

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 14, выпуск 1, 2017

ISSN (Print) 1815-588X

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I»

Адрес учредителя и издателя

190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32

Адрес редакции

190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005 г., выдано
Федеральной службой по надзору за соблюдением
законодательства в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия, Управление
по Северо-Западному федеральному округу

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в перечень ведущих
рецензируемых научных журналов и изданий
(решение Президиума Высшей аттестационной
комиссии Минобрнауки России от 29.12.2015 г.,
№ 6/6)

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

по адресно-целевой подписке через редакцию
и каталог ОАО «Роспечать» (индекс 18509)

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

А. Ю. Панычев, канд. экон. наук, доцент

Заместитель главного редактора

В. В. Сапожников, д-р техн. наук, профессор

Научный редактор

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

Выпускающий редактор

Э. А. Горелик

Перевод на английский язык

Ю. А. Фаттахова

Верстка

А. А. Стуканова

Редактор сайта

Л. А. Стрелкова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Панычев Александр Юрьевич, канд. экон. наук,
доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия,
председатель Совета

Юсупов Рафаэль Мидхатович, д-р техн. наук,
профессор, чл.-корр. РАН, Институт информатики
и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Россия

Шнайдер Экхард, профессор, Фраунгоферовский
институт неразрушающего контроля, Саарбрюкен,
Германия

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический
университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический
университет, София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Сапожников Валерий Владимирович,
д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург,
Россия, председатель редколлегии

Бадер Михаил Петрович, д-р техн. наук,
профессор, МГУПС (МИИТ), Москва, Россия

Губачева Лариса Александровна, д-р техн. наук,
профессор, Восточно-Украинский национальный
университет им. В. Даля, Луганск, Украина

Гуда Александр Николаевич, д-р техн. наук,
профессор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия

Корниенко Анатолий Адамович, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Нестеров Валерий Леонидович, д-р техн. наук,
профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия

Титова Тамара Семеновна, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Канаев Андрей Константинович, д-р техн. наук,
доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Фото на обложке из архивов библиотеки
ФГБОУ ВО ПГУПС. 1910 г.

Подписано в печать с оригинал-макета 27.03.2017.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.
Усл. печ. л. 22,75. Установочный тираж 300 экз.
Заказ 378. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ПГУПС
190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 14, issue 1, 2017

ISSN (Print) 1815-588X

Founder and publisher

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University"

Founder and publisher address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32

Editorial address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32

e-mail: izvestia@izvestiagups.org

Mass media registration certificate number

П И Н Ф С 2 - 7 4 9 9 dd. 06.04.2005 issued by the Federal service for the monitoring of legislation compliance in the sphere of mass communications and the preservation of cultural heritage, North West Federal district division

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI)

The Journal is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications

The Journal has the Peer-review division

The Journal is distributed by direct subscription via Editorial office and Rospechat catalogue (item 18509)

JOURNAL STAFF

Editor-in-chief

A. Yu. Panychev, Cand. of Economics, Associate Professor

Deputy chief editor

V. Sapozhnikov, D.Eng., Professor

Science editor

A. Kanayev, D.Eng., Associate Professor

Executive editor

E. Gorelik

English translation

Yu. Fattakhova

Layout

A. Stukanova

Online content editor

L. Strelkova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Aleksander Panychev, Cand. of Economics, Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Rafael Yusupov, D.Eng., Professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Ekhard Shneider, Professor, Fraunhofer Institute for Non-Destructive Testing, Saarbrücken, Germany

Marek Sitazh, Professor, Silesian University of Technology, Poland

Khristo Khristov, Professor, Technical University of Sofia, Bulgaria

EDITORIAL TEAM

Valeriy Sapozhnikov, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial team

Mikhail Badyer, D.Eng., Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, Russia

Larisa Gubachyeva, D.Eng., Professor, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Luhansk, Ukraine

Aleksander Guda, D.Eng., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Anatoliy Kornienko, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Aleksander Ledyayev, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valeriy Nesterov, D.Eng., Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Tamila Titova, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Andrey Kanayev, D.Eng., Assoc. Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Published by Petersburg State Transport University
190031, St. Petersburg., Moskovskiy pr., 9
Open price

© Petersburg State Transport University, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Ю. И. Ефименко, П. К. Рыбин, А. Г. Филиппов

Особенности обоснования развязок маршрутов в железнодорожных узлах с использованием динамического программирования 5

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

А. В. Бенин, А. Н. Коньков, А. В. Романов

Результаты визуального обследования участка действующего Байкальского тоннеля 16

Е. П. Дудкин, Н. Н. Султанов

Обоснование современных конструкций трамвайных путей 24

Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов, Е. П. Дудкин

Оценка уровня вибраций с точки зрения их воздействия на пассажиров поездов при движении по мостовым сооружениям на высокоскоростных железнодорожных магистралях 33

Ю. А. Канцибер, В. И. Штыков, А. Б. Пономарев

Повышение эффективности осушения слабоводопроницаемых грунтов земляного полотна железных дорог 43

В. А. Кручек, А. М. Евстафьев

Особенности кинематического расчета осевого редуктора колесной пары с горизонтальной реактивной тягой группового тягового привода локомотива 52

А. С. Мазнев, О. А. Степанская, О. И. Шатнев

Системы рекуперации энергии торможения электроподвижного состава на городском транспорте Санкт-Петербурга 63

А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. Н. Комарова, А. В. Гусев

Обоснование назначения минимально допустимого значения коэффициента конструктивного запаса прогиба рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов 73

О. Д. Покровская, О. Б. Маликов, М. А. Зачешигрова

Морфология терминальных сетей 88

А. Н. Савоськин, А. П. Васильев

Дислокационная модель взаимодействия колеса и рельса при реализации вращающего момента и при боковых колебаниях экипажей 103

В. Н. Смирнов

Конструктивные решения по уменьшению продольных усилий в рельсах бесстыкового пути на мостах 110

Т. С. Титова, А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, М. В. Евстафьева	
Оценки энергоэффективности работы железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения	119

А. В. Третьяков, А. А. Петров, К. В. Елисеев, М. В. Зимакова	
Проведение ходовых динамических испытаний грузовых вагонов с применением тензометрической колесной пары	127

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А. О. Кравцов, А. А. Привалов	
Методика выбора приоритетных элементов информационно-телекоммуникационной системы, функционирующей в условиях применения организованным нарушителем таргетированных атак	137

О. Б. Маликов

Определение запасов и емкости складов в цепях поставок	149
--	-----

К. Ю. Полинкевич	
Итерационный способ расчета тонкостенных стержней открытого профиля на прочность	157

В. Г. Себешев	
Расчеты надежности сооружений и конструкций по поликритериальным и обобщенным условиям безотказности	165

Т. С. Титова, Р. Г. Ахтямов, Э. С. Насырова	
Оценка влияния жилищно-коммунального хозяйства на состояние водоемов в пределах урболандшафта	175



УДК 656.21

Ю. И. Ефименко, П. К. Рыбин, А. Г. Филиппов

ОСОБЕННОСТИ ОБОСНОВАНИЯ РАЗВЯЗОК МАРШРУТОВ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЗЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Дата поступления: 01.12.2016

Решение о публикации: 13.03.2017

Цель: Разработать методику обоснования этапности развития узловых железнодорожных станций, включая развязки подходов. **Методы:** Для обоснования наиболее рациональной этапности развития станции использован метод динамического программирования. **Результаты:** По предлагаемому методу выполнены оптимизационные расчеты, позволившие установить граничные значения размеров движения на примыкающих к станции подходах, при которых целесообразно сооружение путепроводной развязки. **Практическая значимость:** Использование предложенной методики дает возможность существенно повысить обоснованность проектных решений при развитии железнодорожных станций и узлов.

Ключевые слова: Пост-шлюз, путепроводная развязка, этапность развития, вариант технического состояния, условно-оптимальный переход.

Yuriy N. Yefimenko, D. Sci., professor, kjdstan@pgups.edu.ru; **Peter K. Ribin**, Cand. Sci., professor, head of a chair, dean, zdsu@pgups.ru; ***Anton G. Philippov**, assistant, tigropard10@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) PECULIARITIES OF ROUTE INTERCHANGE JUSTIFICATION IN RAILWAY JUNCTIONS BY MEANS OF DYNAMIC PROGRAMMING APPLICATION

Objective: To develop justification methods of railway crossing stations staging development, including approach interchange. **Methods:** Dynamic programming method was used to give the most efficient staging of the station's development. **Results:** Optimality calculations were carried out by means of the suggested method, which allowed us to establish landmarks of the rate of train operation on approaches adjacent to the station, according to which the flying junction construction is sufficient. **Practical importance:** Application of the proposed method might significantly improve the justification of design decisions taken in the sphere of railway stations and junctions.

Keywords: Post-lock, flying junction, staging development, technical state variant, conditionally optimal crossing.

Введение

Развязки проектируют при наличии пересечений маршрутов с целью уменьшения или полного исключения задержек подвижного состава из-за враждебности маршрутов. Возможны три варианта развязок маршрутов: в одном уровне в горловинах станций, в одном уровне с сооружением постов-шлюзов и в разных уровнях со строительством путепроводных развязок. При устойчивом росте размеров движения как на существующих подходах, так и за счет примыкания новых возникает необходимость наращивания путевого развития станций, которое по действующим «Правилам...» [1] должно осуществляться поэтапно на основе «Методических рекомендаций...» [2]. Одновременно с развитием парков станций может потребоваться и изменение развязок маршрутов, которое также можно проводить поэтапно, но считать это не отдельной задачей, а составной частью проблемы обоснования этапности развития станции или узла в целом, причем в рамках ее решения необходимо определить граничные размеры движения, и при достижении их следует менять принципиальную схему развязки маршрутов.

Многочисленные исследования, выполненные, начиная с 1960-х годов, показывают, что обоснование этапности развития станций и узлов целесообразно осуществлять на основе метода динамического программирования [3–14], приняв в качестве критерия эффективности минимум приведенных строительно-эксплуатационных затрат [2]. Учитывая ограниченность объема статьи, предлагаемый метод рассмотрен на примере узловой участковой станции полупродольного типа.

Постановка задачи

Проектируемая станция и подходы к ней рассматриваются как физическая система S , состояние которой характеризуется набором параметров, являющихся показателями ее

технического состояния и технологии работы. В параметры системы входят количество подходов к станции и главных путей на них, средства сигнализации и связи по движению поездов на подходах, число путей в каждом из парков, взаимное расположение устройств (парков, локомотивного хозяйства, пассажирских и грузовых устройств и др.), количество и состав бригад ПТО и ПКО (на технических станциях), число смен работы устройств. Для узловых станций учитываемые параметры необходимо дополнить вариантом развязки маршрутов на подходах и в горловинах.

Система взаимодействует с потоком поездов $N(k)$, состоящим из k категорий (пассажирские, грузовые, транзитные, конечные), который характеризуется неравномерностью по периодам года и суток, имеет тенденцию роста по годам и практически не зависит от состояния системы S .

Система является управляемой: ее состояние может либо сохраняться без изменения, либо меняться за счет придания параметрам системы новых значений. Сохранение или изменение состояния системы в момент t называют управлением или переходом $U_i^j(t)$. При $i = j$ станция и подходы к ней остаются без изменения, а при $i \neq j$ переходят от существующего состояния S_i к новому S_j .

Каждое состояние станции в год эксплуатации t , которому соответствует величина потока поездов $N_t(k)$, может быть оценено набором показателей (эксплуатационный штат работников, объем маневровой работы, пробеги и простои подвижного состава и др.). Денежное выражение их совокупности представляет собой годовые эксплуатационные расходы $C_{t,j}$, которые являются частью критерия эффективности. Капитальные вложения для перехода станции из состояния S_i в другое S_j ($i \neq j$) $K_{i \rightarrow j}$ составляют вторую часть критерия эффективности.

Под выбором наиболее рациональной этапности развития станции и подходов к ней следует понимать поиск такого набора управлений $U_i^j(t)$ ($i = 1, 2, \dots, j; j = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, T$), при котором за рассматриваемый

расчетный период T будет обеспечен минимум приведенных строительно-эксплуатационных затрат. Накопленный опыт оптимизации этапности развития станций и узлов [3, 6, 7, 10, 12] свидетельствует о целесообразности решения задачи в прямом направлении.

Метод динамического программирования основан на разбиении вычислительного процесса на отдельные шаги, в пределах каждого из которых определяют набор условно-оптимальных переходов с учетом всех предыдущих шагов. Задача оптимизации может быть разделена на три части: пошаговый расчет критерия эффективности и определение условно-оптимальных переходов; выбор оптимального состояния в конце расчетного периода; установление оптимальной траектории развития в координатах «время–состояние».

Исходные данные для расчетов

Вычислительной процедуре обоснования этапности станции, включая развязки маршрутов, предшествует подготовка необходимых для расчетов исходных данных. Это продолжительность расчетного периода (горизонт расчета) T , величина шага оптимизации, принимается обычно равной одному году, удельные нормативы капитальных вложений и эксплуатационных расходов, величина нормы дисконта E , используемая для приведения разновременных затрат к сопоставимому виду.

Наиболее важная и сложная часть подготовки исходных данных – разработка вариантов технического состояния проектируемого объекта и их экономическая оценка, представляемая в виде следующих документов:

- 1) массива исходных капиталовложений K_j ;
- 2) матрицы капитальных вложений для переходов от имеющихся к другим вариантам технического состояния $K_{i \rightarrow j}$;
- 3) матрицы эксплуатационных расходов по годам и вариантам технического состояния $C_{i,j}$.

Число вариантов технического состояния станции определяют исходя из размеров движения поездов в начале и конце расчетного периода принятого шага увеличения числа путей в парках и наличием альтернативных вариантов развития. Шагом увеличения числа путей в парках целесообразно принять 1 путь, а увеличение числа путей «Правилами...» [1] предусмотрено при росте размеров поступления числа поездов в парк на 12. Минимальное число вариантов технического состояния станции будет при отсутствии альтернативных вариантов решений. В поставленной в статье задаче каждый вариант технического состояния парков необходимо рассмотреть в сочетании с тремя указанными выше вариантами развязок маршрутов.

Пошаговый расчет критерия эффективности и определение условно-оптимальных переходов

При растущих объемах работы пошаговый расчет критерия эффективности и определение условно-оптимальных переходов осуществляются на основе рекуррентного соотношения

$$\begin{aligned} \Theta_{t,j}^{\text{опт}} &= \min(\Theta_{t-1,i}^{\text{опт}} + \Delta\Theta_{t,j}(U_i^j)) \\ (t &= 1, 2, \dots, T; j = 1, 2, \dots, n; \\ i &= 1, 2, \dots, j), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Theta_{t,j}^{\text{опт}}$ – минимальное значение приведенных строительно-эксплуатационных затрат в год t для достижения к этому году технического состояния S_j ; $\Theta_{t-1,i}^{\text{опт}}$ – то же в год $t-1$ для состояния S_i ; $\Delta\Theta_{t,j}(U_i^j)$ – приращение критерия эффективности в год t при переходе от состояния S_i к состоянию S_j , равное

$$\Delta\Theta_{t,j}(U_i^j) = K_{i \rightarrow j} \alpha_t + C_{t,i} \alpha_t. \quad (2)$$

Некоторые особенности имеет критерий эффективности для первого шага оптимизации

ции. Для вновь сооружаемых станций оно определяется из выражений

$$\left. \begin{aligned} \Theta_{1,1}^{\text{опт}} &= \Theta_{1,1}(U_1^1) = K_1 + C_{1,1}\alpha_1, \\ \Theta_{1,2}^{\text{опт}} &= \min(\Theta_{1,2}(U_1^2)) = K_1 + \\ &+ C_{1,1}\alpha_1 + K_{1 \rightarrow 2}\alpha_1, \\ \Theta_{1,2}(U_2^2) &= K_2 + C_{1,2}\alpha_1 + K_{1 \rightarrow 2}\alpha_1; \\ &\dots\dots\dots \\ \Theta_{1,j}^{\text{опт}} &= \min(\Theta_{1,j}(U_1^j)) = K_1 + \\ &+ C_{1,1}\alpha_1 + K_{1 \rightarrow j}\alpha_1, \\ \Theta_{1,j}(U_2^j) &= K_2 + C_{1,2}\alpha_1 + K_{2 \rightarrow j}\alpha_1, \\ &\dots\dots\dots \\ \Theta_{1,j}(U_j^j) &= K_j + C_{1,j}\alpha_1; \\ &\dots\dots\dots \\ \Theta_{1,n}^{\text{опт}} &= \min(\Theta_{1,n}(U_1^n)) = K_1 + \\ &+ C_{1,1}\alpha_1 + K_{1 \rightarrow n}\alpha_1, \\ \Theta_{1,n}(U_2^n) &= K_2 + C_{1,2}\alpha_1 + K_{2 \rightarrow n}\alpha_1, \\ &\dots\dots\dots \\ \Theta_{1,n}(U_j^n) &= K_j + C_{1,j}\alpha_1 + K_{j \rightarrow n}\alpha_1, \\ &\dots\dots\dots \\ \Theta_{1,n}(U_n^n) &= K_n + C_{n,1}\alpha_1, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

здесь $K_1, K_2, \dots, K_j, \dots, K_n$ – исходные капиталовложения, необходимые для сооружения станции к началу расчетного периода по вариантам $S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_n$.

Остальные элементы выражения (3) понятны из пояснений к формулам (1) и (2).

При развитии существующей станции (узла) в качестве первого варианта технического состояния принимается ее состояние до переустройства, а переход к каждому новому состоянию будет единственным, идущим от первого варианта. Поэтому все переходы на первом шаге считают условно-оптимальными, и критерий эффективности для них будет определяться однозначно первыми строками выражений $\Theta_{1,1}^{\text{опт}}, \Theta_{1,2}^{\text{опт}}, \dots, \Theta_{1,j}^{\text{опт}}, \dots, \Theta_{1,n}^{\text{опт}}$ в системе (3).

