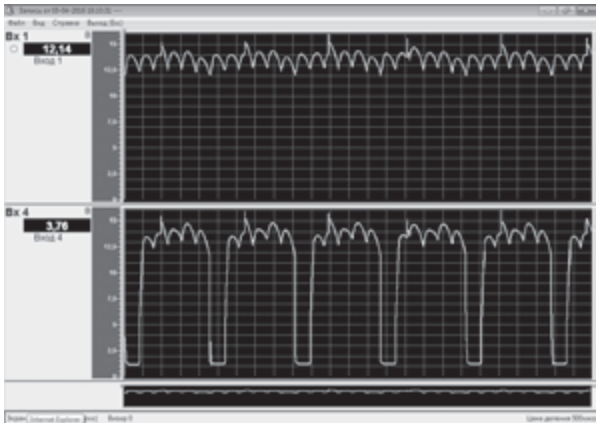


Рис. 4. **Осциллограмма напряжения генератора при обрыве диода питания обмотки возбуждения**

Как видно из рис. 4, осциллограмма с канала Вх 1 не поменялась по сравнению с эталонной. В то время как обрыв диода питания обмотки возбуждения проявился на Вх 4. То есть контроль осциллограммы напряжения необходимо проводить параллельно и на выводе питания обмотки возбуждения.

Следующая введенная неисправность — обрыв цепи диода положительной полярности выпрямительного блока (рис. 5). По осциллограмме видно, что эта неисправность проявляется одновременно и на Вх 1, и на Вх 4.

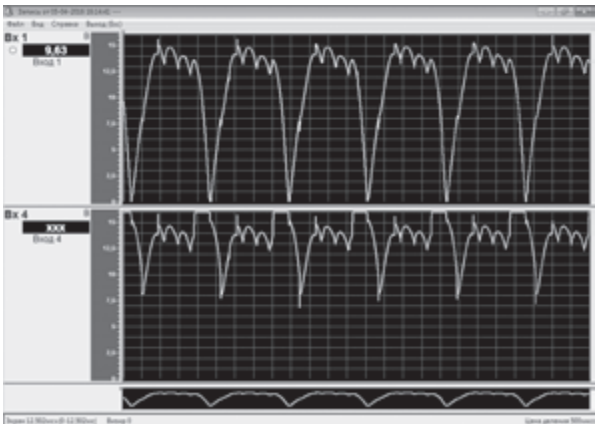


***Рис. 5*. Осциллограмма напряжения генератора при обрыве цепи диода положительной полярности выпрямительного блока**

На рис. 6 представлена осциллограмма при пробое диода выпрямительного блока питания обмотки возбуждения, данная неисправность оказывает влияние и на Вх 1, и на Вх 4. Форма осциллограммы значительно отличается от эталонной, причем среднее напряжение на Вх 1 составляет 8,18 В, а на Вх 4 — 6,65 В. Такие значения далеки от номинальных для исправной ГУ, что отразится в отсутствии должной зарядки АКБ и снижении яркости ламп фар головного освещения.

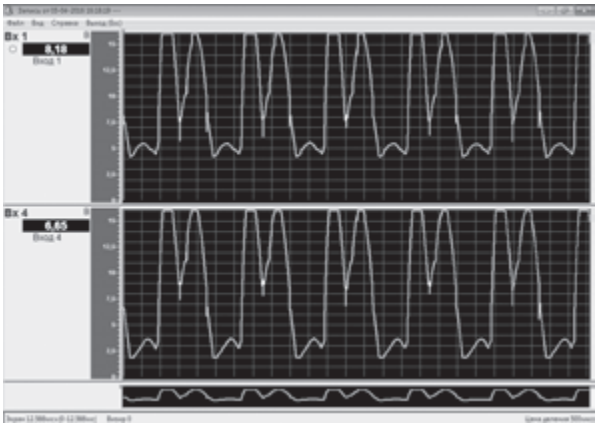


***Рис. 6*. Осциллограмма напряжения генератора при пробое диода выпрямительного блока питания обмотки возбуждения**

Осциллограмма, снятая при замыкании на массу фазы статорной обмотки (рис. 7), показывает, что средний уровень напряжения значительно снизился, составив 9,38 В для Вх 1 и 9,79 В для Вх 4. Естественно, эта неисправность одновременно влияет на оба сигнала и в практике эксплуатации приводит к хроническому недозаряду АКБ, ее последующей глубокой сульфатации и отбраковке.

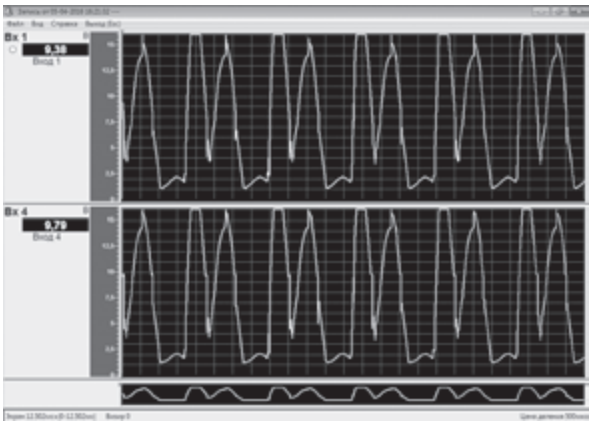


***Рис. 7*. Осциллограмма напряжения генератора при замыкании на массу фазы статорной обмотки**

Осциллограмма напряжения генератора при пробое диода положительной полярности выпрямительного блока (рис. 8) выглядит так же, как осциллограмма предыдущей неисправности (см. рис. 7).

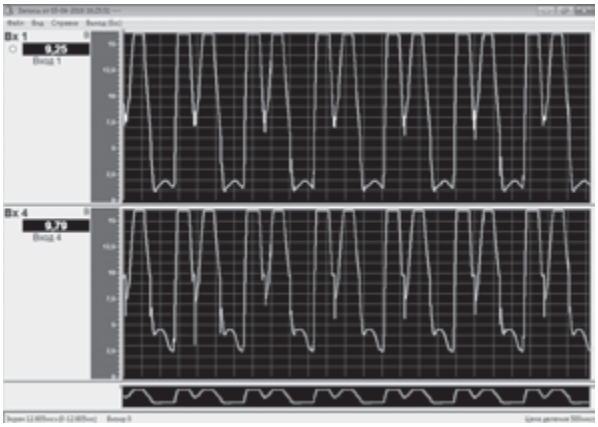


***Рис. 8*. Осциллограмма напряжения генератора при пробое диода положительной полярности выпрямительного блока**

Осциллограмма напряжения при обрыве цепи диода отрицательной полярности выпрямительного блока представлена на рис. 9. Данная неисправность одновременно влияет на выходные сигналы Вх 1 и Вх 4. При этом наблюдается существенное падение уровня среднего напряжения: на Вх 1 — до 9,44 В, на Вх 4 — до 9,91 В. Опять же такого напряжения недостаточно для нормальной подзарядки АКБ, что заметно скажется на снижении мощностных параметров ГУ.

На рис. 10 представлена осциллограмма напряжения при высоком сопротивлении в фазе статорной обмотки. Высокое сопротивление в фазе статорной обмотки выглядит ана-

логично обрыву фазы. Как правило, данная фаза фактически отсутствует, что и видно на осциллограмме. При этом среднее напряжение держится на уровне 8,87 и 9,66 В соответственно с выводов Вх 1 и Вх 4. Как следствие, такая неисправность приводит к недозарядке АКБ, ее сульфатации и выходу из строя.

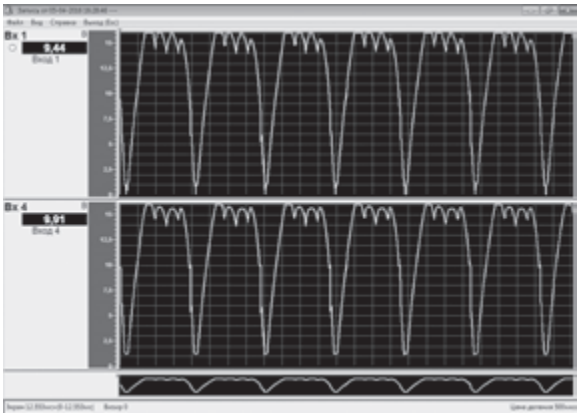


***Рис. 9*. Осциллограмма напряжения генератора при обрыве цепи диода отрицательной полярности выпрямительного блока**

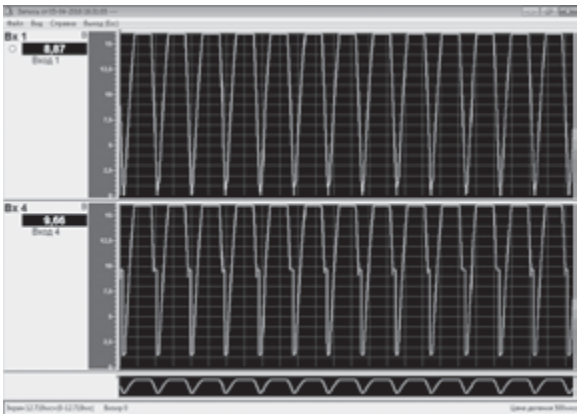


***Рис. 10*. Осциллограмма напряжения при высоком сопротивлении в фазе статорной обмотки**

Осциллограмма при пробое диода отрицательной полярности выпрямительного блока представлена на рис. 11. Характер изменения осциллограммы и последствия этой неисправности для всей системы электрооборудования аналогичны ранее рассмотренным (см. рис. 6–8).