Для комплексного решения задачи совместного обоснования этапности наращивания числа путей в парках станций и развития схемы развязки маршрутов каждый вариант состояния путевого развития парков должен быть рассмотрен в сочетании с тремя указанными вариантами развязки маршрутов, что требует особого порядка нумерации вариантов технического состояния и контроля за переходами между ними. С этой целью все изучаемые варианты необходимо разделить на группы по 3 варианта и пронумеровать так, чтобы в каждой группе первым был вариант с развязкой маршрутов в одном уровне без шлюза, вторым – вариант со шлюзом и третьим – с развязкой в разных уровнях. Заведомо нерациональные переходы нужно исключать. Это переходы между вариантами внутри одной группы, а также от вариантов с путепроводной развязкой к вариантам следующих групп с развязками в одном уровне или от вариантов со шлюзом к вариантам с пересечением маршрутов в одном уровне без шлюза. Отсечь нерациональные переходы легче всего заданием в матрице капитальных вложений для таких переходов завышенных в несколько раз значений капиталовложений. Аналогично следует поступить для исключения вариантов технического состояния парков, в которых число приемоотправочных путей меньше предусмотренной «Правилами...» [1] нормы. В матрице эксплуатационных расходов для них, начиная с первого года несоответствия числа путей размерам движения поездов, также необходимо задать завышенные значения эксплуатационных расходов.

Пример определения наиболее рациональной этапности развития станции и развязки маршрутов

Выбор рациональной этапности развития рассмотрим на примере участковой станции полупродольного типа, расположенной на двухпутной линии AB . К началу расчетного периода к станции с четной стороны примы-

кает однопутный подход *В* (рис. 1). Все подходы элетрифицированы на постоянном токе; поездной локомотив для грузового движения – ВЛ10^у; норма полезной длины приемоотправочных путей – 1050 м.

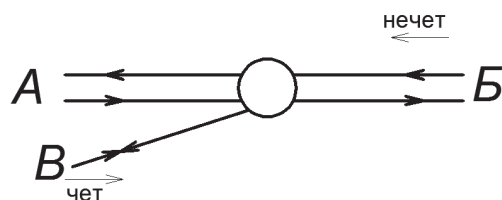


Рис. 1. Схема подходов к станции

Рост размеров движения в течение расчетного периода, составляющего 20 лет, представлен в табл. 1.

Согласно «Правилам...» [1] потребное число приемоотправочных путей для грузовых поездов при резерве поездных локомотивов 15% составит в начале расчетного периода в

нечетном парке 7 и в четном парке 8. В конце расчетного периода их число должно быть увеличено соответственно до 11 и 12 путей. Кроме того, на весь расчетный период предусмотрено использовать 2 пути для перерабатываемых поездов, для приема и отправления пассажирских поездов – 4 главных пути и один приемоотправочный.

Исходя из приведенных размеров движения, путевое развитие станции с учетом трех возможных вариантов развязок маршрутов может быть представлено в виде 15 вариантов технического состояния, разделенных на 5 групп (табл. 2).

Принципиальные схемы станции каждого из трех вариантов развязок маршрутов приведены на рис. 2.

На основе масштабных планов станции с шагом увеличения числа путей в приемоотправочных парках на один путь определим исходные капиталовложения:

Варианты

технического

состояния.....

Исходные

капитало-

вложения,

млрд руб.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3,2	3,4	3,5	3,5	3,6	3,8	3,6	3,8	3,9	3,8	3,9	4,1	4,0	4,1	4,3

ТАБЛИЦА 1. Изменение размеров движения в течение расчетного периода

Годы эксплуатации	Размеры пассажирского движения на подходах, пар поездов			Размеры грузового движения на подходах, пар поездов					
				транзитных			перерабатываемых		
	<i>А</i>	<i>Б</i>	<i>В</i>	<i>А</i>	<i>Б</i>	<i>В</i>	<i>А</i>	<i>Б</i>	<i>В</i>
1	4	6	2	48	63	15	2	4	2
7	4	6	2	60	78	18	3	5	2
10	6	9	3	72	93	21	4	7	3
15	6	10	4	84	108	24	4	7	3
19	8	12	4	96	123	27	4	7	3
20	8	12	4	96	123	27	4	7	3

Также установим матрицы капитальных вложений (табл. 3) для переходов между вариантами технического состояния. Подсчет стоимости строительства производился по

укрупненным показателям, взятым в проектах-аналогах ПАО «Ленгипротранс». Использовались только капиталовложения, зависящие от этапности развития. В их состав входили:

ТАБЛИЦА 2. Варианты технического состояния станции

№ технического состояния	Число приемоотправочных путей в парках для транзитных поездов	
	нечетном	четном
1 2 3	7	8
4 5 6		
7 8 9		
10 11 12	10	11
13 14 15		

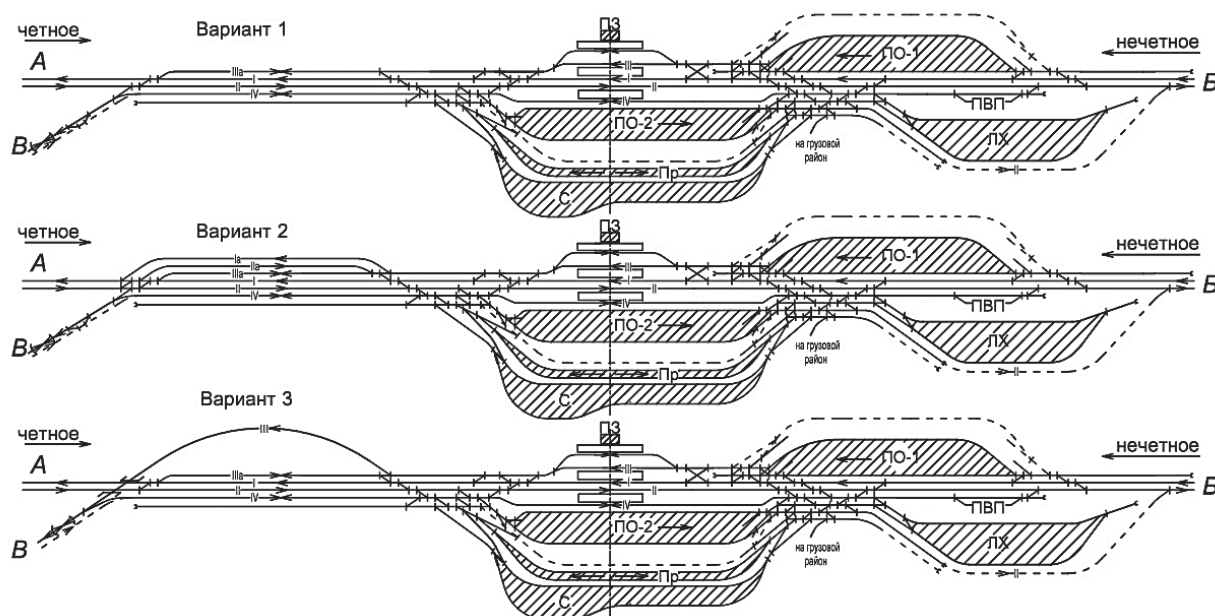


Рис. 2. Схемы станций с вариантами развязок маршрутов:

ПЗ – пассажирское здание; ПО-1 – приемоотправочный парк для нечетных транзитных поездов;

ПО-2 – приемоотправочный парк для четных транзитных поездов; Пр – парк для поездов, поступающих в расформирование; С – сортировочный парк; ЛХ – локомотивное хозяйство;

ПВП – пути для пожарного и восстановительного поездов

подготовка территории строительства; земляные работы; укладка путей и стрелочных переводов; электрическая централизация стрелок и сигналов; устройство контактной сети; сооружение путепровода.

В составе отличающихся по вариантам эксплуатационных расходов, определенных применением укрупненных расходных ставок (табл. 4), учитывались затраты с учетом амортизационных отчислений на содержание

ТАБЛИЦА 3. Матрица капитальных вложений для переходов по вариантам

Исходный вариант технического состояния	Капиталовложения, необходимые для перехода к вариантам, млн руб.														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	99 999	99 999	700	826	975	843	970	1119	1004	1136	1285	1183	1334	1483
2	99 999	0	99 999	99 999	700	975	99 999	843	1119	99 999	1010	1285	99 999	1208	1483
3	99 999	99 999	0	99 999	99 999	700	99 999	99 999	843	99 999	99 999	1010	99 999	99 999	1208
4	99 999	99 999	99 999	0	99 999	99 999	569	696	844	730	862	1011	909	1060	1209
5	99 999	99 999	99 999	99 999	0	99 999	99 999	569	844	99 999	736	1011	99 999	934	1209
6	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	0	99 999	99 999	569	99 999	99 999	736	99 999	99 999	934
7	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	0	99 999	99 999	586	719	868	765	917	1066
8	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	0	99 999	99 999	593	868	99 999	791	1066
9	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	0	99 999	99 999	593	99 999	99 999	791
10	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	0	99 999	99 999	605	757	906
11	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	0	99 999	99 999	624	906
12	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	0	99 999	99 999	624
13	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	0	99 999	99 999
14	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	0	99 999
15	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	99 999	0

ТАБЛИЦА 4. Матрица годовых эксплуатационных расходов

Год эксплуа- тации	Годовые эксплуатационные расходы по вариантам технического состояния, млн руб.														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	200,0	203,9	196,5	214,9	218,8	211,5	223,3	227,1	219,8	231,3	236,2	228,8	240,8	248,7	241,3
2	200,2	204,0	196,5	215,2	218,9	211,5	223,5	227,3	219,8	231,5	236,3	228,8	241,0	248,8	241,3
3	201,3	204,6	196,8	216,3	219,6	211,7	224,6	227,9	220,0	232,6	236,9	229,1	242,1	249,4	241,6
4	203,0	205,1	196,8	218,0	220,1	211,7	226,3	228,4	220,0	234,3	237,4	229,1	243,8	249,9	241,6
5	205,5	205,6	197,0	220,4	220,5	212,0	228,8	228,8	220,3	236,8	237,9	229,3	246,3	250,4	241,8
6	206,4	205,9	197,0	221,4	220,9	212,0	229,7	229,2	220,3	237,7	238,2	229,3	247,2	250,7	241,8
7	99999	99999	99999	222,1	221,2	212,2	230,4	229,5	220,5	238,5	238,6	229,6	248,0	251,0	242,1
8	99999	99999	99999	224,1	222,4	212,5	232,4	230,8	220,8	240,4	239,8	229,8	249,9	252,3	242,3
9	99999	99999	99999	226,3	223,9	212,7	234,6	232,2	221,0	242,7	241,3	230,1	252,2	253,7	242,6
10	99999	99999	99999	99999	99999	99999	237,4	234,4	221,3	245,5	243,4	230,3	255,0	255,9	242,8
11	99999	99999	99999	99999	99999	99999	240,3	234,9	221,3	248,4	243,9	230,3	257,9	256,4	242,8
12	99999	99999	99999	99999	99999	99999	243,9	235,6	221,5	251,9	244,6	230,6	261,4	257,1	243,0
13	99999	99999	99999	99999	99999	99999	247,8	236,1	221,5	255,8	245,1	230,6	265,3	257,6	243,0
14	99999	99999	99999	99999	99999	99999	252,5	236,8	221,8	260,6	245,9	230,8	270,1	258,3	243,3
15	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	263,6	246,5	231,1	273,1	259,0	243,5
16	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	271,0	248,3	231,1	280,5	260,7	243,5
17	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	280,3	250,5	231,3	289,8	262,9	243,8
18	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	291,4	253,0	231,6	300,9	265,5	244,0
19	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	314,4	268,5	244,3
20	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	323,1	270,1	244,3

путей, стрелочных переводов и контактной сети, а также расходы на тягу поездов (расходы электроэнергии) и потери, вызванные простоями подвижного состава из-за враждебности маршрутов. Данные для подсчета затрат на содержание постоянных устройств принимались из масштабных планов развития станции, расходы на тягу поездов по вариантам развязки маршрутов подсчитывались умножением расхода электроэнергии, который определялся по тяговым расчетам, на стоимость 1 кВт-ч.

Задержки грузовых поездов устанавливались методом имитационного моделирования с помощью программного комплекса «Аврора», разработанного в ПАО «Ленгипротранс». Потери от задержек получались умножением величины задержек (в часах) на соответствующую расходную ставку.

Результаты расчетов по обоснованию этапности развития станции и развязок подходов к ней целесообразно представлять в виде графика, характеризующего оптимальную траекторию развития в координатах «время–состояние» [6]. Для рассматриваемого примера такой график при принятых исходных данных приведен на рис. 3. Из этих данных видно, что развитие станции с развязкой маршрутов на ней следует представлять в три этапа: на первом – с 1-го до 5-го года эксплуа-

тации наиболее эффективным будем иметь в нечетном парке (ПО-1) 7, а в четном (ПО-2) – 8 приемоотправочных путей с пересечением маршрутов в одном уровне; на втором – с 6-го года эксплуатации по 13-й – 9 и 10 путей в парке ПО-1 и ПО-2 соответственно, также с развязкой в одном уровне; на третьем этапе – с 14-го года эксплуатации до конца расчетного периода необходимо довести число путей в парках ПО-1 и ПО-2 соответственно до 11 и 12 и построить путепроводную развязку.

Вариант развязки подходов с помощью шлюза может быть принят только при отсутствии возможности построить путепроводную развязку из-за застройки необходимой для нее территории или по каким-то другим причинам.

Заключение

Выполненное исследование показало, что при принятых исходных данных развитие станции и подходов к ней в течение 20 лет эксплуатации целесообразно осуществлять в два этапа: на первом с пересечением поездных маршрутов в одном уровне без сооружения шлюза, а на втором – в разных уровнях со строительством путепроводной развязки. Реализация варианта развязки в одном уровне



Рис. 3. Траектория развития станции с подходами в координатах «время–состояние»

с сооружением шлюза оказывается неэффективной, поскольку, если, согласно [15], в конце расчетного периода вычесть остаточную стоимость фондов по вариантам, то и по приведенным затратам вариант с путепроводной развязкой окажется дешевле, чем вариант со шлюзом.

Использование рассмотренного метода обоснования этапности развития станций с учетом развязок подходов позволит повысить обоснованность проектных решений по станциям и узлам.

Библиографический список

1. Правила и технические нормы проектирования станций и узлов на железных дорогах колеи 1520 мм. – М. : Техинформ, 2003. – 168 с.
2. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте. – М. : МПС, 1998. – 105 с.
3. Архангельский Е. В. Использование динамического программирования для определения сроков этапного усиления станций / Е. В. Архангельский // Вопросы совершенствования проектирования и использования железнодорожных и промышленных узлов : Тр. МИИТа. – М., 1976. – Вып. 548. С. 98–100.
4. Булавченко И. Д. Исследование схем и этапности развития участковых и районных сортировочных станций : автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. Д. Булавченко. – Новосибирск : НИИЖТ, 1972. – 20 с.
5. Грунтов П. С. Оптимальная этапность развития сортировочных станций (теория и примеры расчета) : учеб. пособие / П. С. Грунтов, В. Д. Чижонок, Г. В. Козлов. – Гомель : БелИИЖТ, 1982. – 66 с.
6. Ефименко Ю. И. Обоснование этапности развития железнодорожных станций и узлов : дис. ... докт. техн. наук / Ю. И. Ефименко. – СПб. : ПГУПС, 1992. – 394 с.
7. Ефименко Ю. И. Обоснование рациональной этапности развития железнодорожных станций и узлов при наличии ограничений / Ю. И. Ефименко, П. К. Рыбин, М. В. Четчуев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2013. – Вып. 4 (№ 37). – С. 25–30.
8. Инструктивные указания по этапному развитию односторонних сортировочных станций и

планированию потребных для этого капитальных вложений. – М. : Транспорт, 1984. – 86 с.

9. Куклев Д. Н. Обоснование целесообразности сооружения обходов железнодорожных узлов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. Н. Куклев. – СПб. : ПГУПС, 2007. – 24 с.

10. Наяшков Ю. П. Особенности технико-экономических расчетов при многоочередном развитии сортировочных станций / Ю. П. Наяшков // Вопросы технологии проектирования и расчета технических средств железнодорожных и промышленных узлов : Тр. МИИТа. – М., 1973. – Вып. 447. – С. 90–101.

11. Олейникова Л. А. Сферы применения односторонних и двусторонних сортировочных станций при росте и спаде объемов переработки вагонов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л. А. Олейникова. – СПб. : ПГУПС, 2006. – 26 с.

12. Правдин Н. В. Сортировочные станции (теория, практика, прогнозы) : учеб. пособие. Ч. III / Н. В. Правдин, Т. С. Банек, В. Я. Негрей и др. ; под ред. Н. В. Правдина. – Гомель : БелИИЖТ, 1980. – 82 с.

13. Сугоровский А. В. Обоснование этапности развития пассажирских технических станций : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Сугоровский. – СПб. : ПГУПС, 2010. – 16 с.

14. Четчуев М. В. Обоснование этапности развития горловин железнодорожных станций : автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. В. Четчуев. – СПб. : ПГУПС, 2012. – 16 с.

15. Лившиц В. Н. Выбор оптимальных решений в технико-экономических расчетах / В. Н. Лившиц. – М. : Экономика, 1971. – 254 с.