Из осциллограммы напряжения при высоком сопротивлении в обмотке возбуждения (рис. 12) видно, что сигнал напряжения на выводе Вх 1 фактически равен 0, а на Вх 4 составляет 10,98 В. То есть напряжение подводится к началу обмотки возбуждения, а дальше не проходит. Следствием такой неисправности становится полная неработоспособность ГУ на всех возможных режимах и различных нагрузках.

Осциллограмма напряжения генератора при пробое реле-регулятора показана на рис. 13. Из нее видно, что следствием пробоя реле-регулятора является нерегулируемый рост напряжения как на Вх 1, так и на Вх 4. Для электрооборудования автомобиля это чревато повышенной яркостью ламп головного освещения и их быстрым отказом. Также возможны перебои в работе микропроцессорной системы управления, сигнализации и т.д.

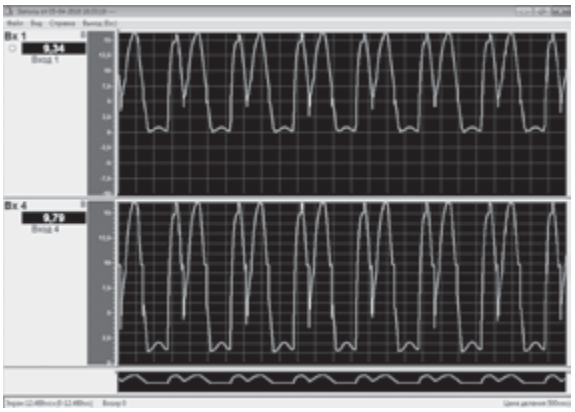


***Рис. 11*. Осциллограмма напряжения генератора при пробое диода отрицательной полярности выпрямительного блока**

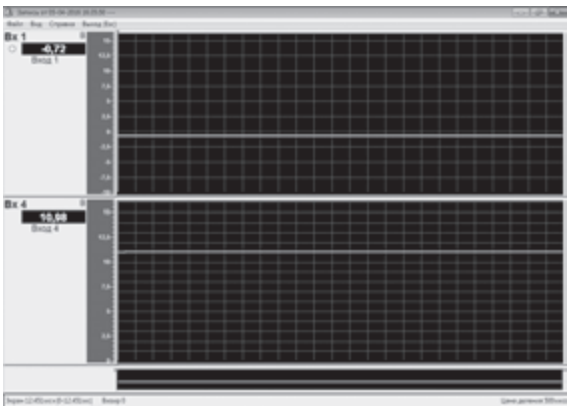


***Рис. 12*. Осциллограмма напряжения генератора при высоком сопротивлении в обмотке возбуждения**

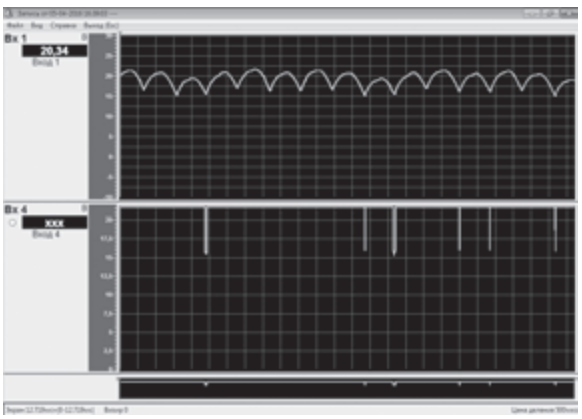


***Рис. 13*. Осциллограмма напряжения генератора при пробое реле-регулятора**

Обрыв 1-го диода положительной и 1-го диода отрицательной полярности, как показывает осциллограмма на рис. 14, существенно влияет на напряжение. Так, на выводе Вх 1 среднее напряжение становится равным 9,5 В, а на выводе Вх 4 настолько меняется, что осциллограф не фиксирует его измеренного значения. В любом случае этот отказ приводит к серьезным последствиям для всей системы электрооборудования автомобиля и АКБ в частности.

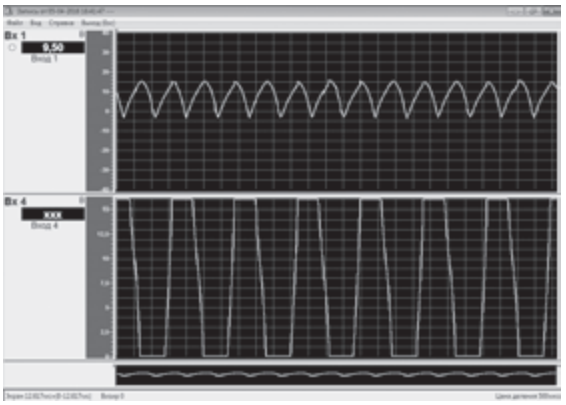


Рис. 14. **Осциллограмма напряжения генератора при обрыве 1-го диода положительной и 1-го диода отрицательной полярности**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокий уровень неисправностей элементов зажигания и электрооборудования автомобилей требует совершенствования методов и средств диагностирования этих систем. Предложенный авторами статьи метод диагностирования генераторов автомобилей по осциллограммам напряжения основан на замене аккумуляторной батареи активной нагрузкой. Проведенный анализ средств диагностирования и наиболее распространенных отказов устройств электрооборудования позволил выбрать в качестве осциллографического средства мотор-тестер МТ-10КМ, а также стенд-тренажер СЭЭ-01 с возможностью дистанционного ввода различных неисправностей генераторной установки. Результаты экспериментальных исследований показали, что при осциллографировании выходного напряжения генератора без АКБ чувствительность осциллограмм к неисправностям ГУ значительно повышается. Поэтому при диагностировании генераторной установки осциллографическим методом рекомендуется отключать генератор от бортовой сети автомобиля и подключать вместо АКБ активную нагрузку в 10–15 А.

Литература

1. Яковлев В. Ф. Диагностика электронных систем автомобиля : учеб. пособие. М. : СОЛОН-Пресс, 2003. 272 с.
2. Инжекторные системы автомобилей ВАЗ, ГАЗ и УАЗ и диагностика их приборами НПП «НТС». Самара : НПП «НТС», 2004. 245 с.
3. Автомобильный справочник / Пер. с англ. М. : ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. 992 с.
4. Методы и средства тестового диагностирования системы питания двигателей внутреннего сгорания автомобилей / Р. Ю. Соловьев, А. В. Гриценко, С. А. Соловьев и др. : моногр. М. : ФГБНУ ГОСНИТИ, 2016. 262 с.
5. Набоких В. А. Испытание электрооборудования автомобилей и тракторов : учеб. для студентов высш. учеб. заведений. М. : Изд. центр «Академия», 2003. 256 с.
6. Диагностическое оборудование [Сайт ООО «НТС»]. URL: http://www.nppnts.ru (дата обращения: 20.05.2016).
7. Гриценко А. В. Разработка методов тестового диагностирования работоспособности систем питания и смазки двигателей внутреннего сгорания : дис. … д-ра техн. наук. Челябинск, 2014. 397 с.
8. Гриценко А. В. Разработка методов тестового диагностирования работоспособности систем питания и смазки двигателей внутреннего сгорания : автореф. дис. … д-ра техн. наук. Челябинск, 2014. 40 с.
9. Заятров А. В. Комплексная оценка качества и надежности электрооборудования легкового автомобиля : автореф. дис. … канд. техн. наук. Самара, 2013. 19 с.
10. Гриценко А. В., Куков С. С. Диагностирование автомобильных генераторов по осциллограммам напряжения // Механизация

References

1. Yakovlev V. F. Diagnostika elektronnykh sistem avtomobilya : ucheb. posobie [Automobile electronic systems diagnostics : textbook]. M. : SOLON-Press, 2003. 272 s.
2. Inzhektornye sistemy avtomobilej VAZ, GAZ i UAZ i diagnostika ikh priborami NPP «NTS» [Injector systems of VAZ, GAZ and UAZ vehicles and their diagnostics using NPP «NTS» devices]. Samara : NPP «NTS», 2004. 245 s.
3. Avtomobilnyj spravochnik / Per. s angl. [Auto reference book / Translated from English]. M. : ZAO KZhI «Za rulem», 2004. 992 s.
4. Metody i sredstva testovogo diagnostirovaniya sistemy pitaniya dvigatelej vnutrennego sgoraniya avtomobilej : monogr. [Methods and means of test dignostics for the power supply system of automobile internal combustion engines : a monograph] / R. Yu. Soloviev, A. V. Gritsenko, S. A. Soloviev i dr. M. : FGBNU GOSNITI, 2016. 262 s.
5. Nabokih V. A. Ispytanie elektrooborudovaniya avtomobilej i traktorov : ucheb. dlya studentov vyshh. ucheb. zavedenij [Testing automobile and tractor electric equipment : a university textbook]. M. : Izd. centr «Akademiya», 2003. 256 s.
6. Diagnosticheskoe oborudovanie [Diagnostic equipment]. [Site «NTS» LLC]. URL: http://www.nppnts.ru (date access: 20.05.2016).
7. Gritsenko A. V. Razrabotka metodov testovogo diagnostirovaniya rabotosposobnosti sistem pitaniya i smazki dvigatelej vnutrennego sgoraniya : dis. … d-ra tekhn. nauk [Development of testing diagnostic methods for operability of fuel supply and lubrication systems of internal combustion engines : DSc in Engineering Thesis]. Chelyabinsk, 2014. 397 s.
8. Gritsenko A. V. Razrabotka metodov testovogo diagnostirovaniya rabotosposobnosti sistem pitaniya i smazki dvigatelej vnutrennego sgoraniya : avtoref. dis. … d-ra tekhn. nauk [Development of testing diagnostic methods for operability of fuel supply and lubrication systems of internal combustion engines : Synopsis of DSc in Engineering Thesis]. Chelyabinsk, 2014. 40 s.
9. Zayatrov A. V. Kompleksnaya ocenka kachestva i nadyozhnosti elektrooborudovaniya legkovogo avtomobilya : avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk [Combined evaluation of quality and reliability of a passenger automobile electric equipment : Synopsis of PhD in Engineering Thesis]. Samara, 2013. 19 s.
10. Gritsenko A. V., Kukov S. S. Diagnostirovanie avtomobilnykh generatorov po oscillogrammam napryazheniya [Diagnosting automobile generators by volt-

и электрификация сельского хозяйства. 2010. № 2. С. 13–15. ISSN 0206-572X.

11. Филатов М. И., Пузаков А. В. Имитирование неисправностей как инструмент диагностирования автомобильных генераторов // Автомобильная промышленность. 2016. № 1. С. 22–26. ISSN 0005-2337.
12. Пузаков А. В. Разработка диагностической матрицы автомобильной генераторной установки : матер. междунар. науч.-техн. конф. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2015. С. 288–293.
13. Пузаков А. В., Филатов М. И. Экспресс-метод диагностирования автомобильных генераторов // Научное обозрение. 2015. № 16. С. 190–199. ISSN 1815-4972.
14. Руководство по эксплуатации USB Autoscope III [Электронный ресурс]. URL: http://www.autoscaners.ru/upload/iblock/812/usb_autoscope_3_manual.pdf (дата обращения: 20.05.2016).
15. Компьютерный комплекс МОТОР-ТЕСТЕР МТ-10КМ с программным обеспечением МТ-10 и блоком автомобильной диагностики АМД-4АКМ : руководство. Самара : ООО «НПП «НТС», 2012. 62 с.
16. Мотор-Тестер МТ-10КМ : паспорт. Самара : ООО «НПП «НТС», 2012. 24 с.
17. Гриценко А. В., Куков С. С. Диагностирование систем ДВС на тестовых статических режимах // Вестник ЧГАА. 2012. Т. 61. С. 31–38. ISSN 2227-7005.
18. Гриценко А. В., Куков С. С. Обоснование и разработка средств и методов диагностирования двигателей внутреннего сгорания автомобилей : матер. L междунар. науч.-техн. конф. Челябинск : ЧГАА, 2011. С. 6–11.
19. Гриценко А. В., Куков С. С. Разработка эффективных средств и методов диагностирования двигателей внутреннего сгорания автомобилей // Вестник ЧГАА. 2011. Т. 58. С. 111–117. ISSN 2227-7005.
20. Учебные стенды — тренажеры по электрооборудованию автомобилей / К. В. Глемба, С. С. Куков, В. К. Глемба, А. В. Гриценко // Вестник ЧГАУ. 2006. Т. 47. С. 67–69. ISSN 2227-7005.

age oscillograms] // Mekhanizaciya i elektrifikaciya selskogo khozyajstva. 2010. № 2. S. 13–15. ISSN 0206-572X.

11. Filatov M. I., Puzakov A. V. Imitirovanie neispravnostej kak instrument diagnostirovaniya avtomobilnykh generatorov [Failure imitation as a tool of automotive generators diagnostics] // Avtomobilnaya promyshlennost. 2016. № 1. S. 22–26. ISSN 0005-2337.
12. Puzakov A. V. Razrabotka diagnosticheskoj matricy avtomobilnoj generatornoj ustanovki : mater. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Development of a diagnostic matrix of an automotive generator system : proceedings of the international scientific practical conference]. Tyumen : Tyumenskij industrialnyj universitet, 2015. S. 288–293.
13. Puzakov A. V., Filatov N. I. Ekspress-metod diagnostirovaniya avtomobilnykh generatorov [Express method of automotive generator diagnostics] // Nauchnoe obozrenie. 2015. № 16. S. 190–199. ISSN 1815-4972.
14. Rukovodstvo po ekspluatacii USB Autoscope III [USB Autoscope III manual]. [Electronic resource]. URL: http://www.autoscaners.ru/upload/iblock/812/usb_autoscope_3_manual.pdf (date access: 20.05.2016).
15. Kompyuternyj kompleks MOTOR-TESTER MT-10KM s programmnym obespecheniem MT-10 i blokom avtomobilnoj diagnostiki AMD-4AKM : rukovodstvo [Computer suite MOTOR-TESTER MT-10KM with MT-10 software and automotive diagnostics unit AMD-4AKM : a manual]. Samara : OOO «NPP «NTS», 2012. 62 s.
16. Motor-Tester MT-10KM : pasport [Motor-tester MT-10KM : sertificate]. Samara : OOO «NPP «NTS», 2012. 24 s.
17. Gritsenko A. V., Kukov S. S. Diagnostirovanie sistem DVS na testovykh staticheskikh rezhimakh [Diagnosis of internal combustion engine systems on test static modes] // Vestnik ChGAA. 2012. T. 61. S. 31–38. ISSN 2227-7005.
18. Gritsenko A. V., Kukov S. S. Obosnovanie i razrabotka sredstv i metodov diagnostirovaniya dvigatelej vnutrennego sgoraniya avtomobilej : mater. L mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Substantiation and development of means and methods for automotive internal combustion engines diagnostics : proceedings of the L international scientific practical conference]. Chelyabinsk : ChGAA, 2011. S. 6–11.
19. Gritsenko A. V., Kukov S. S. Razrabotka effektivnykh sredstv i metodov diagnostirovaniya dvigatelej vnutrennego sgoraniya avtomobilej [Development of effective means and methods for automotive internal combustion engines diagnostics] // Vestnik ChGAA. 2011. T. 58. S. 111–117. ISSN 2227-7005.
20. Uchebnye stendy — trenazhyory po elektrooborudovaniyu avtomobilej / K. V. Glemba, S. S. Kukov, V. K. Glemba, A. V. Gritsenko [Testbeds for vehicle electric equipment training] // Vestnik ChGAU. 2006. T. 47. S. 67–69. ISSN 2227-7005.

УДК 656.025.2(076.5)

Дмитрий Алексеевич Дрючин, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Оренбургского государственного университета (ОГУ), Оренбург, Россия,
Альмира Файзулловна Фаттахова, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Оренбургского государственного университета (ОГУ), Оренбург, Россия,
Сергей Владимирович Баловнев, старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта Оренбургского государственного университета (ОГУ), Оренбург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ НА РЕГУЛЯРНЫХ АВТОБУСНЫХ МАРШРУТАХ

Dmitriy Alexeyevich Dryuchin, PhD in Engineering, Associate Professor, Automobile Transport Department, Orenburg State University (OSU), Orenburg, Russia,
Almira Faizullovna Fattakhova, PhD in Engineering, Associate Professor, Automobile Transport Department, Orenburg State University (OSU), Orenburg, Russia,
Sergey Vladimirovich Balovnev, Senior Lecturer, Automobile Transport Department, Orenburg State University (OSU), Orenburg, Russia

Imroving the quality of population transport services on the basis of analysing speed modes of movement on scheduled bus routes

Аннотация

Проанализированы проблемы в сфере городского общественного транспорта. Установлено, что одним из важнейших мероприятий, которое позволяет повысить качество обслуживания населения, является организация работы подвижного состава по утвержденным расписаниям. Предложена и апробирована методика анализа скоростных режимов транспортных средств на регулярных автобусных маршрутах, которая дает возможность составить расписания и графики движения, характеризуемые большей вероятностью исполнения.