References

1. *Pravila i tekhnicheskiye normy projektirovaniya stantziy i uzlov na zheleznikh dorogakh kolei 1520 mm* [Rules and technical norms of railway stations and junctions design at the railway roads with 1520 mm railway track]. Moscow, Techinform Publ., 2003, 168 p. (In Russian)
2. *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke investitsionnikh proyektov na zheleznodorozhnom transporte* [Study guide on the assessment of railway transport investment projects]. Moscow, MPS Publ., 1998, 105 p. (In Russian)
3. Arkhangelskiy E. V. Ispolzovaniye dinamicheskogo programmirovaniya dlya opredeleniya srokov

etapnogo usileniya stantsii. Voprosi sovershenstvovaniya proektirovaniya i ispolzovaniya zheleznodorozhnykh i promyshlennikh uzlov [Application of dynamic programming in determining of the dates of stations' staging reinforcement. The issues of development and engineering of railway and industrial junctions]. *Trudy MIITa* [Coll. Papers MIIT]. Moscow, 1976, issue 548, pp. 98–100. (In Russian)

4. Bulavchenko I. D. *Issledovaniye skhem i etapnosti razvitiya uchastkovikh i rayonnikh sortirovochnikh stantsii* [The study of charts and staging of district marshalling yards development]. Diss. abstract... Cand. Sci. Novosibirsk, NIIZhT Publ., 1972, 20 p. (In Russian)

5. Gruntov P. S., Chizhonok V. D. & Kozlov G. V. *Optimalnaya etapnost razvitiya sortirovochnikh stantsiy (teoriya i primery rascheta)* [Optimal staging of marshalling yards development (theory and calculation examples)]. Gomel, BelIIZhT Publ., 1982, 66 p. (In Russian)

6. Efimenko Y. I. *Obosnovaniye etapnosti razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov* [The justification of staging of railway stations and junctions development]. Diss... D. Sci. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 1992, 394 p. (In Russian)

7. Efimenko Y. I., Ribin P. K. & Chechuev M. V. *Obosnovaniye ratsionalnoy etapnosti razvitiya zheleznodorozhnykh stantsii i uzlov pri nalichii ogranicheniy* [The justification of rational staging of railway stations and junctions development if there are restrictions]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, issue 4 (37), pp. 25–30. (In Russian)

8. *Instruktivniye ukazaniya po etapnomu razvitiyu odносторонnykh sortirovochnikh stantsiy i planirovaniyu potrebnikh dlya etogo kapitalnykh vlozeniy* [Instructional guidelines on staging development of one-way marshalling yards and planning of the necessary capital investments]. Moscow, Transport Publ., 1984, 86 p. (In Russian)

9. Kuklev D. N. *Obosnovaniye tselesoobraznosti sooruzeniya obkhodov zheleznodorozhnykh uzlov* [The

justification of construction practicability of bypass roads for railway centres]. Diss. abstract... Cand. Sci. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2007, 24 p. (In Russian)

10. Nayashkov Y. P. *Osobennosti tekhniko-ekonomicheskikh raschetov pri mnogoocherednom razvitii sortirovochnikh stantsii. Voprosi tekhnologii proektirovaniya i rascheta tekhnicheskikh sredstv zheleznodorozhnykh i promyshlennikh uzlov* [The peculiarities of techno-economic calculations in regular development of marshalling yards. The issues of construction technologies and calculation of technical facilities of railway and industrial centres]. *Trudy MIITa* [Coll. Papers MIIT]. Moscow, 1973, issue 447, pp. 90–101. (In Russian)

11. Oleynikova L. A. *Sphery primeneiya odносторонnykh i dvustoronnykh sortirovochnikh stantsiy pri roste i spade ob'emov pererabotki vagonov* [Application spheres of one-way and two-way marshalling yards regarding the growth and decline of volume of railcars reprocessing]. Diss. abstract... Cand. Sci. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2006, 26 p. (In Russian)

12. Pravdin N. V., Banek T. S., Negrey V. Y. & at all. *Sortirovochniye stantsii (teoriya, praktika, prognozy)* [Marshalling yards (theory, practice, predictions)]. Pt III. Gomel, BelIIZhT Publ., 1980, 82 p. (In Russian)

13. Sugorovskiy A. V. *Obosnovaniye etapnosti razvitiya passagirskikh tekhnicheskikh stantsiy* [The justification of staging of passenger and technical stations development]. Diss. abstract... Cand. Sci. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2010, 16 p. (In Russian)

14. Chetchuyev M. V. *Obosnovaniye etapnosti razvitiya gorlovykh zheleznodorozhnykh stantsiy* [The justification of staging development of railway constriction]. Diss. abstract... Cand. Sci. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012, 16 p. (In Russian)

15. Lyvshits V. N. *Vybor optimalnykh resheniy v tekhniko-ekonomicheskikh raschetakh* [The selection of optimal solutions in techno-economic calculations]. Moscow, Ekonomika Publ., 1971, 254 p. (In Russian)

ЕФИМЕНКО Юрий Иванович – доктор техн. наук, профессор, kjdstan@pgups.edu.ru; РЫБИН Петр Кириллович – канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, декан факультета, zdsu@pgups.ru; *ФИЛИППОВ Антон Геннадьевич – ассистент, tigropard10@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).



УДК 624.195

А. В. Бенин, А. Н. Коньков, А. В. Романов**РЕЗУЛЬТАТЫ ВИЗУАЛЬНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ УЧАСТКА
ДЕЙСТВУЮЩЕГО БАЙКАЛЬСКОГО ТОННЕЛЯ**

Дата поступления: 07.11.2016

Решение о публикации: 13.03.2017

Цель: Оценка работоспособности сооружения и возможности его дальнейшей безопасной эксплуатации. **Методы:** Описание конструкций обделок Байкальского тоннеля, системы вентиляции тоннеля. Приводится результат визуального обследования с указанием его основных дефектов железобетонной обделки, конструкций западного портала, железнодорожного пути, анализируются причины возникновения дефектов. **Результаты:** Определено, что деструкция бетона обделки вызвана периодическим промерзанием и оттаиванием обделки в зоне порталов, происходящим по нескольким причинам: поршневого действия подвижного состава, недостаточной эффективности тепловентиляции и отсутствием порталных ворот. Выявлено, что состояние осмотренного участка обделки тоннеля находится в ограниченно работоспособном состоянии. По критерию «срок службы в годах» установлен факт просроченного капитального ремонта пути на старогодних материалах. Балластный слой по данным дистанции пути не менялся и не очищался с момента укладки 1983 г., имеет высокую загрязненность. **Практическая значимость:** Рекомендовано повысить эффективность тепловентиляции, установить автоматические порталные ворота, выполнить полную замену балласта.

Ключевые слова: Байкальский тоннель, обделка тоннеля, железнодорожный путь, дефекты пути.

Andrey V. Benyn, Cand. Sci., head of “Professor N.A. Belelyubsky mechanical laboratory” testing laboratory, benin.andrey@mail.ru; ***Aleksander N. Kon'kov**, Cand. Sci., associate professor; ***Andrey V. Romanov**, Cand. Sci., associate professor, andrey.romanov@mail.ru (Petersburg State Transport University)
THE RESULTS OF BAIKAL FUNCTIONING TUNNEL AREA VISUAL SURVEY

Objective: The assessment of construction's functionality and possibilities of its further safe operation. **Methods:** The description of Baikal tunnel lining design, ventilation system. The result of visual survey was presented with the main defects of tunnel's ferroconcrete lining, constructions of the west entrance, railway track, defects origin was analyzed. **Results:** It was detected that concrete destruction of the lining in and around entrances was caused by periodic frost penetration and defrosting of the lining around entrances due to several reasons: piston action of the rolling stock, poor thermo ventilation and the absence of entrance gates. It was disclosed that the examined tunnel's lining area was in a restrictedly functional condition. The case of expired capital repair on used materials was established by “durability in years” criterion. According to the data of permanent way division, the ballast bed was not renewed or cleaned since it was laid in 1983, thus it was heavily fouled. **Practical importance:** It is recommended to increase the effectiveness of thermo ventilation, to install automatic entrance gates, to fulfill the complete ballast replacement.

Keywords: Baikal tunnel, lining, railroad, railway malfunction.

Введение

В ноябре 2015 г. сотрудниками Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I была проведена оценка технического состояния Байкальского тоннеля. Цель работы заключалась в определении работоспособности сооружения и возможности его дальнейшей безопасной эксплуатации.

Байкальский тоннель был построен в 1984 г. Его длина составляет 6686 м, материалы обделки – бетон, железобетон, набрызгбетон, гидроизоляции обделки нет. В продольном профиле тоннель однокатный с руководящим подъемом 13 ‰ с восточного портала на западный. В плане тоннель размещается на прямой, за исключением участка западного портала, который на длине 639 м идет по кривой радиусом 600 м. Портальные ворота отсутствуют.

Тоннель имеет вспомогательные выработки: вертикальный вентиляционный ствол глубиной 196 м, околоствольные выработки, транспортно-дренажную штольню, расположенную параллельно тоннелю в уровне его подошвы, 21 сбойку между штольней и тоннелем. Ствол не используется по назначению, так как предусмотренная первоначальным проектом вертикальная схема тепловентиляции с размещением калориферных установок в устье ствола, оказалась неэффективной и в 1989 г. была заменена на горизонтальную схе-

му с использованием транспортной штольни и сбоек вблизи порталов [1]. С этого времени ствол не обследовался, техническое состояние его не известно, надстволовое здание, в котором первоначально находились калориферные секции, заброшено [2, 3].

Результаты визуального обследования технического состояния обделки тоннеля

Сначала сотрудниками ПГУПС было проведено визуальное обследование тоннеля. Согласно имеющейся технической документации и опросу сопровождающего технического персонала, обеспечивающего текущее содержание тоннеля, наибольшее количество дефектов сосредоточено в припортальных зонах тоннеля на протяжении 500–700 м как со стороны западного, так и со стороны восточного портала тоннеля.

Основными дефектами осмотренного участка являются разнонаправленные трещины по периметру обделки, локальные зоны деструкции бетона, водопроявления в виде капеза, сырости и наледей на поверхности обделки. Открытых течей на осмотренном участке не обнаружено. Фотографии дефектов приведены на рис. 1–3.

Основное количество дефектов в виде деструкции бетона выявлено на припортальном участке на протяжении 80–100 м от портала.



Рис. 1. Трещина в обделке



Рис. 2. Наледь на поверхности бетона



Рис. 3. Зоны деструкции бетона

На некоторых участках наблюдаются следы выполнения текущих ремонтов (вырубки участков деструктивного бетона с последующей заделкой ремонтными составами).

Вентиляционное оборудование (вентиляторы и калориферы) расположено в сбойках у западного (рис. 4) и восточного порталов. Оно не обеспечивает надлежащего прогрева внутритоннельного воздуха, что способствует обмерзанию обделки и ее морозному разрушению, происходящему особенно интенсивно в зоне порталов.

Деструкция бетона, таким образом, вызвана периодическим промерзанием и оттаиванием обделки в зоне порталов, происходящим по нескольким причинам: поршневого действия подвижного состава (поступление теплого воздуха перед составом при выходе из тоннеля и засасывание холодного воздуха при входе состава в тоннель), недостаточной эффективностью тепловентиляции и отсутствием порталных ворот [4–7].

Результаты визуального обследования технического состояния западного портала

В сопряжении порталной и подпорной стен обнаружена сквозная вертикальная трещина (рис. 5). Деформации и сползания грунта откосов визуально не наблюдаются.



Рис. 4. Вентилятор в сбойке у западного портала

Состояние железнодорожного пути в существующем тоннеле

Данные по отчетным документам

Железнодорожный путь был уложен в 1983 г. С тех пор в тоннеле не производились ремонтные работы капитального характера.

В настоящее время установленная скорость движения для пассажирских поездов составляет $V_{\text{пасс}} = 60$ км/ч, для грузовых – $V_{\text{гр}} = 50$ км/ч.

Конструкция железнодорожного пути в тоннеле представляет собой звеньевой путь с рельсами Р65 на деревянных шпалах со скреплением ДО. Эпюра шпал составляет 2000 шт./км. Балласт щебеночный, толщиной 40 см под шпалой, что соответствует нормам проектирования, действующим на момент укладки в 1983 г., но противоречит современным нормам [8, 9].

Пропущенный тоннаж на момент обследования составил 577,7 млн т брутто (при нормативном 600 млн т брутто). Норматив выполнения капитального ремонта железнодорожного пути на старогондних материалах по пропущенному тоннажу будет достигнут менее чем через один год. Грузонапряженность – 28,7 млн ткм брутто/км в год.

Для данных скоростей движения и грузонапряженности периодичность выполнения капитального ремонта пути равна 600 млн ткм брутто или один раз в 18 лет [10, 11].



Рис. 5. Вертикальная трещина между порталной стеной и откосом

По второму параметру (срок службы в годах) капитальный ремонт пути на старогондних материалах к настоящему времени просрочен.

Средняя оценка пути – 63 балла, что соответствует состоянию «ХОРОШЕЕ».

Для текущего обслуживания тоннеля предоставляются технологические «окна» продолжительностью 2 ч.

С ноября 2014 г. по ноябрь 2015 г. в тоннеле обнаружены 14 остродефектных рельсов, что является тревожным фактом, так как количество остродефектных рельсов на 1 км пути за период нормативной наработки тоннажа служит вторым основным параметром назначения капитального ремонта пути. Это означает, что рельсовое хозяйство к моменту обследования практически исчерпало свой ресурс и в ближайшее время прогнозируется лавинообразный выход рельсов по дефектности [12].

Таким образом, необходимо проведение капитального ремонта пути на старогондних материалах. Однако для замены рельсошпальной решетки требуется предоставление длительных «окон» продолжительностью 6–8 ч, что является весьма проблематичным, учитывая интенсивное грузовое движение по Байкало-Амурской магистрали.

Данные визуального осмотра

Сотрудниками ПГУПС был произведен визуальный осмотр состояния железнодорожного пути в тоннеле. В районе западного портала в плане путь представляет собой кривую радиусом 700 м. По наружной рельсовой нити наблюдается боковой износ в пределах допуска (рис. 6).

Рельсовые стыки в основном находятся в удовлетворительном состоянии. В части стыков (рис. 7) обнаружено отслоение и выкрашивание металла (дефект 17.1) [13].

Промежуточные рельсовые скрепления ДО также находятся в удовлетворительном состоянии. В некоторых случаях выявлено отжатие костылей (рис. 8).

Шпальное хозяйство в удовлетворительном состоянии. Небольшое количество шпал имеет дефекты в виде продольных трещин, смятия и т. п. (рис. 9).

Балластный слой по данным дистанции пути не менялся и не очищался с момента укладки в 1983 г. Он очень загрязнен, что видно при визуальном осмотре (рис. 10, 11): наличие мелких фракций в верхней части. В нижней части со слов обслуживающего персонала наблюдаются высокая загрязненность и



Рис. 6. Боковой износ головки наружного рельса в кривом участке пути



Рис. 7. Дефектный стык с отслоением и выкрашиванием металла



Рис. 8. Отжатие костылей



Рис. 9. Дефектные шпалы



Рис. 10. Мелкие фракции на поверхности балласта в шпальном ящике



Рис. 11. Плечо балластной призмы с добавлением нового щебня

омоноличивание балласта, для которого необходима замена или очистка. Полная замена балласта была бы наиболее предпочтительным вариантом в данном случае, однако это мероприятие требует полного закрытия тоннеля на длительный срок, что невозможно. Очистка балласта менее критична, с точки зрения организации движения, но нужна дополнительная проработка.

Заключение

Результаты обследования позволили прийти к следующим выводам:

1. Состояние осмотренного участка тоннеля находится в ограниченно работоспособном состоянии (ограниченно работоспособное состояние всего тоннеля отражено в протоколе технического совещания от 3 ноября 2015 г.). Согласно [14], ограниченно работоспособное состояние характеризуется некоторым снижением несущей способности обделки, однако имеющиеся дефекты не приводят к потере несущей способности обделки и тоннель может эксплуатироваться без ограничений при условии организации постоянного контроля его технического состояния.

2. Для поддержания технического состояния тоннеля рекомендуется повысить эффективность тепловентиляции и установить автоматические порталные ворота.

3. Железнодорожный путь в тоннеле находится в работоспособном состоянии. Для устранения отдельных дефектных элементов конструкции нужна их одиночная замена.

4. По критерию «срок службы в годах» установлен факт просроченного капитального ремонта пути на старогондних материалах.

5. Для проведения замены рельсошпальной решетки следует увеличить предоставление длительных окон продолжительностью 6–8 ч. Возможность предоставления таких «окон» на данном участке может быть определена ОАО «РЖД» с переключением части грузопотока на Транссибирскую магистраль.

6. Вопрос о возможности глубокой очистки щебня в тоннеле имеет определенные сложности и требует дополнительной проработки. Вероятно, нужна полная замена балласта [15].

Библиографический список

1. Гришаев В. И. Вентиляция тоннелей на железных дорогах / В. И. Гришаев. – М. : Трансжелдориздат, 1967. – 123 с.
2. Лысюк В. С. Прочный и надежный железнодорожный путь / В. С. Лысюк, В. Н. Сазонов, Л. В. Башкатова. – М. : МКЦ «Академкнига», 2003. – 589 с.
3. Носарев А. В. Мосты и тоннели на Великом Сибирском пути (включая БАМ) : Инженерно-ис-

торический очерк / А. В. Носарев. – М. : МИИТ, 2002. – 288 с.

4. Храпов В. Г. Тоннели и метрополитены : учебник для вузов / В. Г. Храпов, Е. А. Демешко, С. Н. Наумов, А. Н. Пирожкова, Н. Г. Туренский. – М. : Транспорт, 1989. – 383 с.

5. Содержание и реконструкция тоннелей : учебник / под ред. Ю. С. Фролова. – М. : ФГОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2011. – 300 с.

6. Зайнагабдинов Д. А. Особенности взаимодействия железнодорожных тоннелей с грунтовыми неоднородными массивами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / Д. А. Зайнагабдинов. – М. : МИИТ, 2016. – 24 с.

7. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализир. ред. СНиП 32-04-97 : офиц. изд. Свод правил СП 119.13330.2012. – М. : ФАУ «ФЦС», 2012. – 127 с.

8. Железнодорожный путь : Свод правил СП 238.1326000.2015. – Утв. Приказом Минтранса России № 209 от 06.07.2015 г. – М., 2015. – 71 с. – URL : <http://www.standards.ru/document/6108217.aspx> (дата обращения: 07.11.2016).

9. Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализир. ред. СНиП 32-01-95 : офиц. изд. Свод правил СП 119.13330.2012. – М. : ФАУ «ФЦС», 2012. – 52 с.

10. Технические условия на работу по ремонту и планово-предупредительной выправке пути. ЦПТ-53. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 182 с.

11. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 75 п от 18.01.2013 г. – URL : <http://lawru.info/dok/2013/01/18/n157620.htm> (дата обращения 07.11.2016).

12. Лысюк В. С. Прочный и надежный железнодорожный путь / В. С. Лысюк, В. Н. Сазонов, Л. В. Башкатова. – М. : МКЦ «Академкнига», 2003. – 589 с.

13. Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов». – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2499 п от 23.10.2014 г. – URL : <http://lawru.info/dok/2014/01/18/n157620.htm> (дата обращения: 07.11.2016).

14. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений : Свод правил по проектированию и строительству СП 13-102-2003. – М. : ФГУП ЦПП, 2003. – 32 с.

15. Чернецкая И. С. Организация и технология выполнения капитального ремонта с укладкой бесстыкового пути в тоннеле на горно-перевальном участке ВСЖД / П. С. Чернецкая, С. Т. Плескач // Проблемы проектирования и строительства железных дорог : межвуз. сб. науч. трудов. – Хабаровск : ДВГУПС, 2011. – С. 172–178.

References

1. Gryshayev V. I. *Ventylyatsiya tonneley na zheleznykh dorogakh* [Tunnel ventilation on railroads]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1967, 123 p. (In Russian)

2. Lysyuk V. S., Sazonov V. N. & Bashkatova L. V. *Prochniy i nadezhny zheleznodorozhny put* [Durable and reliable railway]. Moscow, IKC "Akademknyga" Publ., 2003, 589 p. (In Russian)

3. Nosarev A. V. *Mosty i tonnely na Velykom Sybyrskom puty (vklyuchaya BAM)* [Bridges and tunnels of the Great Siberian Way (including the Baikal-Amur Mainline)]. Historical engineering sketch. Moscow, MIIT Publ., 2002, 288 p. (In Russian)

4. Khrapov V. G., Demeshko Y. A., Naumov S. N., Pyrozhkova A. N. & Turenky N. G. *Tonnely i metropolityny* [Tunnels and metropolitan railways]. Moscow, Transport Publ., 1989, 383 p. (In Russian)

5. *Soderzhaniye i rekonstruktsiya tonneley* [Maintenance and reconstruction of tunnels]. Ed. by Y. S. Frolov. Moscow, FBGOU "Learning and teaching educational centre of railway transport" Publ., 2011, 300 p. (In Russian)

6. Zainagabdinov D. A. *Osobennosti vzaimodeystviya zheleznodorozhnykh tonneley s gruntovymy neodnorodnymi massyvami* [The peculiarities of railway tunnels and ground heterogeneous massifs interaction]. Diss. abstract... Cand. Sci.: 05.23.11. Moscow, MIIT Publ., 2016, 24 p. (In Russian)

7. *Tonnely zheleznodorozhniye i avtodorozhnye* [Railway and highway tunnels]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 32-04-97. Ofitsialnoye izdaniye. Svod pravyl SP 119.13330.2012 Revised SNiP edition 32-04-97. Official publication. Set of rules SP

119.13330.2012. Moscow, FAU “Federal centre of normalization and technical evaluation of building accordance” Publ., 2012, 127 p. (In Russian)

8. *Zheleznodorozhniy put [Railway track]*. Set of rules SP 238.1326000.2015. Approved by order of Mintrans of Russia N 209 from 06.07.2015. Moscow, 2015, 71 p. Available at: <http://www.standards.ru/document/6108217.aspx> (accessed: 07.11.2016). (In Russian)

9. *Zhlezniye dorogi koley 1520 mm [1520 mm track railroads]*. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 32-01-95. Revised edition of SNiP 32-01-95. Official publication. Set of rules SP 119.13330.2012. Moscow, FAU “Federal centre of normalization and technical evaluation of building accordance” Publ., 2012, 52 p. (In Russian)

10. *Tekhnicheskiye usloviya na raboty po remontu i planovo-predupredytelnoy vypravke puty [Technical terms for repair jobs and planned-prophylactic track surfacing. CPT-53]*. Moscow, IKC “Akademkniga” Publ., 2004, 182 p. (In Russian)

11. *Tekhnicheskiye usloviya na raboty po rekonstruktsii (modernizatsii) i remonty zheleznodorozhnogo puty [Technical terms for the work on the reconstruction (modernization) and maintenance of the railway track]*. Approved by JSC “Russian Railways” order N 75 p from 18.01.2013. Available at: <http://lawru.info/dok/2013/01/18/n157620.htm> (accessed: 07.11.2016). (In Russian)

12. Lysyuk V. S., Sazonov V. N. & Bashkato-va L. V. *Prochniy i nadezhniy zheleznodorozhniy put [Durable and reliable railway]*. Moscow, IKC “Akademkniga” Publ., 2003, 589 p. (In Russian)

13. *Instruktsiya “Defekty relsov. Klassifikatsiya, katalog i parametry defektnykh i ostrodefektnykh relsov” [Instruction “Railing malfunction. Classification, catalogue and the parameters of defective and highly defective rails”]*. Approved by JSC “Russian Railways” order no. 2499 p from 23.10.2014. (In Russian)

14. *Pravyla obsledovaniya nesushnykh stroitelnykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy [Regulations for load-carrying building structures and installations inspection]*. Svod pravyl po proyektirovaniyu i stroitelstvu SP 13-102-2003 [Set of rules for planning and building SP 13-102-2003]. Moscow, Federal State Unitary Enterprise Design products in building center Publ., 2003, 32 p. (In Russian)

15. Chernetskaya I. S. & Pleskach S. T. *Organizatsiya i tekhnologiya vypolneniya kapytalnogo remonta s ukladkoy besstykovogo puty v tonnele na gorno-perevalnom uchastke VSZhD [Organization and technology of capital repairing with tracking of long-welded rails in the tunnel running under the main mountain range of East-Siberian railway]. Problemy proyektirovaniya i stroitelstva zheleznykh dorog [The issues of planning and building of railroads. Interuniversity Coll. Papers]*. Khabarovsk, DvGUPS Publ., 2011, pp. 172–178. (In Russian)

БЕНИН Андрей Владимирович – канд. техн. наук, заведующий ИЛ «Механическая лаборатория им. проф. Н. А. Белелюбского», benin.andrey@mail.ru; *КОНЬКОВ Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент; *РОМАНОВ Андрей Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, andrey.romanov@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.46

Е. П. Дудкин, Н. Н. Султанов**ОБОСНОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ТРАМВАЙНЫХ ПУТЕЙ**

Дата поступления: 04.05.2016

Решение о публикации: 13.03.2017

Цель: Рассмотрение конструкций трамвайных путей после обзора таких конструкций, используемых за рубежом. На основании анализа применяемых за рубежом конструкций трамвайных путей предложены конструкции для Российской Федерации. Общая мировая тенденция создания современных конструкций направлена на обязательное применение упругих рельсовых вкладышей и внедрение бесшпальных (плитных или монолитных) оснований пути, стоимость строительства которых, как правило, в 1,5–2,5 раза больше, чем шпальных. **Методы:** Это требует проведения технико-экономического обоснования таких конструкций по методике, учитывающей особенности эксплуатации трамвайных путей. Выполненные по ней расчеты позволили обосновать сферы применения различных конструкций. **Результаты:** Современные конструкции трамвайных путей отличаются лучшими экологическими показателями за счет использования упругих вкладышей. Однако это существенно изменяет расчетные схемы по определению прочности несущей плиты. С целью обоснования расчетных схем выполнен теоретический анализ возможных вариантов передачи нагрузки от колеса трамвая через рельс и подошвенный вкладыш на бетонную поверхность, а также рассмотрены методы расчета несущей плиты на прочность. **Практическая значимость:** Выполненные исследования показали, что бетонное основание трамвайного пути следует рассчитывать как плиту фундамента, с введением дополнительных коэффициентов, учитывающих количество циклов нагружения.

Ключевые слова: Современные конструкции трамвайных путей, методика технико-экономического обоснования, расчетная схема и методика расчета бесшпальных конструкций пути.

Evgeniy P. Dudkyn, D. Sci., professor, kpgt@pgups.edu; ***Naryman N. Sultanov**, Cand. Sci., 79046117746@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) JUSTIFICATION OF MODERN STREET RAILWAY CONSTRUCTIONS

Objective: To consider street railway constructions after examining similar constructions used abroad. The constructions for the Russian Federation street railway were suggested on the basis of the analysis of street railway constructions applied abroad. Common world trend of modern constructions production is aimed at compulsory application of elastic rail insert and implementation of railway roadbeds (slabby or monolithic) without crossties, the construction cost of which is half as much again or twice and a half times higher than those with crossties. **Methods:** The constructions in question require techno-economic justification method allowing for the maintenance characteristics of street railway. The calculations performed by means of this method made it possible to establish the spheres of application for different constructions. **Results:** Modern street railway constructions are distinguished by better ecological characteristics owing to the application of elastic insert. However, the latter brings significant changes to design diagrams on bearing capacity of a load-bearing slab. In order to justify the design diagrams, theoretical analysis on possible variants of load transfer from a tram wheel through a rail and a sole insert to concrete surface was carried out, as well as the design methods of a load-bearing slab bearing capacity were considered. **Practical importance:** The fulfilled research showed that a concrete base of a tram road

should be calculated as a foundation plate, including extra factors, allowing for the number of fatigue cycles.

Keywords: Modern street railway constructions, the feasibility report method, design model and design procedure of track line constructions without crossties.

Введение

Трамвай имеет значительные преимущества перед другими видами городского транспорта: наилучшее сочетание экологических показателей, комфорта и скорости делают его одним из наиболее перспективных городских транспортных средств. Анализ развития транспортных систем в городах Российской Федерации и некоторых зарубежных стран свидетельствует о возрождении городского рельсового транспорта. Однако на многих отечественных трамвайных линиях преобладает традиционная рельсошпальная конструкция пути, хотя в большинстве стран предпочтение отдается бесшпальным конструкциям с применением шумо- и вибропоглощающих систем, способных подстраиваться под ландшафтный дизайн района строительства (рис. 1) [1–4].

Методика экономического обоснования

Как показывают исследования, строительство 1 км трамвайной линии на бесшпальном основании может быть в 1,5–2,5 раза дороже,

чем на традиционном шпальном основании, но сроки службы этих конструкций, эксплуатационные расходы и экологические показатели также значительно различаются [1, 3–9]. В Российской Федерации нормативная база по трамвайным путям предложена только для шпальных технологий, что приводит к значительному удорожанию проектов при разработке нетиповой рабочей документации при строительстве путей с бесшпальной конструкцией, кроме этого, отсутствует методика расчета прочностных характеристик таких конструкций. Таким образом, при обосновании конструкций трамвайных путей для условий Российской Федерации необходимо было решить ряд задач. В первую очередь нужно обосновать перспективность использования бесшпальных конструкций трамвайных путей с экономической точки зрения, для чего была разработана методика, позволяющая учесть их конструктивные, строительные и эксплуатационные характеристики [10].

По данной методике рассчитывалась стоимость жизненного цикла различных конструкций трамвайного пути с учетом эксплуатационных затрат, стоимости строительства, ре-

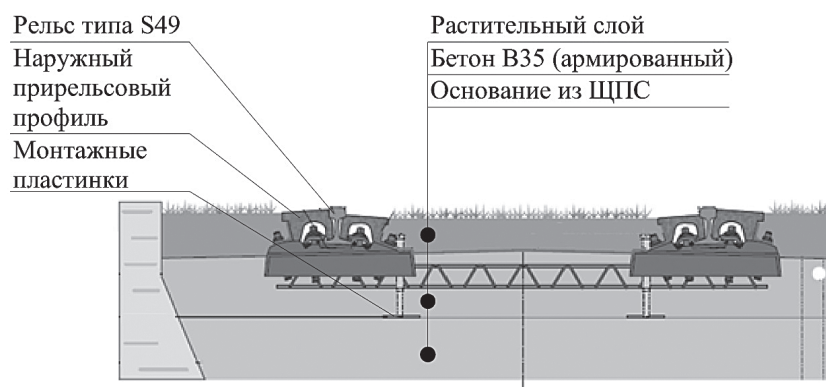


Рис. 1. Берлинская конструкция трамвайного пути для обособленного полотна

монта и продолжительности межремонтных циклов. На основании этих расчетов построены графики стоимости жизненного цикла всех анализируемых конструкций (рис. 2).

Анализ полученных результатов показал, что использование трамвайных путей на бесшпальном основании, несмотря на большую стоимость строительства, приводит к существенной экономии суммарных денежных средств за весь жизненный цикл. Определение стоимости жизненного цикла позволяет также обосновать применение конструкции трамвайного пути в зависимости от планируемого срока эксплуатации. При строительстве и ремонте постоянных трамвайных линий наиболее перспективны конструкции трамвайных путей на монолитном основании, а при устройстве временных линий, в ряде случаев, экономически обосновано использование рельсошпальных конструкций [11].

Анализ формы прогиба рельса

При разработке конструкций трамвайных путей ключевой вопрос – обеспечение безопасности движения, т. е. необходимых прочностных характеристик основания, а также сохранности требуемых геометрических параметров рельсовой колеи, что, в свою очередь, приводит к необходимости обоснования как расчетной схемы, так и методики расчета прочностных характеристик трамвайного пути.

Если для конструкции на шпальном основании допустимо применение существующей методики расчета железнодорожного пути [3, 7, 12], то для бесшпальных конструкций таких методик не существует. Поэтому при расчете на прочность несущей плиты трамвайного пути необходимо было решить такие задачи:

1) определить схему передачи нагрузки от колеса трамвая через рельс на поверхность

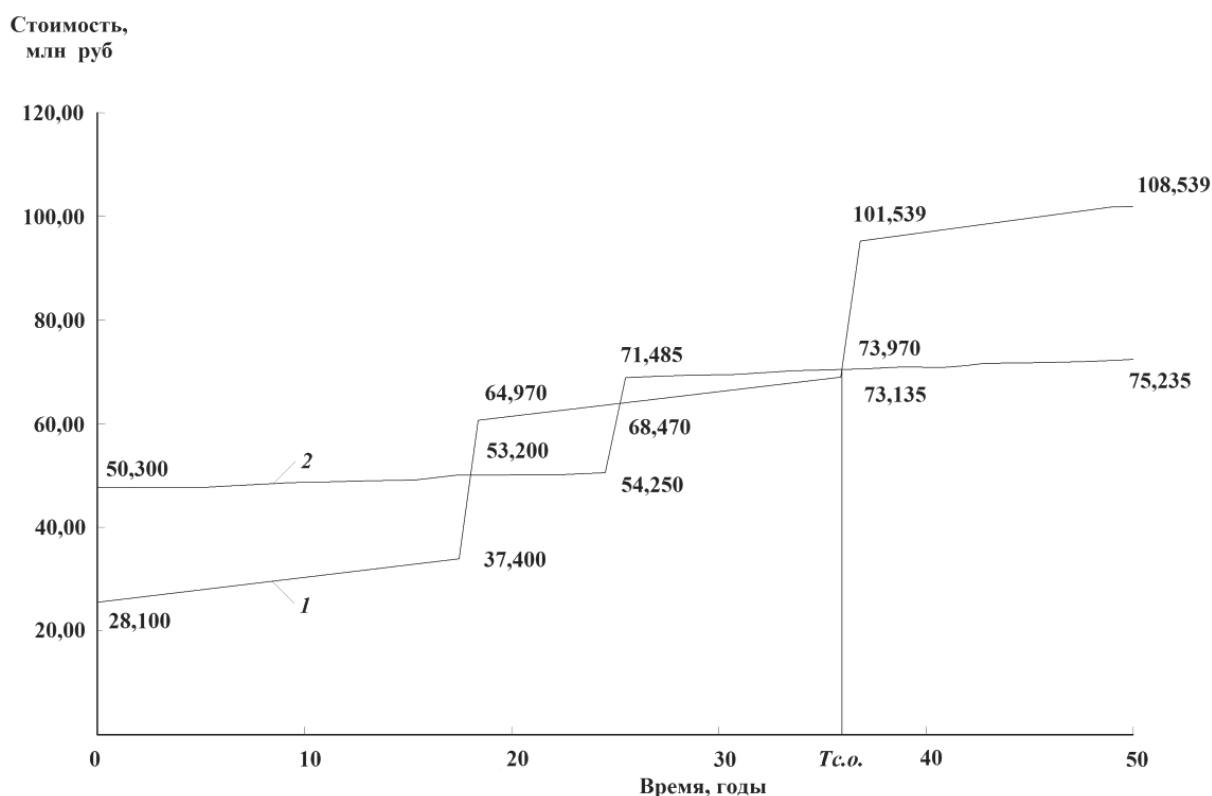


Рис. 2. Стоимость жизненного цикла конструкций трамвайных путей на обособленном полотне: 1 – на деревянных шпалах, с железнодорожными рельсами Р65, с покрытием железобетонными плитами, основание усилено тощим бетоном; 2 – на монолитном железобетонном основании с рельсами Ri60, с двухслойным армированием

несущей плиты при применении подошвенных вкладышей (рис. 3);

2) обосновать методику расчета возникающих в плите усилий и ее несущей способности.

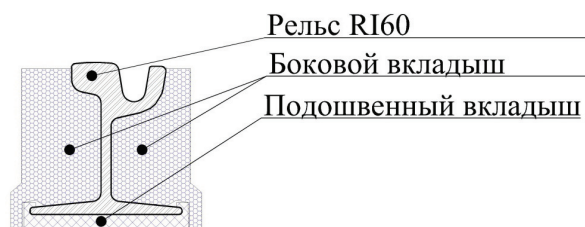


Рис. 3. Схема установки прирельсовых вкладышей

Рассматривая рельс как бесконечно длинную балку, нагруженную парой сил, прогиб рельса можно описать следующим дифференциальным уравнением [2, 12–14]:

$$y^{IV}(x) + 4\beta^4 y(x) = q(x) / EI_z. \quad (1)$$

Решив уравнение (1), определение прогиба рельса в итоге будет проводиться по формуле

$$(x_n) = \sum_{j=1}^N \frac{P_j}{\beta^3 EI_z} e^{(-\beta|x_n - x_j|)} \times \\ \times (\cos(-\beta|x_n - x_j|) + \sin(-\beta|x_n - x_j|)), \quad (2)$$

где P – вертикальная нагрузка от колеса трамвая (кН); x_n – координата приложения нагрузки (м); x_j – координата рассматриваемого сечения (м); j – номер начального участка, на которые разбивается рельс при расчете его как балки на упругом основании; N – общее количество участков; β – коэффициент относительной жесткости основания (1/м):

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI_z}};$$

E – модуль упругости рельсовой стали (МПа); I_z – момент инерции рельса (м⁴); k – упругий параметр основания, вычисляемый по формуле

$$k = k_1 \cdot b;$$

k_1 – коэффициент постели подошвенного вкладыша; b – ширина подошвы рельса.

Задав расчетную схему и решая уравнение (2) методом начальных параметров, получим зависимости прогибов рельса на подошвенном профиле от осевой нагрузки и коэффициента постели этого профиля [2, 12, 13]. Такие зависимости для трамвая с осевой нагрузкой 8,5 т/ось при различных значениях коэффициента постели подошвенного профиля (С1) показаны на рис. 4.

Для наиболее полного анализа формы прогиба рельса дополнительно были введены параметры Δ_{abc} (мм) и $\Delta_{отн}$ (%), вычисляемые по формулам

$$\Delta_{abc} = h_k - h_c,$$

$$\Delta_{отн} = \frac{h_k - h_c}{h_k} \cdot 100,$$

где h_k – прогиб рельса под первой осью трамвайной тележки; h_c – прогиб рельса посередине между осями колесных пар трамвайной тележки.

Анализ полученных нами зависимостей (рис. 5–7) показал, что схема передачи нагрузки зависит от коэффициента постели подошвенного профиля и не зависит от осевой нагрузки трамвая, при этом теоретически возможны два случая передачи нагрузки от трамвайной тележки на бетонную поверхность.

Расчет на прочность несущей плиты трамвайного пути

На следующем этапе определялись возникающие в плите трамвайного пути усилия и ее несущая способность [2, 12–14]. Расчет плиты проводился по трем возможным методикам, плита рассматривалась как

- дорожная одежда жесткого типа;
- мостовая конструкция;
- плита фундамента [4, 15, 16].

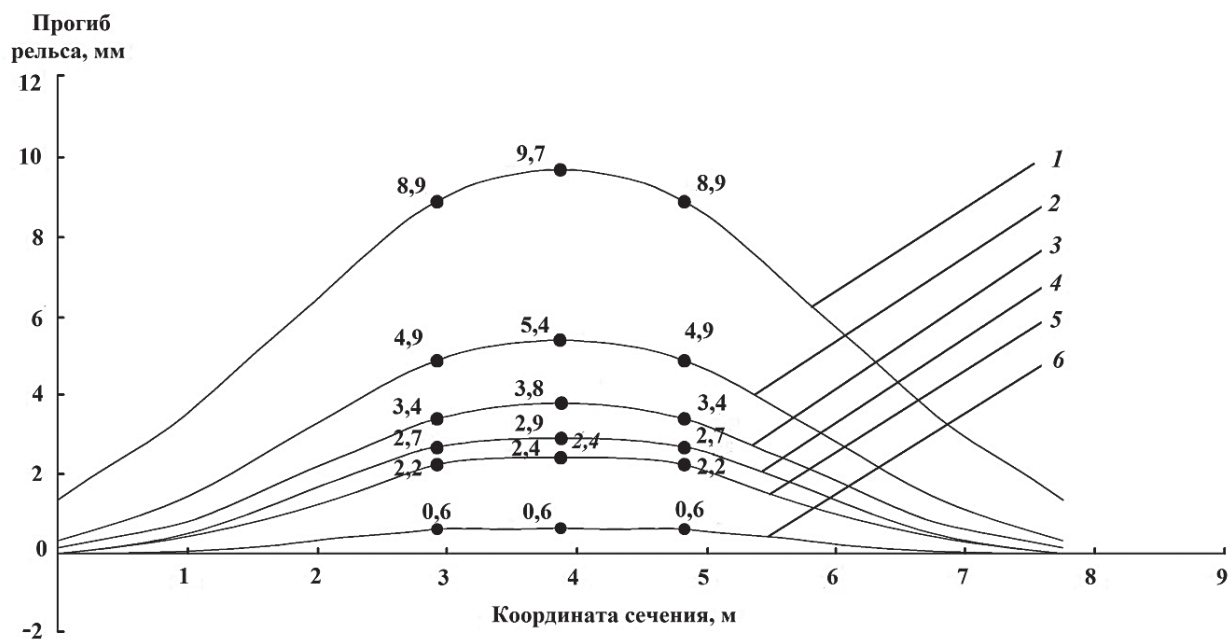


Рис. 4. Прогиб рельса при осевой нагрузке 8,5 т/ось и значениях C_1 (МПа/м):
1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 40, 5 – 50, 6 – 200

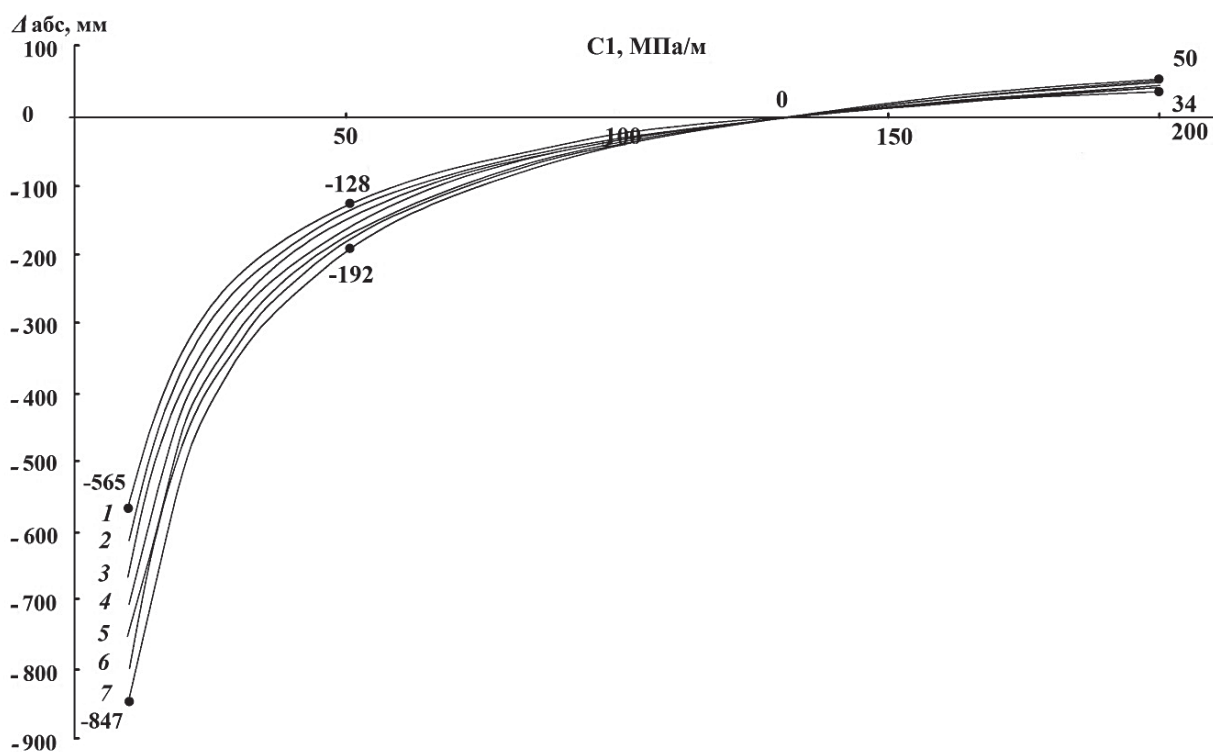


Рис. 5. Зависимость $\Delta_{абс}$ (мм·10⁻³) от коэффициента постели C_1 (МПа/м) подошвенного вкладыша для различных осевых нагрузок (т/ось):
1 – 6,0, 2 – 6,5, 3 – 7,0, 4 – 7,5, 5 – 8,0, 6 – 8,5, 7 – 9,0

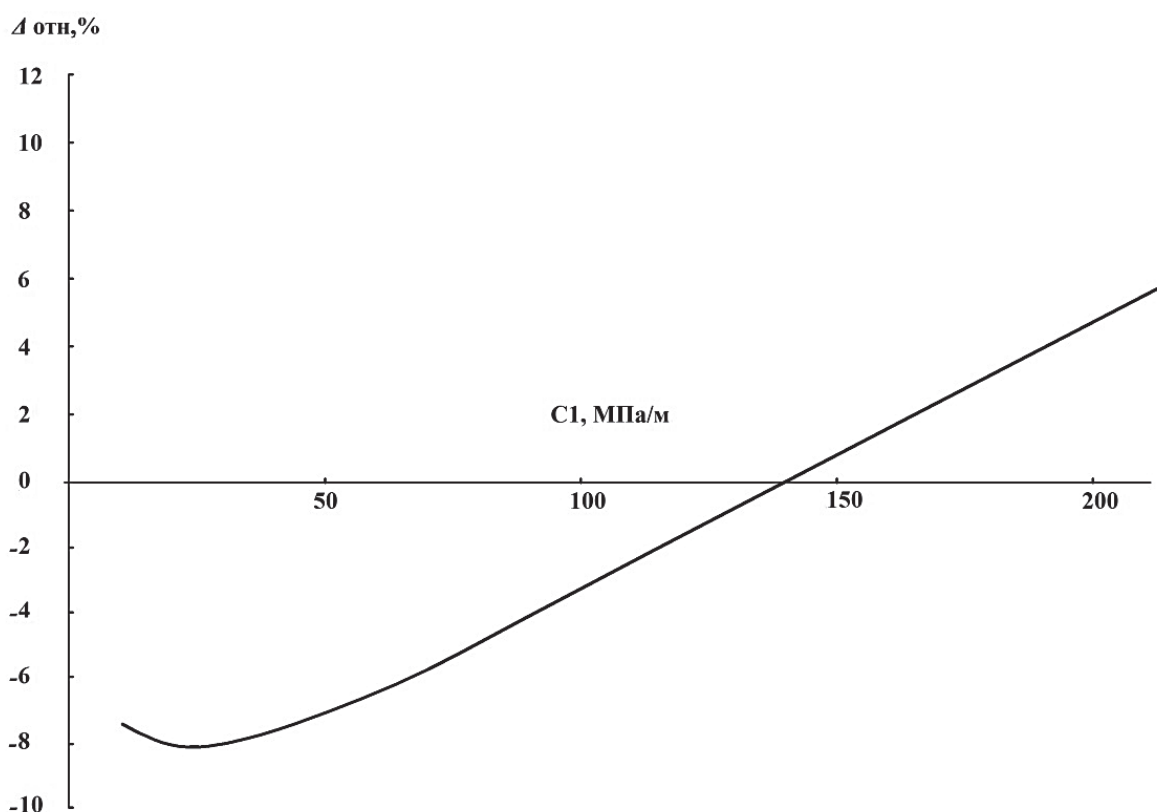


Рис. 6. Зависимость $\Delta_{отн}$ (%) от коэффициента постели подошвенного вкладыша $C1$ (МПа/м)

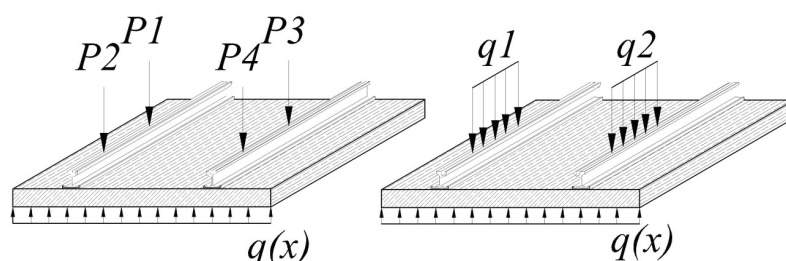


Рис. 7. Схема передачи нагрузки на несущее бетонное основание при коэффициенте постели подошвенного вкладыша:
слева – более 130 МПа/м; справа – от 10 до 130 МПа/м

Анализ этих расчетов показал, что наибольшая сходимость теоретических и экспериментальных данных получена при расчете бетонного основания как плиты фундамента [4, 16]. При этом данная методика позволяет выполнить расчет возникающих усилий и несущую способность плиты с учетом циклического характера приложения нагрузки, планируемого срока ее эксплуатации и различном

коэффициенте постели подплитного основания. Методика дает возможность провести расчеты на прочность и железобетонных плит, и плит из фибробетона. Полученные результаты достаточно полно отображают напряженное состояние несущей плиты (рис. 8).

При этом для учета циклического характера приложения нагрузки при определении несущей способности плиты вводится допол-

29.4
Мозаика напряжений по M_x
Единицы измерения - (кН*м)/м

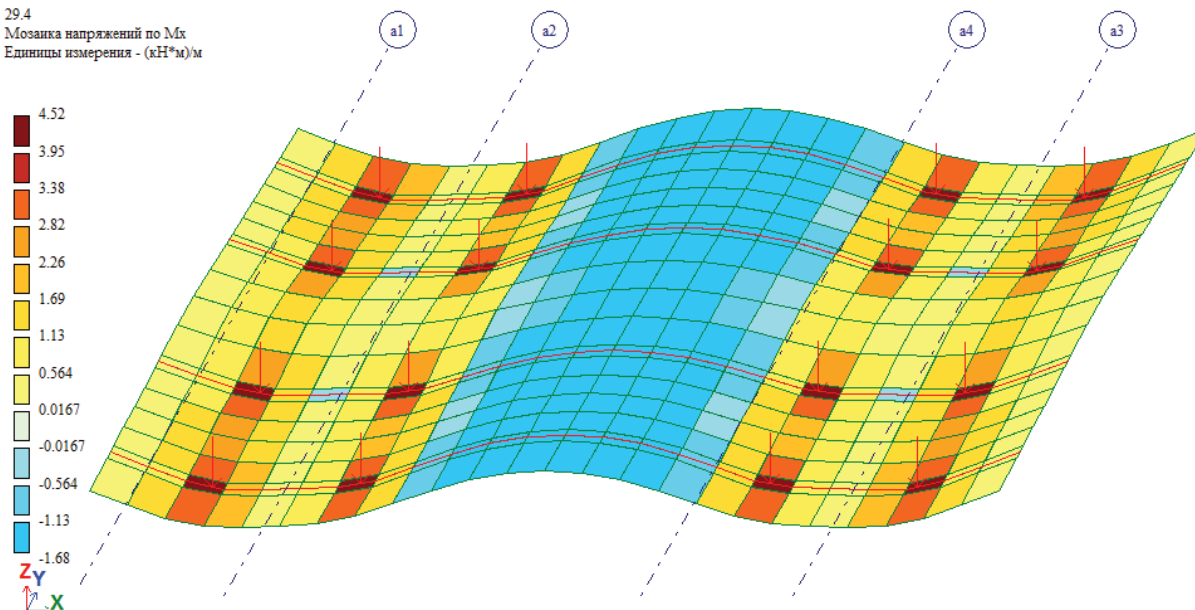


Рис. 8. Мозаика напряжений по изгибающему моменту M_x при осевой нагрузке 6 т/ось и коэффициенте постели подплитного основания $C1 = 50$ МПа/м

нительный коэффициент. Для плиты из фибробетона расчетная формула имеет вид

$$R_{bt,\phi} = \sigma_{\text{ри, ф}} \cdot k_y \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4,$$

где $R_{bt,\phi}$ – расчетная прочность бетона на растяжение при изгибе; k_y – коэффициент усталости бетона при циклической нагрузке:

$$k_y = 1,08 \cdot (\sum N_p)^{-0,063},$$

$\sum N_p$ – суммарное число приложения приведенной нагрузки за расчетный срок службы; k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты условия работы бетона, учитывающие соответственно длительность действия нагрузки, высоту слоя бетонирования, попеременное замораживание и оттаивание бетона, характер разрушения бетонных конструкций; $\sigma_{\text{ри, ф}}$ – нормативная прочность фибробетона с полимерной фиброй на растяжение при изгибе.

Заключение

При выборе и обосновании современных конструкций трамвайных путей необходи-

мо применение новых методик по технико-экономическому и прочностному расчету, учитывающих особенности эксплуатации трамвайных линий и изменение расчетной схемы при передаче нагрузки от колеса трамвая через рельс с подошвенным вкладышем на плитное основание. Расчет бетонного основания следует выполнять по методике расчета плиты фундамента, с учетом циклического характера приложения нагрузки.

Библиографический список

1. Rail One. RHEDA-2000. Ballastless Track System. Germany, Neumarkt. – 2011. – 20 p.
2. Галлагер Р. Метод конечных элементов / Р. Галлагер. – М. : Мир, 1984. – 428 с.
3. Обервайгер Г. Опыт разработки и эксплуатации безбалластного пути / Г. Обервайгер // Железные дороги мира. – 2005. – № 1. – С. 47–49.
4. Хасманн Х. Путь на плитном основании / Х. Хасманн // Железные дороги мира. – 2006. – № 4. – С. 14–16.
5. Дудкин Е. П. Городской рельсовый транспорт : инновационные конструкции трамвайного пути на выделенном полотне / Е. П. Дудкин, Ю. Г. Пара-

скевопуло, Н. Н. Султанов, Г. Ю. Параскевопуло // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 4 (47). – С. 51–53.

6. Технически обоснованные нормы времени на работу по текущему содержанию пути. – Изд. 7-е, откор. и доп. – М. : Нормативно-технологический отдел по инженерным сооружениям Центра обследования и диагностики инженерных сооружений – филиала открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (Центр ИССО ОАО «РЖД»). – 2009. – С. 8–605.