Ключевые слова: регулярные автобусные маршруты, скоростной режим, пассажирские перевозки, навигационные системы, маршрутное расписание.

Summary

Problems in the city commuting transport sphere have been analyzed. It has been ascertained that one of the most important means of improving the quality of population services is the operation of the bus fleet in accordance with the predetermined schedule. A method of speed analysis for transport vehicles on scheduled bus routes is presented and tested, which enables building schedule and timetables characterized by a higher probability of implementation.

Keywords: scheduled bus routes, speed mode, passenger transport, navigation systems, route timetable.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-108-112

Уровень жизни городского населения во многом определяется состоянием инфраструктуры, обеспечивающей транспортные потребности. Очевидно, что для большинства муниципальных образований наибольшую социальную значимость имеет городской пассажирский транспорт, осуществляющий перевозки по регулярным маршрутам.

По сравнению с перевозками на легковых автомобилях этот вид транспорта характеризуется лучшими удельными экологическими показателями и более высокими показателями безопасности, в меньшей степени нагружает городскую транспортную сеть, доступен практически всем категориям населения как в экономическом плане, так и в плане функционального использования [1, 2].

Отказ от легковых автомобилей и более активное использование городского маршрутного транспорта оправданно с точки зрения коллективных интересов социума и поэтому должно стимулироваться, в частности, за счет повышения качества оказываемых услуг.

Одним из ключевых показателей качества перевозок населения является доступность услуг пассажирского общественного транспорта: финансовая, территориальная, временна́я, функциональная и др. [3, 4]. В свою очередь, временна́я доступность определяется регулярностью и ритмичностью городских маршрутных перевозок, что может быть обеспечено за счет организации работы транспортных средств (ТС) по утвержденным расписаниям.

Следует отметить, что в настоящее время в некоторых муниципальных образованиях городской маршрутный транс-

e-mail: dmi-dryuchin@yandex.ru, alm-fed@mail.ru
Дата поступления: 14.08.2016

порт работает без утвержденных расписаний. В результате это приводит к ряду проблем: затрудняется контроль за фактическими показателями работы ТС на маршруте; увеличивается среднее время ожидания прибытия ТС; становится невозможным организовать согласованное движение транспортных средств различных маршрутов по общему участку; требуется постоянное присутствие диспетчеров, непосредственно контролирующих выход ТС на линию; возникают сложности организации согласованного выпуска ТС с двух конечных пунктов маршрута.

Организация работы маршрутных транспортных средств по расписанию связана с проблемой обеспечения их ритмичного движения при изменяющихся, нестабильных, во многом случайных параметрах внешней среды.

Повышение ритмичности может быть достигнуто за счет разработки расписания, составленного с учетом закономерностей изменения средних скоростей движения. Выявление этих закономерностей для городских автобусов, движущихся в общем транспортном потоке, — одна из задач настоящего исследования.

Фактические скорости движения транспортных средств на городских маршрутах меняются в зависимости от сезона, дня недели и времени суток. Эти колебания прежде всего зависят от интенсивности движения, а также от погодных условий, состояния дорожного покрытия и освещенности дороги. Кроме того, скорости движения ТС существенно варьируются на различных участках маршрута, что также обусловлено вышеуказанными факторами.

Определение закономерностей, характеризующих колебание скорости движения транспортных средств на городских маршрутах, выполнено нами на основе статистического анализа данных [5] навигационной системы ГЛОНАСС [6].

На этапе предварительного анализа было установлено, что межсезонные колебания скорости движения ТС достаточно существенны, поэтому целесообразно выявить закономерность их изменения на маршруте для зимнего и летнего периодов.

Следующий уровень детализации — выявление закономерностей, которые характеризуют изменение средних скоростей движения ТС в зависимости от дня недели. Было сделано предположение, что из-за различной интенсивности транспортных и пассажирских потоков средние скорости будут иметь различные значения в рабочие, субботние и воскресные дни.

Еще более высокий уровень детализации — по времени суток. Предварительный анализ транспортных потоков позволил предположить, что время работы городского маршрута целесообразно разбить на пять периодов: 6.00–7.00; 7.00–9.30; 9.30–16.30; 16.30–20.00; 20.00–23:00. Изменение средних скоростей движения транспортных средств в эти периоды также характеризуется специфическими закономерностями.

В ходе исследования ставилась задача определить поправочные коэффициенты, позволяющие скорректировать среднюю скорость движения транспортных средств в зависимости от времени года, дня недели и времени суток. Полученная база данных может быть представлена в виде трехмерной матрицы (рис. 1).

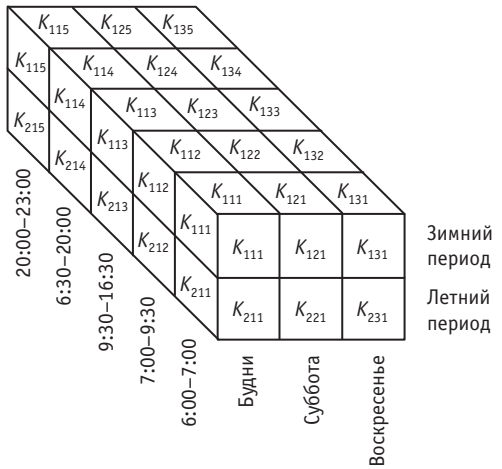


***Рис. 1*. Трехмерная матрица поправочных коэффициентов для корректировки средней скорости движения транспортных средств на городских маршрутах**

Чтобы определить значения поправочных коэффициентов, были проанализированы скорости движения ТС для выборки городских и пригородных маршрутов Оренбурга и получены данные, характеризующие их годовую динамику (рис. 2).

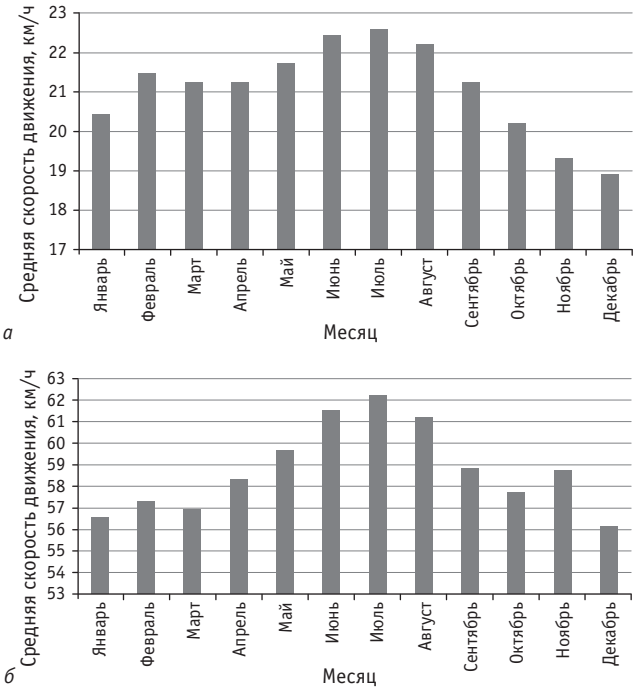


***Рис. 2*. Годовая динамика средних скоростей движения транспортных средств на городских (*а*) и пригородных (*б*) автобусных маршрутах Оренбурга**

Затем для маршрутов, включенных в выборку, проведено более детальное исследование скоростных режимов, позволившее определить динамику средних скоростей движения по дням недели (рис. 3).