7. Дудкин Е. П. Использование фибробетона в конструкции трамвайных путей / Е. П. Дудкин, Ю. Г. Параскевопуло, Н. Н. Султанов // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 3–4 (40–41). – С. 77–79.

8. Коссой Ю. М. Экономика городского электро-транспорта / Ю. М. Коссой. – Нижний Новгород : Литера, 1997. – 228 с.

9. Вонфельдан Р. Новые путевые структуры / Р. Вонфельдан // Железные дороги мира. – 2006. – № 9. – С. 72–73.

10. Дудкин Е. П. Методика технико-экономического обоснования выбора конструкции трамвайного пути / Е. П. Дудкин, С. В. Коланьков, Н. Н. Султанов // Транспорт Российской Федерации. – 2016. – № 2 (47). – С. 15–18.

11. Яковлева Т. Г. Железнодорожный путь / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов, Н. Н. Путря, М. П. Смирнов. – М. : Транспорт, 1999. – 260 с.

12. Голованов А. П. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций / А. П. Голованов, О. Н. Тюленева, А. Ф. Шигабутдинов. – М. : Физматлит, 2006. – 392 с.

13. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. – М. : Стройиздат, 1982. – 448 с.

14. Беляев Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М. : Физматгиз, 1965. – 846 с.

15. Клепиков С. Н. Расчет конструкций на упругом основании / С. Н. Клепиков. – Киев : Будевильник, 1967. – 183 с.

16. Зурнаджи В. А. Основания, фундаменты и механика грунтов / В. А. Зурнаджи, В. В. Николаев. – М. : Высшая школа, 1967. – № 4. – С. 236–286.

References

1. *Rail One. RHEDA-2000 Ballastless Track System*. Germany, Neumarkt, 2011, 20 p.

2. Gallager R. *Metod konechnykh elementov* [Finite element analysis]. Moscow, Mir Publ., 1984, 428 p. (In Russian)

3. Obervaiger G. Opyt razborky i ekspluatatsii bezballastnogo puty [Development and operation experience of ballastless track]. *World railroads*, 2005, no. 1, pp. 47–49. (In Russian)

4. Khasmann Kh. Put na plytnom osnovanii [Slab-by roadbed track]. *World railroads*, 2006, no. 4, pp. 14–16. (In Russian)

5. Dudkyn Y. P., Paraskevopulo Y. G., Sultanov N. N. & Paraskevopulo G. Y. Gorodskoy relsoviy transport: innovatsionniye konstruksii tramvainogo puty na vydelennom polotne [Street railway transport]. *Transport of the Russian Federation*, 2013, no. 4 (47), pp. 51–53. (In Russian)

6. *Normativno-tekhnologicheskiiy otdel po inzhenernym sooruzheniyam Tsentra obsledovaniya i diagnostiky inzhenernykh sooruzheniy – filiala otkrytogo aktsionernogo obshchestva “Rossiyskiye zheleznnye dorogi” (Tsentr ISSO OAO “RzhD”). Tekhnicheskyy obosnovanniye normy vremeny na rabotu po tekushemu sodержaniyu puty* [Technological normative department of engineering structures examination and diagnostics centre – PLC “Russian railways” subdivision (ISSO PLC “RZhD” centre). Technically based standard time for performance considering the current track maintenance]. Issue no. 7, updated. Moscow, 2009, pp. 8–605. (In Russian)

7. Dudkyn Y. P., Paraskevopulo Y. G. & Sultanov N. N. Ispolzovaniye fibrobetona v konstruksii tramvainykh putey [The use of fibrous concrete in street railways construction]. *Transport of the Russian Federation*, no. 3–4 (40–41), 2012, pp. 77–79. (In Russian)

8. Kossoy Y. M. *Ekonomyka gorodskogo elektrottransporta* [The economy of urban electric transport]. Nizhny Novgorod, Litera Publ., 1997, 228 p. (In Russian)

9. Vonfeldan R. Noviye puteviye struktury [New track structures]. *World railroads*, 2006, no. 9, pp. 72–73. (In Russian)

10. Dudkyn Y. P., Kolankov S. V. & Sultanov N. N. *Metodyka tekhniko-ekonomycheskogo obosnovaniya vybora konstruksii tramvainogo puty* [The method of techno-economic justification of street railway construction's choice]. *Transport of the Russian Federation*, 2016, no. 2 (47), pp. 15–18. (In Russian)
11. Yakovleva T. G., Karpushenko N. I., Klynov S. I., Putrya N. N. & Smirnov M. P. *Railway track*. Moscow, Transport Publ., 1999, 407 p. (In Russian)
12. Golovanov A. P., Tyuleneva O. N. & Shygabudinov A. F. *Metod konechnykh elementov v statyke i dynamyke tonkostennykh konstruksiy* [Finite element analysis in statics and dynamics of thin-walled structures]. Moscow, Physmatlit Publ., 2006, 392 p. (In Russian)
13. Bate K. & Wilson Y. *Chyslenniye metody analiza i metod konechnykh elementov* [Numerical methods of analysis and finite element analysis]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 448 p. (In Russian)
14. Belyayev N. M. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow, Physmatgyz Publ., 1965, 846 p. (In Russian)
15. Klepykov S. N. *Raschet konstruksiy na uprugom osnovanii* [The calculations of constructions on elastic foundation]. Kiev, Budevylnik Publ., 1967, 183 p. (In Russian)
16. Zurnadzhly V. A. & Nikolayev V. V. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Roadbeds, bases and soil mechanics]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1967, no. 4, pp. 236–286. (In Russian)

ДУДКИН Евгений Павлович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, krgt@pgups.edu; *СУЛТАНОВ Нариман Надимбекович – канд. техн. наук, программист кафедры, 79046117746@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 658.382

Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов, Е. П. Дудкин**ОЦЕНКА УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ПАССАЖИРОВ ПОЕЗДОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО МОСТОВЫМ
СООРУЖЕНИЯМ НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ
МАГИСТРАЛЯХ**

Дата поступления: 20.10.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Решение исследовательских задач, связанных с проблемами динамического взаимодействия элементов моста и подвижного состава, обусловленных высокими требованиями к искусственным сооружениям на высокоскоростных железнодорожных магистралях. Особое внимание на высокоскоростном железнодорожном транспорте уделяется комфорту пассажиров и обслуживающего персонала высокоскоростных поездов. На высокоскоростных железнодорожных магистралях доля протяженности мостовых сооружений в составе всей трассы значительно больше, чем на обычных железных дорогах, что обуславливает актуальность настоящего исследования, а представленный в статье подход позволяет определить степень и величину неблагоприятного динамического воздействия на пассажиров. **Методы:** Численное моделирование динамических задач пропускания высокоскоростных поездов различных типов по мостовым сооружениям, что позволяет выполнить комплексную оценку параметров инфраструктуры, в частности пролетных строений мостовых сооружений, с точки зрения их влияния на комфортность и безопасность движения пассажиров в поездах на высокоскоростных железнодорожных магистралях. До настоящего времени данный подход не получил должного отражения в отечественных нормативных документах по проектированию высокоскоростных железнодорожных магистралей, хотя именно движение поездов по мостовым сооружениям является одним из определяющих факторов динамического воздействия вибраций на пассажиров. **Результаты:** Проанализированы зависимости величины динамического отклика экипажей высокоскоростного поезда при движении по мостовым сооружениям, а также проведен анализ дозы вибрации, получаемой пассажирами за время следования в пути на высокоскоростной железнодорожной магистрали. **Практическая значимость:** Вертикальные ускорения в экипажах высокоскоростного поезда, полученные в результате численного моделирования, при скорости, соответствующей резонансным скоростям пролетных строений и подвижного состава, позволяет сделать вывод (на примере высокоскоростной магистрали Москва–Казань), что пассажиры и обслуживающий персонал получают дозу вибрации, не представляющую опасность для здоровья, однако, согласно условным критериям, могут испытывать легкое чувство дискомфорта.

Ключевые слова: Мостовые сооружения, высокоскоростное движение, взаимодействие поезда и моста, численное моделирование, виброускорения, резонанс.

***Leonid K. Dyachenko**, assistant lecturer, leonid_dyachenko@mail.ru; **Vladimir N. Smirnov**, D. Sci. (Eng.), professor, head of a chair; **Evgenij P. Dudkin**, D. Sci. (Eng.), professor (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) ASSESSMENT OF THE VIBRATIONS LEVEL WHILE MOVING ON BRIDGES OF HIGH-SPEED RAIL LINES FROM THE VIEWPOINT OF THEIR IMPACT ON TRAIN PASSENGERS

Objective: To study the tasks of the research related to the issues of dynamic interaction of bridge elements and rolling stock due to high demands for artificial structures on the high-speed rail lines.

Special attention is paid to passenger's comfort and maintenance personnel of high-speed trains. The rate of bridge length as part of the entire route on high-speed railway lines is much higher than on normal-gauge railways, which determines the relevance of the study in question. The approach presented in the article makes it possible to estimate the level and size of adverse dynamic effect on passengers. **Methods:** Numerical simulation of dynamical problems of high-speed trains movement, which makes it possible to perform a comprehensive assessment of infrastructure parameters, in particular spans of bridges, from the point of view of their impact on the comfort and safety of passengers in trains on the high-speed railway lines. So far, this approach has not been adequately reflected in domestic design regulations for high-speed railway lines, even though the movement of trains on bridges is one of the determining factors of the dynamic impact of vibrations on passengers. **Results:** The dynamic response of a high-speed train crews when moving on bridges was analyzed of, as well as the analysis of vibration dose received by passengers during the travel time on the high-speed railroad was carried out. **Practical importance:** Vertical accelerations in high-speed train crews, resulting from numerical simulation at a speed corresponding to the spans and rolling stock resonant speed, leads to the conclusion (by way of Moscow–Kazan high-speed highway example) that passengers and maintenance personnel receive the dose of vibration which does not pose any risk to health, however, according to conventional criteria, may experience slight discomfort.

Keywords: Bridge work, high-speed movement, train and bridge interaction, numerical simulation, vibration acceleration, resonance.

Введение

При проектировании искусственных сооружений на высокоскоростных магистралях к конструкциям мостов, путепроводов и эстакад предъявляются повышенные требования к надежности, при этом в отличие от обычных железных дорог особое внимание следует уделять критериям безопасности движения поездов и комфортности пассажиров. В данных условиях приобретают исключительное значение вопросы динамического взаимодействия мостов с подвижным составом как единой системы [1–12].

Постановка задачи

В результате решения динамической задачи взаимодействия системы «мост–поезд» при высоких скоростях движения появляется возможность выполнить анализ вибраций конструкции и подвижного состава при движении по мостовым сооружениям с точки зрения вредного влияния вибраций на организм человека (пассажиров, обслуживающего персо-

нала) для принятия мер по их снижению при проектировании новых или усилении существующих сооружений.

К основным проблемам вибрации, определяющим степень ее воздействия на организм человека, относятся частотный состав, уровни характерных кинематических факторов (виброперемещений, виброскоростей и виброускорений), направление, регулярность (повторяемость) вибрации, длительность воздействия на человека (пассажиров), а также на персонал, обслуживающий высокоскоростной состав [13–15].

В качестве расчетного подвижного состава в настоящем исследовании приняты характеристики высокоскоростного поезда «Сапсан».

Динамические расчеты системы «мост–поезд»

При оценке уровня вибраций, возникающих в экипажах поезда при движении по искусственным сооружениям на высокоскоростных магистралях, в качестве характерного

примера был принят сценарий прохода подвижного состава по железобетонной эстакаде, состоящей из однотипных унифицированных пролетов по схеме $10 \times 34,2$ м.

Данный тип пролетных строений (рис. 1) является основным типом конструкций, принятым при проектировании высокоскоростной магистрали Москва–Казань.

В ходе динамического расчета прохода подвижного состава по железобетонной эстакаде по схеме $10 \times 34,2$ м были получены зависимости вертикальных деформаций середины пролетов от различных высокоскоростных поездов в диапазоне расчетных скоростей движения от 150 до 480 км/ч (рис. 2). На ри-

сунке видно, что при определенных скоростях движения различных типов поездов наблюдаются характерные «пики», соответствующие критическим скоростям движения поездов, сопровождаемые резким увеличением деформаций и усилий в конструкции [3–7, 10–12].

Оценка результатов и анализ уровня вибраций в экипажах высокоскоростного поезда

По способу передачи на человека вибрацию подразделяют на общую, передающуюся

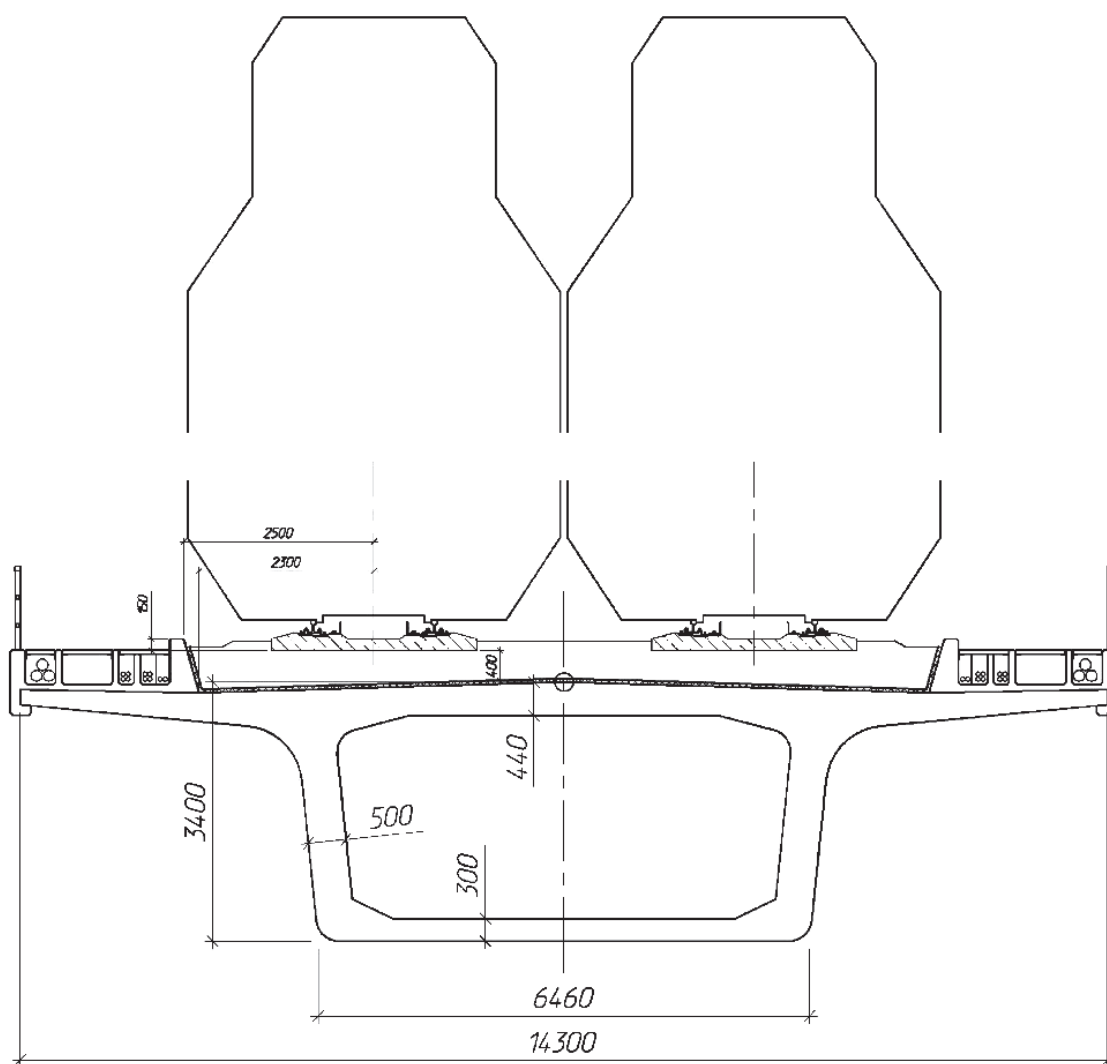


Рис. 1. Поперечное сечение унифицированного железобетонного пролетного строения полной длиной 34,2 м (размеры указаны в миллиметрах)

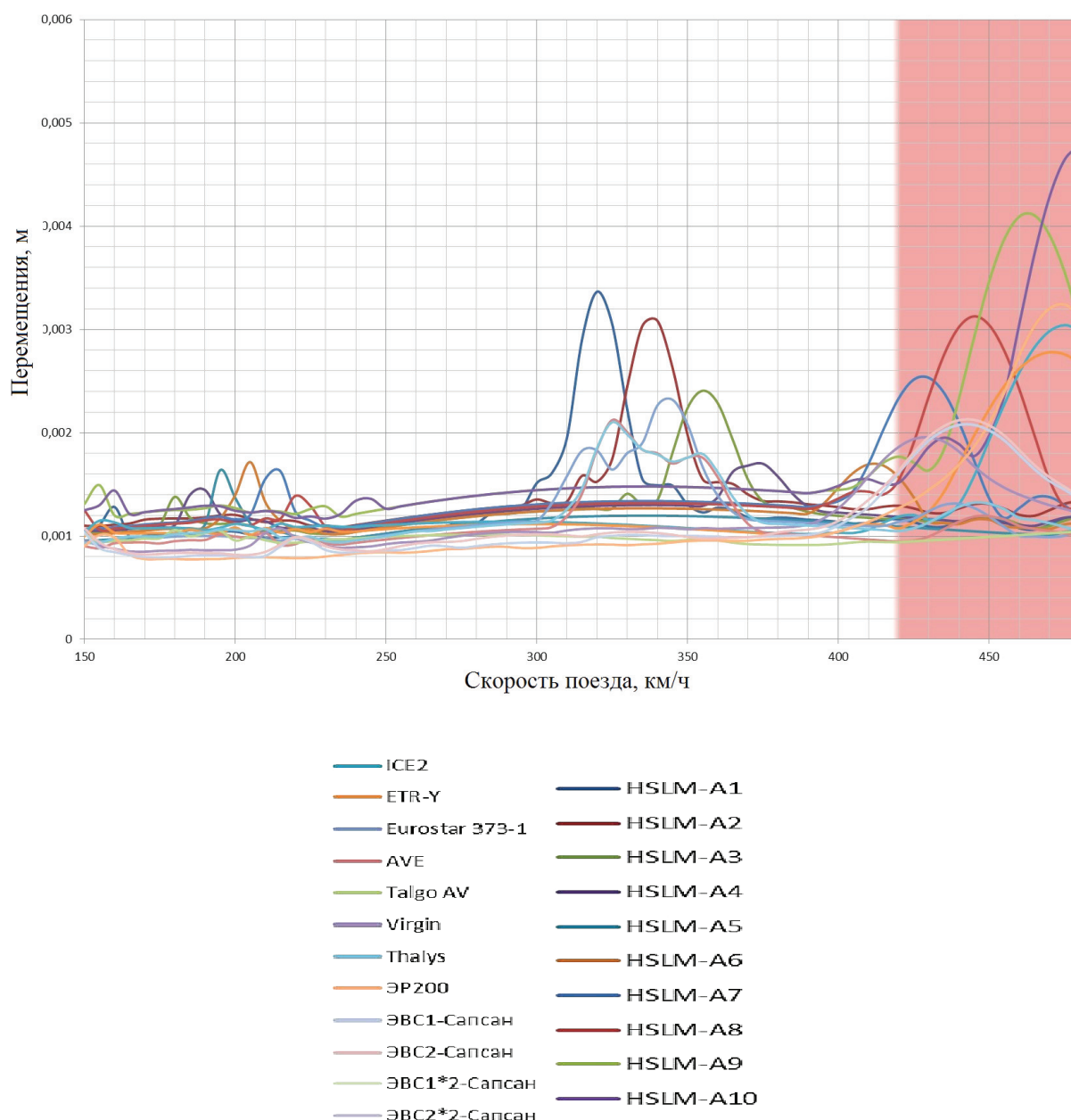


Рис. 2. Изменение максимальных прогибов середины пролета железобетонного пролетного строения полной длиной 34,2 м в зависимости от скорости высокоскоростных поездов

через опорные поверхности (ноги идущего, сидящего или стоящего человека), и локальную, передающуюся через руки человека [13–15].