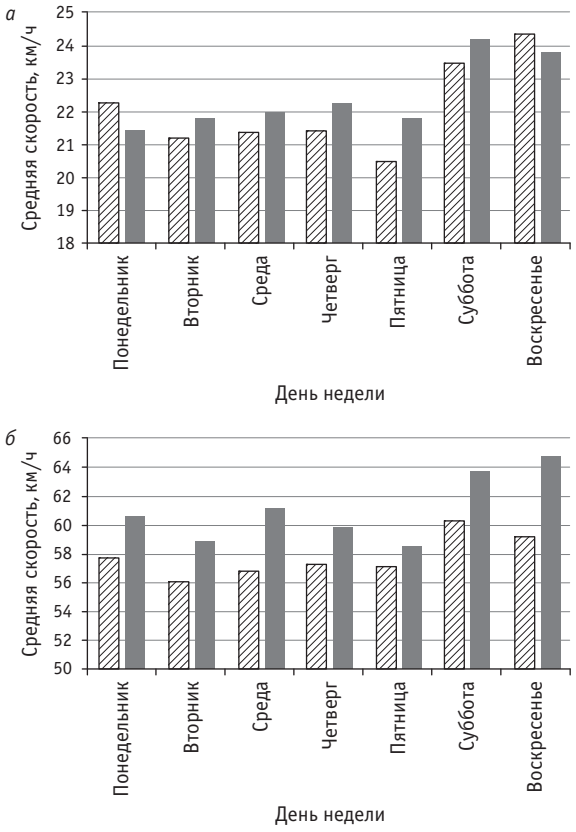


***Рис. 3*. Изменение скорости движения транспортных средств на городских (*а*) и пригородных (*б*) автобусных маршрутах Оренбурга по дням недели:**
▨ — зимний период; ■ — летний период

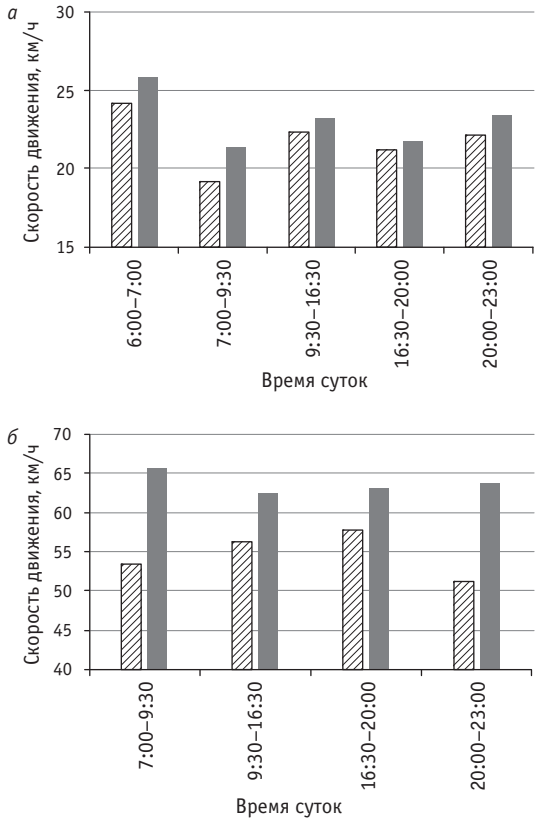


***Рис. 4*. Суточная динамика средней скорости движения транспортных средств на городских (*а*) и пригородных (*б*) автобусных маршрутах в рабочие дни:**
▨ — зимний период; ■ — летний период

Как показало исследование, для городских маршрутов характерно увеличение средних скоростей в субботу и воскресенье, что связано со снижением интенсивности движения на городских улицах в эти дни и уменьшением пассажиропотока. Для пригородных маршрутов также характерно увеличение средней скорости в выходные дни, обусловленное снижением интенсивности движения транспортных средств на части маршрута, пролегающей в черте города, однако зависимость средней скорости от дня недели выражена меньше.

Следующим этапом исследования стало изучение характера изменения средней скорости движения транспортных средств в течение суток. На основе проведенного анализа были построены гистограммы, отражающие суточную динамику средних скоростей движения в рабочие дни (рис. 4). Аналогичные данные были получены для субботних и воскресных дней.

На основе полученных данных были определены корректирующие коэффициенты, позволяющие рассчитать уточненное значение времени, затрачиваемого на рейс, которое в дальнейшем можно использовать при составлении расписания, обеспечивающего ритмичную работу транспортных средств на маршруте. В табл. 1 в качестве примера приведены корректирующие коэффициенты среднесуточной скорости по периодам дня (K_3) для городских и пригородных автобусных маршрутов.

При проведении исследования также определены значения корректирующих коэффициентов среднесезонной скорости по дням недели (K_2) и среднегодовой скорости по сезонам года (K_1).

При разработке расписаний ключевым параметром ритмичности перевозок является расчетное время, затрачиваемое на рейс [7]. Расхождение между расчетным и фактическим временем, затрачиваемым на рейс, — это основной фактор, определяющий ритмичность.

Исходя из полученных данных уточненные значения расчетного времени, затрачиваемого на рейс, могут быть определены по формуле

$$T_{\text{р}} = \frac{L_{\text{м}}}{V_{\text{ср.год}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}, \qquad (1)$$

где $L_{\text{м}}$ — длина маршрута, км;

$V_{\text{ср.год}}$ — среднегодовая скорость движения транспортных средств на маршруте, км/ч;

K_1 — корректирующий коэффициент среднегодовой скорости по сезонам года;

K_2 — корректирующий коэффициент среднесезонной скорости по дням недели;

K_3 — корректирующий коэффициент среднесуточной скорости по периодам дня.

Таблица 1

Значения корректирующих коэффициентов среднесуточной скорости по периодам дня (K_3) для городских и пригородных автобусных маршрутов

Период года	Время суток	Корректирующий коэффициент средней скорости движения автобусов		
		Будни	Субботние дни	Воскресные дни
Городские автобусные маршруты				
Зима	6.00–7.00	1,2	—	—
	7.00–9.30	0,9	1,0	1,0
	9.30–16.30	1,0	1,0	1,05
	16.30–20.00	0,95	1,05	1,0
	20.00–23.00	1,05	0,95	0,95
Лето (июнь–август)	6.00–7.00	1,1	–	–
	7.00–9.30	0,9	0,95	1,05
	9.30–16.30	1,0	1,0	0,95
	16.30–20.00	0,95	1,0	0,95
	20.00–23.00	1,0	1,05	1,05
Пригородные автобусные маршруты				
Зима	6.00–7.00	–	–	–
	7.00–9.30	0,98	0,97	59,1
	9.30–16.30	1,03	1,06	63,02
	16.30–20.00	1,05	1,06	58,3
	20.00–23.00	0,94	0,91	49,77
Лето (июнь–август)	6.00–7.00	–	–	–
	7.00–9.30	1,03	0,93	1,02
	9.30–16.30	0,98	1,05	1,03
	16.30–20.00	0,99	1,1	1,01
	20.00–23.00	1,00	0,92	0,94

Таким образом, разработка более точных маршрутных расписаний возможна на основе данных о среднегодовой скорости движения транспортных средств на линии для каждого маршрута и обобщенных значений корректирующих коэффициентов K_1, K_2 и K_3.

Для практической апробации разработанной методики составлены уточненные графики движения транспортных средств на одном из автобусных маршрутов Оренбурга. Фрагмент графиков представлен на рис. 5.

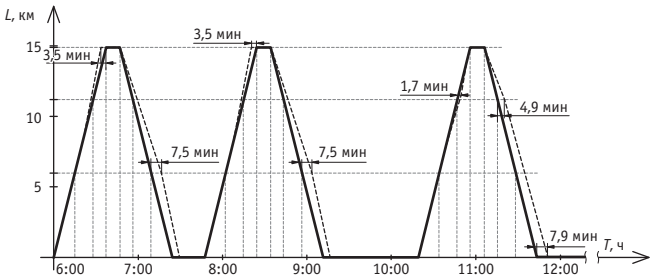


***Рис. 5*. Фрагмент графика движения транспортного средства на одном из городских автобусных маршрутов Оренбурга:**
———— — существующий график; – – – – – – — проектный график

Как видно из рис. 5, расхождения между графиком, построенным по средней скорости движения транспортных средств, и графиком, построенным по уточненным значениям скоростей, может достигать 8 мин.

Предварительный анализ полученных данных, их сравнение с фактическими графиками движения транспортных средств на маршруте позволяют сделать вывод, что использование разработанной методики обеспечивает большую вероятность совпадения заявленного и фактического местоположения автобуса на маршруте, а это, несомненно, способствует повышению качества транспортного обслуживания населения. Таким образом, основную цель научной работы можно считать достигнутой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания на проведение научно-исследовательской работы «Методология обеспечения качества эксплуатации автомобильного транспорта» (№ 1829 от 01.02.2014 г.).

Литература

1. Дрючин Д. А., Майоров М. А. Основные направления повышения качества транспортного обслуживания населения городским пассажирским транспортом по регулярным маршрутам // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 4. С. 30–36. ISSN 1814-6465.
2. Якунин Н. Н., Якунина Н. В., Спирин А. В. Модель организации транспортного обслуживания населения автомобильным транспортом по маршрутам регулярных перевозок // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2013. № 3. С. 63–66. ISSN 2074-7462.
3. Якунин Н. Н., Якунина Н. В., Спирин А. В. Технологические особенности модели организации транспортного обслуживания населения автомобильным транспортом по маршрутам регу-

References

1. Dryuchin D. A., Mayorov M. A. Osnovnye napravleniya povysheniya kachestva transportnogo obsluzhivaniya naseleniya gorodskim passazhirskim transportom po regulyarnym marshrutam [Principal directions for improving the quality of passenger service by route city transport] // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 4. S. 30–36. ISSN 1814-6465.
2. Yakunin N. N., Yakunina N. V., Spirin A. V. Model organizacii transportnogo obsluzhivaniya naseleniya avtomobilnym transportom po marshrutam regulyarnykh perevozok [Model of organizing population transport services by regular scheduled route automobile transport] // Gruzovoe i passazhirskoe avtohozyajstvo. 2013. № 3. S. 63–66. ISSN 2074-7462.
3. Yakunin N. N., Yakunina N. V., Spirin A. V. Tekhnologicheskie osobennosti modeli organizacii transportnogo obsluzhivaniya naseleniya avtomobilnym transportom po marshrutam regulyarnykh perevozok [Technological specifics of a model of organizing population transport services by

лярных перевозок // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2013. № 4. С. 70–74. ISSN 2074-7462.