Необходимо отметить также психологическое действие проявлений вибрации, воспринимаемых органами чувств (зрительных и слуховых). Частотный диапазон чувствительности человеческого организма к вибрации

весьма велик – от 0,1 до 1500 Гц. Характер вредного действия вибраций на человека во многом зависит от частотного состава [13] (табл. 1).

Колебания и вибрации различных направлений воспринимаются человеком при равной их интенсивности по-разному. Наиболее неблагоприятны, с точки зрения ощущений, виброускорения в полосе частот 4–8 Гц при

ТАБЛИЦА 1. Характеристика вредного действия вибраций на организм человека

Действие вибрации	Частоты колебаний, Гц
Укачивание	0,3–0,8
Основные резонансы тела	0,9–3,0; 5,0–8,0; 9,0–10,0
Затруднение дыхания	1,0–9,5
Вредное влияние на зрение	0,8–10,0
То же, на сердечно-сосудистую систему	5,0–10,0
Ухудшение координации рук, ног	1,5–4,0
Ухудшение качества работы	0,8–10,0

вертикальных и менее 2 Гц при горизонтальных колебаниях. Порог восприятия (порог чувствительности) в этих частотных полосах соответствует ускорению около $0,01 \text{ м/с}^2$ [13]. Воздействие вибраций на человека в значительной степени зависит от их длительности. Величина предельно допустимых виброускорений при длительности воздействия до 5 мин сохраняется на одном уровне, затем начинает падать и снижается через 4 ч более чем в 5 раз [13–15].

Следует отметить, что в настоящем исследовании рассматривались только вертикальные колебания экипажей поезда, как наиболее выраженные при движении по мостовым сооружениям.

Длительность пребывания человека в поезде и соответственно воздействия вибрации обусловлены маршрутом следования, а также количеством и протяженностью искусственных сооружений в составе трассы [15]. На рис. 3 представлена диаграмма, характеризующая долю протяженности искусственных сооружений по отношению к длине трассы высокоскоростной магистрали «Москва–Казань». Таким образом, продолжительность воздействия вибрации на пассажиров при движении по мостовым сооружениям на этой высокоскоростной магистрали составляет ориентировочно 40 мин (18,8 % от всей протяженности трассы). Общее время в пути от Москвы до Казани – 3,5 ч.

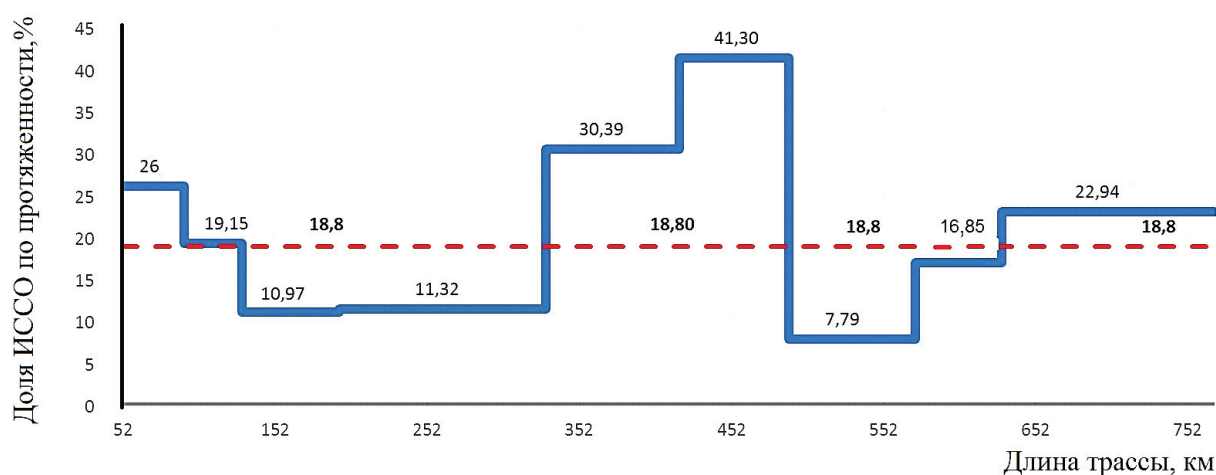


Рис. 3. График изменения доли искусственных сооружений по длине высокоскоростной магистрали «Москва–Казань»

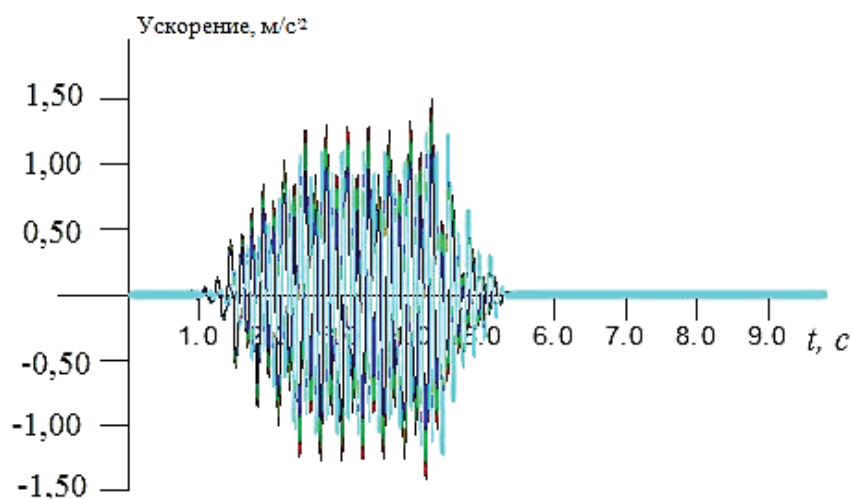


Рис. 4. Характерная запись вертикальных ускорений в экипаже высокоскоростного поезда при прохождении по железобетонной эстакаде по схеме $10 \times 34,2$ м со скоростью 440 км/ч

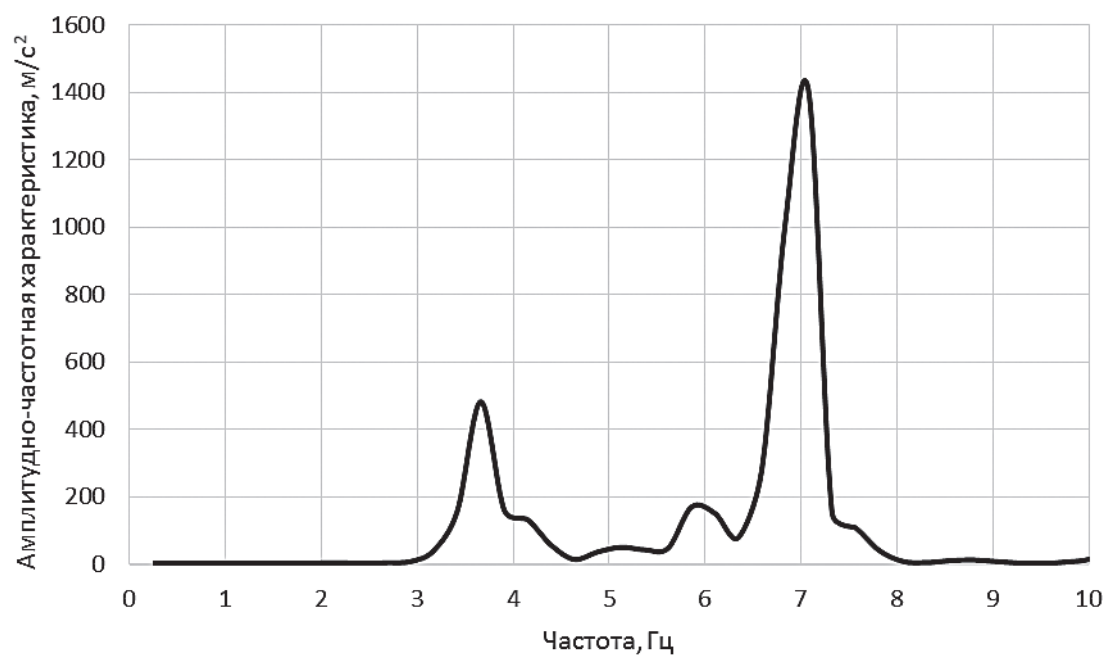


Рис. 5. Спектральная плотность вертикальных ускорений в экипаже высокоскоростного поезда при прохождении по железобетонной эстакаде по схеме $10 \times 34,2$ м со скоростью 440 км/ч

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета уровня вибраций в экипажах высокоскоростного поезда при движении со скоростью 440 км/ч

Скорость поезда, км/ч	Среднеквадратичное скорректированное виброускорение, a_w , м/с ²	Частота колебаний, Гц	Частотная коррекция
440	0,11 (0,58)	7	1,039

Примечание. В скобках указаны значения среднеквадратичного скорректированного виброускорения по отношению к времени нахождения на мостовом сооружении.

Вибрация, согласно стандарту [14, 15], оценивается по величине среднеквадратичного значения скорректированного виброускорения. Среднеквадратичное скорректированное виброускорение определяется по формуле

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2},$$

где $a_w(t)$ – скорректированное поступательное (угловое) виброускорение как функция времени, м/с^2 ; T – длительность измерений, с.

Расчеты уровня вертикальных вибраций выполнены на основе акселерограмм, полученных в ходе динамического анализа взаимодействия системы «мост–поезд». Частота колебаний экипажей поезда получена в результате анализа акселерограмм с помощью быстрого преобразования Фурье (рис. 4, 5, табл. 2).

Стоит отметить, что при расчете среднеквадратичного скорректированного виброускорения вертикальных колебаний для определения потенциального риска для здоровья пассажиров и обслуживающего персонала учитывалась доля искусственных сооружений в составе всей трассы.

Приемлемые, с точки зрения комфорта, параметры вибрации зависят от многих факторов, которые меняются для разных условий воздействия вибрации. Приведем значения, дающие приближенное представление о возможной реакции человека на различные величины полной вибрации в условиях общественного транспорта:

менее $0,315 \text{ м/с}^2$ – дискомфорт не ощущается;

от $0,315$ до $0,63 \text{ м/с}^2$ – легкое ощущение дискомфорта;

от $0,5$ до 1 м/с^2 – приемлемое ощущение дискомфорта;

от $0,8$ до $1,6 \text{ м/с}^2$ – отчетливое ощущение дискомфорта;

от $1,25$ до $2,5 \text{ м/с}^2$ – ощущение сильного дискомфорта;

свыше 2 м/с^2 – крайняя степень дискомфорта.

Заключение

Сравнение среднеквадратичных скорректированных виброускорений, полученных на основе анализа акселерограмм вертикальных ускорений в экипажах высокоскоростного поезда при скорости движения 440 км/ч , соответствующих резонансным скоростям пролетных строений и подвижного состава, позволяет сделать вывод, что в ходе следования поезда от Москвы до Казани (770 км ; $3,5 \text{ ч}$ в пути) пассажиры и обслуживающий персонал получают дозу вибрации, не представляющую опасность для здоровья. При прохождении поезда по искусственным сооружениям, однако, пассажиры, согласно условным критериям, могут испытывать легкое чувство дискомфорта. До настоящего времени данный подход не получил должного отражения в отечественных нормативных документах по проектированию высокоскоростных железнодорожных магистралей [16], хотя именно движение поездов по мостовым сооружениям является одним из определяющих факторов динамического воздействия вибраций на пассажиров.

Следует также отметить, что полученные результаты справедливы для относительно «жестких» и массивных железобетонных конструкций двухпутных пролетных строений мостовых сооружений коробчатого сечения, что обуславливает благоприятные условия для их дальнейшего применения на высокоскоростных магистралях.

При возрастании доли искусственных сооружений в составе железнодорожной магистрали, а также в случае применения более экономичных, но динамически «чувствительных» конструкций мостовых сооружений будут значительно увеличиваться дозы вибрации, а также риски возникновения опасных факторов для здоровья пассажиров и обслуживающего персонала высокоскоростных поездов.

Библиографический список

1. Бенин А.В. Особенности проектирования и строительства мостов высокоскоростной железно-

дорожной магистрали «Москва–Казань» / А. В. Бенин, Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 4 (45). – С. 15–20.

2. Бондарь Н. Г. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом / Н. Г. Бондарь, Ю. Г. Козьмин, З. Г. Ройтбурд и др. ; под ред. Н. Г. Бондаря. – М. : Транспорт, 1984. – 272 с.

3. Смирнов В. Н. Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, А. А. Барановский, Г. И. Богданов, Д. Е. Воробьев, Л. К. Дьяченко, В. В. Кондратов. – СПб. : ПГУПС, 2015. – 274 с.

4. Смирнов В. Н. Резонансные колебания пролетных строений мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, Л. К. Дьяченко, Е. А. Евстигнеев // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему) : сб. трудов Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 67–74.

5. Смирнов В. Н. Особенности высокоскоростного движения железнодорожных экспрессов по мостам / В. Н. Смирнов // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему) : сб. трудов Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 50–57.

6. Чижов С. В. Оценка безопасности мостов с учетом динамического фактора надежности / С. В. Чижов, Э. Т. Яхшиев, Л. К. Дьяченко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – 2016. – Вып. 2 (47). – С. 247–254.

7. Дьяченко Л. К. Динамические расчеты пролетных строений мостов ВСМ при движении пассажирских поездов со скоростью до 400 км/ч / Л. К. Дьяченко // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему) : сб. трудов Междунар. науч.-технич. конференции – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 91–97.

8. Козьмин Ю. Г. Особенности динамического воздействия на мосты поездов, сформированных из однотипных вагонов / Ю. Г. Козьмин, В. В. Кондратов // Вопросы статической и динамической работы, оценки грузоподъемности и эксплуатационной надежности мостов : межвуз. сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ДГИЖТ, 1988. – С. 167–173.

9. Бондарь Н. Г. Динамика железнодорожных мостов / Н. Г. Бондарь, И. Н. Казей, Б. Ф. Лесохин, Ю. Г. Козьмин. – М. : Транспорт, 1965. – 411 с.

10. Fryba L. Vibration of Solids and Structures under Moving Loads. Groningen, The Netherlands : Noordhoff Intern. Publ., 1972. – 511 p.

11. Fryba L. Dynamics of Railway Bridges. London, England : Thomas Telford, 1996. – 330 p.

12. Fryba L. A rough assessment of railway bridges for high speed trains // Eng. Struct. – 2001. – Vol. 23 (5). – P. 548–556.

13. Казакевич М. И. К нормированию уровня допустимых вибраций в системе «пешеход–мост» / М. И. Казакевич, М. М. Кварцов, А. Л. Загора // Вопросы динамики мостов и теории колебаний. – Днепропетровск : ДГИЖТ, 1984. – С. 50–65.

14. ГОСТ 31191.1–2004 (ИСО 2631–1:1997) «Межгосударственный стандарт. Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Общие требования». – М. : Стандартинформ, 2010.

15. ГОСТ 31191.4–2006 (ИСО 2631–4:2001) «Межгосударственный стандарт. Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Руководство по оценке влияния вибрации на комфорт пассажиров и бригады рельсового транспортного средства». – М. : Стандартинформ, 2008.

16. Специальные технические условия «Сооружения искусственные участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали “Москва–Казань–Екатеринбург”. Технические нормы и требования к проектированию и строительству». – СПб., 2014.