4. Экспериментальные исследования модели организации перевозок пассажиров в Оренбурге / С. М. Богомолов, С. Н. Якунин, А. Ф. Фаттахова и др. // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2015. № 1. С. 50–54. ISSN 2074-7462.
5. Завадский Ю. В. Статистическая обработка эксперимента в задачах автомобильного транспорта. М. : МАДИ, 1982. 136 с.
6. О навигационной деятельности : федер. закон Рос. Федерации от 14.02.2009 г. № 22-ФЗ // Рос. газета. 2009. 18 февр.
7. Фаттахова А. Ф. Оптимизация структуры парка и расписания работы автобусов на пригородных сезонных маршрутах г. Оренбурга // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 10. С. 54–58. ISSN 1814-6465.

regular scheduled route automobile transport] // Gruzovoe i passazhirskoe avtohozyajstvo. 2013. № 4. S. 70–74. ISSN 2074-7462.

4. Eksperimentalnye issledovaniya modeli organizacii perevozok passazhirov v Orenburge [Experimental research of a model of Orenburg passenger transport organization] / S. M. Bogomolov, S. N. Yakunin, A. F. Fattakhova i dr. // Gruzovoe i passazhirskoe avtohozyajstvo. 2015. № 1. S. 50–54. ISSN 2074-7462.
5. Zavadsky Yu. V. Statisticheskaya obrabotka eksperimenta v zadachakh avtomobilnogo transporta [Statistic processing of the experiment in automotive transport tasks]. M. : MADI, 1982. 136 s.
6. O navigacionnoj deyatelnosti : feder. zakon Ros. Federacii ot 14.02.2009 g. № 22-FZ [On navigation activities : Federal Law of the Russian Federation of 14.02.2009 No. 22-FZ] // Ros. gazeta. 2009. 18 fevr.
7. Fattakhova A. F. Optimizaciya struktury parka i raspisaniya raboty avtobusov na prigorodnykh sezonnykh marshrutakh g. Orenburga [Optimizing the fleet structure and bus operation schedule on suburban seasonal routes of Orenburg] // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. № 10. S. 54–58. ISSN 1814-6465.

УДК 662.613.11:553.985

**Василий Евгеньевич Кошкаров, директор ООО «НИЦ Асфальтит», Екатеринбург, Россия,
Дмитрий Германович Неволин, доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Евгений Васильевич Кошкаров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ОБЕСПЫЛИВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ АВТОДОРОГ И ТЕХНОГЕННЫХ ОТВАЛОВ ЭМУЛЬСИОННЫМИ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИМИ СВЯЗУЮЩИМИ

**Vasily Evgenyevich Koshkarov, Head of «Asphaltite R&DE» LLC, Ekaterinburg, Russia,
Dmitriy Germanovich Nevolin, DSc in Engineering, Professor, Head of Design and Operation of Automobiles Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Evgeniy Vasiliyevich Koshkarov, PhD in Engineering, Associate Professor, World Economy and Logistics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

Organization of strip mine roads and technogenic dumps de-dusting process using preventive emulsion binding substances

Аннотация

При широком применении автотранспорта в карьерах с интенсивным источником пылеобразования, которым являются дороги, не имеющие твердого покрытия, и при складировании техногенных отходов возникает высокая запыленность воздуха, что приводит к ухудшению экологической обстановки. В статье рассматривается организация производственного процесса обеспыливания автодорог и отвалов эмульсионными профилактическими связующими, позволяющая повысить экологичность деятельности предприятий горной промышленности и топливно-энергетического комплекса.

Ключевые слова: организация производственного процесса, обеспыливание, автотранспорт, дорожное покрытие, техногенные отвалы, экологичность предприятия.

Summary

Wide use of vehicle transport in strip mines with intense dust formation of the roads without a solid surface causes high dust pollution of the air, worsening the environmental conditions. The article reviews the organization of strip mine roads and technogenic dumps de-dusting process using preventive surface active substances that allows improving the environmental effects of the enterprises.

Keywords: production process organization, de-dusting, vehicle transport, road surface, technogenic dumps, surface active substances, technical organization solutions, enterprise environmental effect.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-113-117

Статья посвящена вопросам организации производственного процесса обеспыливания, направленного на борьбу с такими интенсивными источниками пылеобразования, как автомобильные дороги, не имеющие твердого покрытия (в качестве примера рассмотрены карьерные автодороги), а также техногенные отвалы горной промышленности и отходы предприятий топливно-энергетического комплекса (в частности, зола уноса).

Современные горнорудные карьеры — это механизированные предприятия, оснащенные мощной техникой. При открытой разработке месторождений раздробленную взрывом руду транспортируют на обогатительную фабрику для последующего измельчения и обогащения. Все стадии технологического процесса сопровождаются интенсивным пылением, которое в основном зависит от атмосферных явлений, физико-механических свойств породы, скорости движения, массы и типа карьерного транспорта.

Высокая запыленность воздуха на дорогах без твердого покрытия (рис. 1) приводит к снижению скорости движения автомобилей, вызывает повышенный износ двигателей, служит причиной роста аварийных ситуаций.

Результаты исследований [1] показывают, что запыленность воздуха вблизи автодорог составляет 0,5–103 кг/м^3, интенсивность выделения пыли — 0,014 кг/с. Дисперсность пыли чрезвычайно высокая: 90–98 % частиц имеют размер менее 10 мкм, т.е. являются потенциально пневмокониозоопасными из-за содержания свободного кремнезема в виде кварца, количество которого достигает 40–42 %.

С другой стороны, интенсивное пыление происходит в результате складирования сыпучих техногенных отходов — металлургического шлака, пиритных хвостов, золы уноса ТЭК и др.

e-mail: sntp_nauka@list.ru, innotrans@mail.ru, EKoshkarov@usurt.ru
Дата поступления: 30.11.2016

Например, за сутки ТЭС мощностью 1 млн кВт сжигает 10 тыс. т угля и выделяет 1000 т шлака и золы (табл. 1). Ежегодно для складирования такого количества шлаков требуется более 1 га площадей при высоте захоронения 8 м.



***Рис. 1*. Пылевой шлейф от карьерного самосвала БелАЗ (вес 25 т)**

Таблица 1

Средневзвешенное количество золы, образующейся от сжигания твердого топлива

Твердое топливо	Средневзвешенное количество золы, % мас.
Бурый уголь	10–15
Каменный уголь	3–40
Антрацит	2–30
Торф	2–30
Дрова	0,5–1,5
Мазут	0,15–0,2
Сланцы	50–80

В работе [2] установлено, что при привнесенном количестве пыли более 58 кг в месяц на 1 га наблюдается эффект угнетения жизнедеятельности большинства растений и животных.

Для разработки эффективных мер по борьбе с пылеобразованием необходимо исследовать физико-химические свойства материалов, составляющих основу пылящих поверхностей.

Так, анализ химического состава золы уноса Рефтинской ГРЭС (табл. 2) показал, что она относится к кислым материалам, характеризуется низкой гидравлической способностью и не обладает самостоятельными вяжущими свойствами.

Границы допустимой влажности золы уноса зависят от требуемой плотности при сооружении штабеля золоотвала, что иллюстрируется коэффициентом уплотнения (табл. 3).

Основными компонентами золошлаковых отходов, образующихся при сжигании твердых топлив, являются оксиды кремния (19–65 %) и алюминия (3–39 %), а также несгоревшие частицы топлива (7–23 %). Зола уноса по гранулометрическому составу близка к сыпучим промышленным продуктам (таким как песок, минеральный порошок, цемент), обладает высоким содержанием микродисперсной фракции (рис. 2) и требует специальных мер по транспортированию, временному хранению и обезвреживанию перед рекультивацией.

Таблица 2

Химический состав золы уноса Рефтинской ГРЭС [3]

Показатель	Возможные изменения содержания оксидов, % по массе	Средневзвешенные значения, % по массе
Al_2O_3	23,0–40,2	31,56
SiO_2	53,0–61,0	56,92
CaO	1,1–1,7	1,40
Fe_2O_3	3,2–4,5	3,84
MgO	0,62–1,00	0,81
K_2O	≤0,60	0,60
Na_2O	≤0,25	0,25
SO_3	0,64–0,70	0,67
TiO_2	≤1,38	1,38
P_2O_5	0,28–0,63	0,45
Прочие вещества	1,00–3,25	2,12

Таблица 3

Зависимость требуемой плотности золы от коэффициента увлажнения [3]

Коэффициент уплотнения K_y	0,98	0,95	0,90
Коэффициент увлажнения K_w	0,70–1,40	0,60–1,50	Не ограничен

Примечание. Коэффициент увлажнения золы уноса K_w определяется как отношение фактической влажности материала $W_ф$ к его оптимальной влажности W_{opt}.

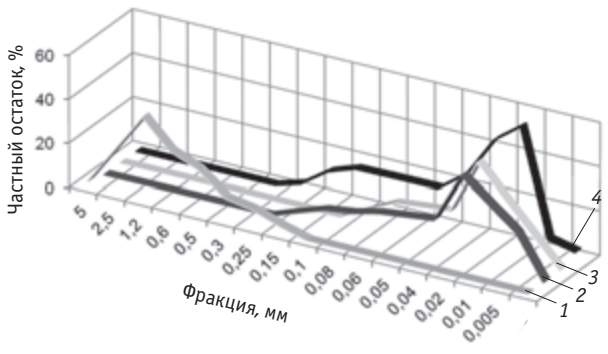


***Рис. 2*. Сравнительное распределение гранулометрического состава дисперсных продуктов:**
1 — песок; *2* — минеральный порошок; *3* — цемент ПЦ 500; *4* — зола

Таким образом, организация производственного процесса обеспыливания грунтовых автодорог с нежестким покрытием и складируемых техногенных массивов — весьма актуальное направление исследований.

Существующие способы предотвращения пыления основаны либо на закреплении пылящих поверхностей с помощью экологически вредных химических веществ, либо на проведении биологической рекультивации. Сегодня для борьбы с пылевыделением на дорогах и техногенных отвалах применяются:

синтетические смолы — фурфуроланилиновые, карбамидоформальдегидные, карбамиднофурфуролформальдегидные, фенолформальдегидные, мочевиноформальдегидные, кумароноинденовые и полиэфирные, особенно в районах с жарким климатом и относительно низкой влажностью воздуха. Оптимальная норма расхода смол при укреплении грунта составляет 2–4 % от его массы. Главные недостатки применения синтетических смол — дефицитность, очень высокая стоимость, токсичность некоторых реагентов (анилин и пр.), неспособность улавливать вновь образующуюся пыль при истирании покрытий и измельчении просыпи;

биологические методы, в частности использование госсиполовой смолы (хлопковый гудрон) — маловязкой жидкости темно-коричневого цвета плотностью 0,87 т/м^3 или водной эмульсии из нее, которая более эффективна с технико-экономической точки зрения;

мокрые способы обеспыливания — использование воды, органических материалов (МГ, СГ, битумные эмульсии, лигносульфонаты, сульфитный щелок), гигроскопических материалов (хлористый кальций, техническая поваренная соль), специальных биологических добавок (Универсин и некоторые др.) [4].

Практический интерес для решения проблемы обеспыливания грунтовых автодорог и техногенных массивов в условиях Уральского региона и для организации процессов обеспыливания представляет развитие технологии закрепления пылящей поверхности с использованием профилактических связующих из тяжелых нефтяных остатков (ТНО). По физико-химическим свойствам (табл. 4) профилактические связующие характеризуются более низкой вязкостью, улучшенными депрессорными свойствами, более высокой адгезией к минеральным материалам.

Таблица 4

Физико-химические показатели
профилактического связующего ПС-1

Показатель	Значение показателя
Плотность, кг/м^3	1016
Вязкость условная при 80 °С, с	60
Пенетрация при 25 °С (5 с)	155
Температура, °С:	
размягчения	42,5
вспышки	285
Содержание, % мас.:	
парафинонафтеновых	7,4
моноциклических ароматических	10,1
бициклических ароматических	20,3
полициклических ароматических	7,2
смол	46,7
асфальтенов	8,3
твердых парафинов	1,7

Организация обеспыливающих мероприятий профилактическими связующими предусматривает получение прямых масловодных эмульсий первого рода — профилактических эмульсий, состав которых подбирается в соответствии с методикой определения степени распада эмульсии на поверхности пылящей поверхности [5]. Сущность методики заключается в определении силы двойного электрического слоя дисперсной фазы прямой ионогенной эмульсии. Результаты эксперимента по определению дзета-потенциала скольжения дисперсной фазы относительно дисперсионной среды во внешнем электрическом поле представлены в табл. 5. Чем выше показатель дзета-потенциала профилактических эмульсий, тем более они стабильны при транспортировании и хранении и тем ниже скорость их распада на поверхности минеральных материалов (пыли).

Таблица 5

Физические свойства дорожных
и профилактических эмульсий

Образец	Однородность по остатку на сите № 014, г	Текучесть, с	pH	Дзета-потенциал ξ, мВ
ЭБК-1	0,30	15	1,97	67,1
ЭБК-2	0,30	12	1,98	78,8
ЭБК-3	0,20	10	2,34	81,0
ТК-3	0,12	7	2,2	115,1
ВККО	0,10	12	2,29	79,5
ПД 36/1	0,09	12	2,15	84,3
БН 50	0,76	9	2,15	86,3

Как показали исследования, некоторые экспериментальные эмульсии, имея содержание эмульгатора, одинаковое с эмульсиями битумными катионными (ЭБК), характеризуются большей текучестью. Кроме того, экспериментальные эмульсии обладают большим дзета-потенциалом в сравнении с аналогичными по составу ЭБК.

При изучении гранулометрического состава дисперсной фазы профилактической эмульсии установлено, что чаще всего размер капель связующего составляет 1,5–5 мк. Для битумных дорожных эмульсий аналогичного состава этот показатель находится в пределах 2–10 мк. То есть профилактические эмульсии более мелкодисперсны, а значит, более стабильны во времени и образуют более качественные пленки при распаде на минеральных материалах (табл. 6).

Заключительный этап организации процесса обеспыливания в карьерах и при складировании дисперсных отходов включает полупромышленные испытания профилактических связующих и последующий мониторинг состояния пленочных покрытий.

Так, промышленный эксперимент по обеспыливанию карьерных и подъездных автодорог профилактическими эмульсиями из ТНО нефтеперерабатывающих заводов проводился на Волковском месторождении ОАО «Святогор» в августе 2015 г. [6].

На асфальтобетонном заводе ООО «Служба асфальтирования и благоустройства» в Верхней Пышме была выпущена

опытная партия профилактической эмульсии из тяжелых нефтяных остатков (ПЭА) производства ООО «Газпромнефть-СМ» (Омск) — асфальта пропановой деасфальтизации ПД 36/1 (табл. 7). Состав профилактической эмульсии подбирался на лабораторной эмульсионной установке («Давиал-ЛАПРОМ») в ООО «Уралхимпласт-Амдор» (Нижний Тагил).

Таблица 6

Область применения углеводородных эмульсий из ТНО

Обрабатываемый материал	Устройство профилактического покрытия грунтовых дорог	
	Несущий слой	Слой основания
Мелкие грунты, несортированный материал (щебнегрунт, скальный грунт), несортированные гравийно-песчаные смеси	До соответствия норме пропускной способности дорог Т2*	До соответствия норме пропускной способности дорог Т3*
Равноразмерные природные пески, дробленые гравийно-песчаные смеси	До уровня движения Т1*	До уровня движения Т2*

*Интенсивность движения тяжелых, грузовых автомобилей в сутки: Т1 = 300–750; Т2 = 150–300; Т3 = 50–150.

Таблица 7

Состав профилактической эмульсии (ПЭА)

Компонент	Содержание, %
АПД 36/1 (ООО «Газпромнефть-СМ», Омск)	55
Эмульгатор АМДОР-ЭМ (ООО «Уралхимпласт-Амдор», Н. Тагил)	0,4
Кислота соляная 36 %, ГОСТ 3118-67	0,25
Вода	44,35

Профилактическая эмульсия в количестве 4 т транспортировалась в обогреваемом автогудронаторе ДС39/Б на место проведения эксперимента по обеспыливанию. Дальность перевозки составила 140 км. В это время подъездная автодорога Волковского рудника находилась в эксплуатации. Поэтому было принято решение наносить ПЭА полосами, с тем чтобы она успевала равномерно подсохнуть (рис. 3).

Конструкция дорожной одежды подъездных автодорог состояла из щебеночно-гравийного основания и песчаного покрытия (отсев дробления). В силу того что в дни проведения эксперимента шли обильные дожди, необходимое увлажнение перед разливом ПЭА для равномерного нанесения и распада эмульсии не выполняли. Среднее время распада ПЭА на покрытии составило от 10 до 20 мин. Окружающая температура воздуха в течение эксперимента по обеспыливанию изменялась от +10 до +20 °С. После планирования и выравнивания профиля автодороги эмульсию наносили с высоким расходом — до 1 л на м^2 и 0,5 л на м^2. Концентрированным составом ПЭА выполнено обеспыливание до 2000 м^2 подъездной автодороги. Температура ПЭА при нанесении на покрытие составила 60 °С.



***Рис. 3*. Нанесение профилактической эмульсии автогудронатором ДС39/Б**

На следующем этапе эксперимента автогудронатор заправляли технической холодной водой, предназначенной для обеспыливания карьерных автодорог Волковского рудника по текущей технологии. Возможность разбавления эмульсии водой необходимо проверять каждый раз при смене источника водоснабжения. Расчетная концентрация АПД в бочках ДС39/Б составила менее 30 %. Разбавленную профилактическую эмульсию наносили на покрытия подъездных карьерных автодорог и автодорог на территории рудоуправления с расходом до 1 л на м^2. Температура разбавленной ПЭА составила 20 °С. Разбавленной ПЭА выполнено обеспыливание более 4000 м^2 подъездных и карьерных автодорог.

Как показали эксперименты, наибольший эффект при борьбе с пылением дает применение эмульсии с концентрацией 57 %. Она уменьшает износ покрытия, капиллярное поднятие воды, связывает вновь поступающие материалы (просыпи), снижает уровень загрязнения атмосферы и улучшает условия движения автомобильного транспорта и санитарно-гигиеническое состояние прилегающей территории. Кроме того, использование этой эмульсии за счет ее длительного действия позволяет сократить общие финансовые затраты на обработку по сравнению с методом обеспыливания водой. Колеса автотранспорта, движущегося по свежему обеспыленному покрытию, остаются незагрязненными (рис. 4), однако необходимо закрывать движение (до 1,5 ч) по полосам со свежим покрытием для равномерного распада пылесвязующего на поверхности дороги.



***Рис. 4*. Отсутствие загрязнения шинной резины автотранспорта после обработки грунтовой автодороги эмульсией**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования по организации производственного процесса обеспыливания карьерных автодорог и техногенных отвалов эмульсионными профилактическими связующими позволили сделать следующие выводы.

1. По таким критериям, как стабильность к обеспыливанию, экологичность применения и себестоимость производства, наиболее приемлемыми в современных условиях организации работ являются эмульсионные профилактические связующие на основе углеводородных эмульсий из тяжелых нефтяных остатков.

2. Покрытие автодорог, обеспыленных с использованием профилактических эмульсий, отличается быстрыми сроками формирования, отсутствием разрушающего фактора для шинной резины автотранспорта, стойкостью к атмосферным явлениям, долговременным эффектом.

3. Для обоснования организации процессов обеспыливания топливно-энергетического комплекса необходимо провести опытно-промышленные испытания по закреплению пылящей поверхности золоотвалов профилактическими эмульсиями.

4. Наиболее перспективным и актуальным направлением исследований по снижению пылевой нагрузки на окружающую среду при переработке минерального сырья является совершенствование способов закрепления пылящих поверхностей техногенных отвалов, представляющих собой основной источник загрязнения.

Литература

1. Целыковский Ю. К. Экологические и экономические аспекты утилизации золошлаков ТЭС / ОАО «ВТИ». М., 2012. 213 с.
2. Рихтер Л. А., Волков Э. П., Покровский В. Н. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов ТЭС. М. : Энергоиздат, 1981.
3. Кошкаров Е. В., Шаламова К. Н. Применение золы уноса Рефтинской ГРЭС в технологиях дорожного строительства // Модернизация дорожного хозяйства: опыт и перспектива : матер. VII междунар. конф. Екатеринбург, 2014. С. 68–69.
4. Технический отчет о лабораторных испытаниях золы уноса Рефтинской ГРЭС / Уральский филиал «УралГИПРОДОРНИИ». Екатеринбург, 2011.
5. Кошкаров В. Е., Ахметов А. Ф. Исследование электрокинетических свойств эмульсионных вяжущих веществ // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. № 8. С. 7–10. ISSN 0023-1126.
6. Эмульсионные профилактические средства из тяжелых нефтяных остатков для обеспыливания карьерных автодорог и отвалов техногенных отходов / Н. Г. Валиев, Д. И. Симисинов, В. Е. Кошкаров, А. Ф. Ахметов // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 8. С. 13–21. ISSN 0536-1028.

References

1. Tselykovsky Yu. K. Ekologicheskie i ekonomicheskie aspekty utilizacii zoloshlakov TES [Ecological and economical aspects of thermal power plant ash and slag utilization] / OAO «VTI». M., 2012. 213 s.
2. Richter L. A., Volkov E. P., Pokrovskiy V. N. Okhrana vodnogo i vozdushnogo bassejnov ot vybrosov TES [Protection of the air from TPP ejects]. M. : Energoizdat, 1981.
3. Koshkarov E. V., Shalamova K. N. Primenenie zoly unosa Reftinskoj GRES v tekhnologiyakh dorozhnogo stroitelstva [Using the Reftinskaya TPP flue ash in road construction technologies] // Modernizaciya dorozhnogo hozyajstva: opyt i perspektiva : mater. VII mezhdunar. konf. Ekaterinburg, 2014. S. 68–69.
4. Tekhnicheskij otchyot o laboratornykh ispytaniyakh zoly unosa Reftinskoj GRES [Technical report of laboratory testing of the Reftinskaya TPP flue ash] / Uralskij filial «UralGIPRODORNII». Ekaterinburg, 2011.
5. Koshkarov V. E., Akhmetov A. F. Issledovanie elektrokineticheskikh svojstv emulsionnykh vyazhushhikh veshhestv [Study of electrokinetic properties of emulsion binders] // Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. 2014. № 8. S. 7–10. ISSN 0023-1126.
6. Emulsionnye profilakticheskie sredstva iz tyazhyolykh neftyanykh ostatkov dlya obespylivaniya karyernykh avtodorog i otvalov tekhnogennykh otkhodov / N. G. Valiev, D. I. Simisinov, V. E. Koshkarov, A. F. Akhmetov [Emulsive preventives from black oil for dust removal at opencast automobile roads and technogenic wastes] // Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal. 2015. № 8. S. 13–21. ISSN 0536-1028.

Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

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) 221-24-67
или на сайте http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusknikov-urgups

Извещение	**Получатель:** Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС **КПП:** 667001001 **ИНН:** 6670317893 **ОКТМО:** 65701000 **Р/сч.:** 40703810863010000192 **в:** ПАО КБ «УБРиР» филиал ССБ **БИК:** 046577795 **К/сч.:** 30101810900000000795 **Код бюджетной классификации (КБК):** _____ **Платеж:** Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС **Плательщик:** _____ **Адрес плательщика:** _____ **ИНН плательщика:** _____ **№ л/сч. плательщика:** _____ **Сумма:** _____ руб. ___ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2017 г.
Квитанция	**Получатель:** Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС **КПП:** 667001001 **ИНН:** 6670317893 **ОКТМО:** 65701000 **Р/сч.:** 40703810863010000192 **в:** ПАО КБ «УБРиР» филиал ССБ **БИК:** 046577795 **К/сч.:** 30101810900000000795 **Код бюджетной классификации (КБК):** _____ **Платеж:** Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС **Плательщик:** _____ **Адрес плательщика:** _____ **ИНН плательщика:** _____ **№ л/сч. плательщика:** _____ **Сумма:** _____ руб. ___ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2017 г.

Подписка на 2017 год.

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

АБОНЕМЕНТ на ~~газету~~ / журнал — 46463 (индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания) | Количество комплектов:

на 2017 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 — 46463 (индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Стоимость	подписки	_____ руб. ___ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	_____ руб. ___ коп.		

на 2017 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)

Научно-технический журнал «Транспорт Урала» DOI:10.20291/1815-9400

№ 4 (51), 2016 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс: 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г. Свидетельство ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.
Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Адрес редакции:
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.
Тел. (343) 221-24-90
http://www.transporturala.usurt.ru
e-mail: EPupova@usurt.ru

Учредитель:
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)

Главный редактор:
Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:
Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:
Елена Семеновна Пупова,
тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,
e-mail: EPupova@usurt.ru

Дизайн:
Антон Леонидович Курносов

Верстка:
Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:
Дмитрий Васильевич Поморцев

С 1 января 2007 г. журнал включен ВАКом в перечень периодических, научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Подписано в печать 30.12.2016

Тираж 250 экз. Формат 60×90/8

Отпечатано в типографии ООО «Е-ПРИНТ»,
614000, г. Пермь, ул. Куйбышева, 1,
тел. (342) 277-13-63, 20-999-33

Заказ № 000011

© Уральский государственный университет путей сообщения, 2016