References

1. Benin A. V., Dyachenko L. K. & Smirnov V. N. Osobennosti proyektirovaniya i stroitelstva mostov vysokoskorostnoy zheleznoy magistraly “Moskva–Kazan” [Engineering and construction features of “Moscow–Kazan” high-speed mainline railroad bridges]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2015, issue 4 (45), pp. 15–20. (In Russian)

2. Bondar N. G., Kozmyn Y. G., Roytburd Z. G. at all. *Vzaimodeistviye zheleznodorozhnykh mostov s pod-*

vyzhnym sostavom [The interaction of railway bridges with the rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1984, 272 p. (In Russian)

3. Smyrnov V.N., Baranovsky A. A., Bogdanov G.I., Vorobyev D.Y., Dyachenko L.K. & Kondratov V.V. *Mosty na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh* [High-speed mainline railroad bridges]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, 274 p. (In Russian)

4. Smyrnov V.N., Dyachenko L.K. & Yevstygnev Y.A. *Rezonansnye kolebaniya proletnykh stroyeniy mostov na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh* [Resonance oscillations of bridge spans on high-speed mainline railroads]. *Noviye tekhnologii v mostostroyenii (ot proshlogo k budushemu). Sb. Trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [New technologies in bridge engineering (from past to future). Coll. Papers of International scientific and technical conference]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, pp. 67–74. (In Russian)

5. Smyrnov V.N. *Osobennosti vysokoskorostnogo dvizheniya zheleznodorozhnykh ekspressov po mostam* [High-speed running specificities of railway expresses on bridges]. *Noviye tekhnologii v mostostroyenii (ot proshlogo k budushemu). Sb. Trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [New technologies in bridge engineering (from past to future). Coll. Papers of International scientific and technical conference]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, pp. 50–57. (In Russian)

6. Chyzhov S.V., Yakhshyev E.T. & Dyachenko L.K. *Otsenka bezopasnosti mostov s uchetom dynamicheskogo faktora nadezhnosti* [Safety evaluation of bridges allowing for dynamical reliability factor]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, PGUPS Publ., 2016, issue 2 (47), pp. 247–254. (In Russian)

7. Dyachenko L.K. *Dinamicheskiye raschety proletnykh stroyeniy mostov VSM pry dvizhenii passazhyrskikh poyezdov so skorostyu do 400 km/ch* [Dynamic analysis of high-speed network bridge spans during passenger trains movement at a speed of 400 km per hour]. *Noviye tekhnologii v mostostroyenii (ot proshlogo k budushemu). Sb. Trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [New technologies in bridge engineering (from past to future). Coll. Papers of International scientific and technical

conference]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, pp. 91–97. (In Russian)

8. Kozmyn Y.G. & Kondratov V.V. *Osobennosti dynamicheskogo vozdeystviya na mosty poyezdov, sformirovannykh iz odnotypnykh vagonov* [Specificities of dynamic influence on bridges by trains made up of single-type coaches]. *Voprosy staticheskoy i dynamicheskoy raboty, otsenki gruzopdjemnosti i eksploatazionnoy nadezhnosti mostov. Mezhvuzovskiy sb. nauchnykh trudov* [The issues of static and dynamic work, elevating capacity and maintainability of bridges assessment. Interuniversity coll. of papers]. Dnepropetrovsk, DGIZhT Publ., 1988, pp. 167–173. (In Russian)

9. Bondar N.G., Kazey N., Lesokhyn B.F. & Kozmyn Y.G. *Dinamika zheleznodorozhnykh mostov* [Dynamics of railway bridges]. Moscow, Transport Publ., 1965, 411 p. (In Russian)

10. Fryba L. *Vibration of Solids and Structures under Moving Loads*. Groningen, The Netherlands, Noordhoff Intern. Publ., 1972, 511 p.

11. Fryba L. *Dynamics of Railway Bridges*. London, England, Thomas Telford Publ., 1996, 330 p.

12. Fryba L. A rough assessment of railway bridges for high speed trains. *Eng. Struct.*, 2001, vol. 23 (5), pp. 548–556.

13. Kazakevych M.I., Kvartsov M.M. & Zakora A.L. *K normirovaniyu urovnya dopustimyykh vibratsiy v sisteme “peshekhod-most”* [Upon the level of permissible vibrations rating in the “pedestrian-bridge” system]. *The issues of railway bridges dynamics and vibration theory*. Dnepropetrovsk, DGIZhT Publ., 1984, pp. 50–65. (In Russian)

14. *GOST 31191.1–2004 (ISO 2631–1:1997). “Mezhhgosudarstvenniy standart. Vibratsiya i udar. Izmereniye obshey vibratsii i otsenka vozdeystviya na cheloveka. Obshniye trebovaniya”* [State Standard 31191.1–2004 (ISO 2631–1:1997). “Interstate standard. Vibration and impulse. General vibration measurement and the assessment of its influence on a human. General requirements”]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. (In Russian)

15. *GOST 31191.4–2006 (ISO 2631–4:2001) “Mezhhgosudarstvenniy standart. Vibratsiya i udar. Izmereniye obshey vibratsii i otsenka vozdeystviya na cheloveka. Rukovodstvo po otsenke vliyaniya vibratsii na komfort passazhyrov i brygady relsovogo transportnogo sredstva”* [State Standard 31191.4–2006 (ISO 2631–4:2001). “Interstate standard. Vibration

and impulse. General vibration measurement and the assessment of its influence on a human. Direction on the assessment of vibration impact on the comfort of passengers and rail vehicle team comfort"]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. (In Russian)

16. *Spetsialniye tekhnicheskiye usloviya "Sooruzheniya iskusstvenniye uchastka Moskva–Kazan*

vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magystraly "Moskva–Kazan–Yekaterinburg" [Special regulations "Engineering structures of Moscow–Kazan section of high-speed mainline railroad "Moscow–Kazan–Yekaterinburg"]]. Technical norms and regulations on planning and building. Saint Petersburg, 2014. (In Russian)

*ДЬЯЧЕНКО Леонид Константинович – ассистент, leonid_dyachenko@mail.ru; СМЕРНОВ Владимир Николаевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; ДУДКИН Евгений Павлович – доктор техн. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.123

Ю. А. Канцибер, В. И. Штыков, А. Б. Пономарев**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСУШЕНИЯ
СЛАБОВОДОПРОНИЦАЕМЫХ ГРУНТОВ
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Дата поступления: 16.11.2016

Решение о публикации: 13.03.2017

Цель: Определение эффективности действия бесполостного и кюветного дренажа мелкого заложения в слабоводопроницаемых грунтах земляного полотна, устраиваемых в выемке или нулевом месте железных дорог. **Методы:** Сравнительная оценка выполнена в результате фильтрационных расчетов дальности действия и сроков осушения грунтов дренажами в период «стабилизации» их работы. **Результаты:** Установлено, что грунты, расположенные под балластной призмой, в реальных погодных условиях в районах с избыточным увлажнением не могут эффективно осушаться дренажем мелкого заложения. В отличие от него продолжительность осушения грунтов бесполостным дренажем даже в условиях очень интенсивной инфильтрации осадков будет меньше допустимых сроков переувлажнения грунтов земляного полотна. **Практическая значимость:** Обоснована целесообразность применения бесполостного дренажа вместо дренажа мелкого заложения при осушении слабоводопроницаемых грунтов земляного полотна железных дорог, что особо актуально при увеличении нагрузок на верхнее строение пути.

Ключевые слова: Железная дорога, земляное полотно, балласт, защитный слой, слабоводопроницаемые грунты, дренаж, инфильтрация, сроки осушения, верховодка, расчетный приток.

Yuriy A. Kantsiber, Cand. Sci., senior researcher, associate professor, kanziber3@yandex.ru; **Valeriy I. Shtikov**, correspond-member RAS, D. Sci., professor; ***Andrey B. Ponomarev**, Cand. Sci, associate professor, pol1nom@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) EFFECTIVENESS INCREASE OF LOW PERVIOUS SOIL DRAINAGE IN RAILWAY FOUNDATION

Objective: To determine the effectiveness of hollowless and low shaft cuvet drainage in low pervious soils, made in an earth cut or zero level of railway roads. **Methods:** Comparative assessment was made as a result of filtration analysis of range and the time-frame of soil drainage in “stabilization” period of its functioning. **Results:** It was established that the sub-soils, located under the ballast section in objective weather conditions in overhydrated districts cannot be effectively drained by means of shallow drainage. As opposed to shallow drainage, the length of soil drainage by means of hollowless drainage, even when there is intensive precipitation infiltration, will be shorter than admissible time limits of soil overdamping of road level. **Practical importance:** Applicability of hollowless drainage over shallow drainage in the process of low pervious soil drainage in railway roads foundation is justified, which is especially topical if there is load increment on superstructure.

Keywords: Railway, foundation, ballast, protective layer, low pervious soil, drainage, seepage, drainage time-frame, topwater, rated onflow.

Для исключения (или уменьшения до безопасного уровня) негативных процессов просадки, набухания, морозного пучения и суффозии в грунтах земляного полотна (ЗП) железных дорог применяют различные **водоотводные и дренажные устройства**, которые должны отвести поверхностные и грунтовые воды, уменьшить влажность грунтов и тем самым снизить опасность недопустимых деформаций ЗП и верхнего строения пути [1].

Понижение уровня грунтовых вод (УГВ) и их отвод от ЗП производится углубленными канавами, лотками и дренажами. При этом дренажи мелкого заложения (глубиной до 2,0–2,5 м) используются для улучшения условий дренирования балластной призмы (БП) и защитного слоя (ЗС), а также отвода воды из верхнего водоносного горизонта (верховодки).

Типы дренажных устройств (дренажа), их размеры и расположение определяют на основе данных инженерно-геологического и гидрогеологического обследования, фильтрационного и гидравлического расчетов, а также технико-экономического сравнения возможных вариантов в зависимости от расчетных расходов, характера и глубины залегания грунтовых вод, напластования и вида грунтов, рельефа местности, расположения и размеров земляного полотна.

Опыт применения существующих конструкций дренажа в полосах отвода железных дорог показывает, что в **слабоводопроницаемых грунтах** ЗП и его основания (при коэффициентах фильтрации менее 0,01 м/сут) они не обеспечивают своевременного осушения в связи с недостаточной эффективностью действия дренажа в этих грунтах.

Для повышения эффективности осушения ЗП при существенном увеличении скорости движения и грузоперевозок на железных дорогах, а следовательно, и нагрузки на верхнее строение пути рекомендуется наряду с канавами, кюветами и лотками в полосах отвода дороги (для отведения поверхностных вод) предусмотреть устройство под балластной призмой **бесполостного дренажа** (БД), который должен

своевременно отвести избыток воды, уменьшить влажность грунтов и снизить опасность недопустимых деформаций верхнего строения пути [2]. При этом нет необходимости устройства дренажа мелкого заложения.

Для сравнительной оценки эффективности действия БД и «традиционного» дренажа мелкого заложения (кюветного дренажа), устраиваемого в выемке или нулевом месте, выполнены фильтрационные расчеты по зависимостям, полученным в результате совместного решения (в конечных разностях) уравнений Дюпюи и водного баланса грунтовых вод для условий как установившегося, так и неуставившегося режима фильтрации, дифференцированного по двум фазам периода его «стабилизации» [3] (рис. 1). При этом учитывается интенсивность инфильтрационного притока воды к грунтовым водам.

Необходимо отметить, что целесообразность использования в расчетах дренажа более адекватных моделей процессов фильтрации воды в грунтах и теоретически обоснованных формул вызывает сомнение, так как ошибки определения параметров этих формул, в том числе фильтрационных характеристик слабоводопроницаемых грунтов [4], достигают 200–300 % и более (в том числе из-за их неоднородности) [5, 6]. Кроме того, для них необходимы исходные данные, которые могут быть получены только после проведения дополнительных полевых изысканий. Наконец, результаты расчетов зачастую значительно отличаются между собой, в связи с выбором различных расчетных схем, способов учета фильтрационных сопротивлений и др.

Для первой фазы периода «стабилизации» режима осушения грунтов продолжительностью t_1 , т. е. до момента окончания формирования кривой депрессии между совершенными дренами, уравнение водного баланса грунтовых вод можно представить в виде

$$\begin{aligned} V_q &= V_{\text{и}} + V_{\Delta} = K \cdot \frac{H_1^2 - h_1^2}{0,5L} \cdot t_1 = \\ &= 0,5 \cdot L \cdot \omega_{\text{и}} \cdot t_1 + \delta \cdot F_1. \end{aligned} \quad (1)$$

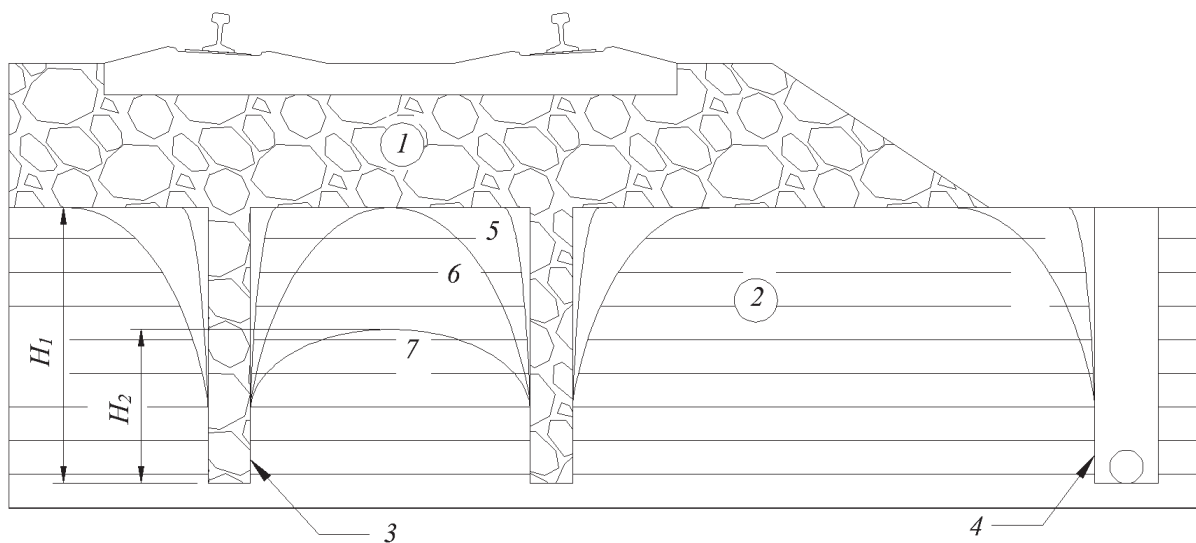


Рис. 1. Неустойчивая фильтрация в период «стабилизации» кривой депрессии: 1 – щебень; 2 – слабопроницаемый грунт; 3 – прорезь бесполостного дренажа; 4 – трубчатый дренаж за пределами балластной призмы; 5 – положение кривой депрессии на момент окончания первой фазы периода «стабилизации»; 6 – частное положение кривой депрессии во время второй фазы стабилизации, в момент смыкания ветвей от каждой дренажной прорези; 7 – положение кривой депрессии после окончания второго периода «стабилизации»

Для второй фазы «стабилизации» (понижение УГВ в середине между дренами, т. е. на расстоянии L от дрена) имеем

$$V_q = V_{\text{и}} + V_{\Delta} = K \cdot \frac{H_c^2 - h_c^2}{L} \cdot t_2 = \quad (2)$$

$$= L \cdot \omega_{\text{и}} \cdot t_2 + \delta \cdot F_2.$$

Для установившегося режима фильтрации в эксплуатационный период действия дренажа при $V_{\Delta} = 0$

$$V_q = V_{\text{и}} = K \cdot \frac{H_2^2 - h_2^2}{L} = L \cdot \omega_{\text{и}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{и}}$ – удельный инфильтрационный приток воды к грунтовым водам (на 1 пог. м дренажа), м²; V_{Δ} – изменение запасов грунтовых вод (верховодки), м²; V_q – удельный односторонний приток воды в дрена, м²; F_1 – площадь зоны осушения грунтов над кривой депрессии УГВ в первую фазу, м²; F_2 – площадь зоны осушения грунтов при понижении кривой депрессии УГВ во вторую фазу, м²; $\omega_{\text{и}}$ – расчетная интенсивность инфильтрации осадков

к грунтовым водам (приточность), м/сут [7]; K – коэффициент фильтрации грунтов, м/сут; t_2 – продолжительность второй фазы, в течение которой кривая депрессии в середине между дренами понизится от начального (H_1) до конечного (H_2) напора воды над дренай (дном траншеи), сут; $H_c = 0,5 (H_1 + H_2)$ – средний напор воды за период t_2 , м; h_1 и h_2 – высота границы «высачивания» воды на стенке дренажной траншеи над дренай (дном траншеи) в конце периода t_1 и t_2 соответственно, м; $h_c = 0,5 (h_1 + h_2)$ – средняя за период t_2 высота границы «высачивания» воды на стенке дренажной траншеи над дренай (дном траншеи), м; δ – коэффициент водоотдачи.

В слабопроницаемых грунтах степень несовершенства дренажа и фильтрационные сопротивления в сравнительных расчетах можно не учитывать. Для определения притока воды к несовершенным дренам в более легких грунтах их можно учитывать с помощью коэффициента «висячности» С. Ф. Аверьянова или метода фильтрационных сопротивлений [8].

Форма кривой депрессии УГВ в период «стабилизации», т. е. на спаде цикла действия дренажа (цикл осушения), в основном близка к эллипсу, значительно реже – к параболе четвертой степени [8]. Поэтому площади зон осушения грунтов дренажем в первую и вторую фазы периода «стабилизации», как следует из рис. 1, будут равны

$$F_1 = L \cdot (1 - \varphi) \cdot (H_1 - h_1), \quad (4)$$

$$F_2 = L \cdot (1 - \varphi) \cdot (h_1 - h_2) + L \cdot \varphi \cdot (H_1 - H_2). \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5) φ – коэффициент формы кривой депрессии; для эллипса $\varphi = \pi/4 = 0,78$, для параболы $\varphi \approx 0,6-0,7$ [9].

Из уравнений (1), (3), (4) определим дальность действия дренажа с учетом инфильтрации осадков:

$$L = 2 \sqrt{\frac{K \cdot t_1 (H_1^2 - h_1^2)}{2\delta(1 - \varphi)(H_1 - h_1) + \omega_n t_1}}. \quad (6)$$

В эксплуатационный период (Роте–Кене)

$$L = 0,5B = \sqrt{\frac{K(H_2^2 - h_2^2)}{\omega_n}}, \quad (7)$$

где B – расстояние между дренами (БД), м.

Уровень воды в дрене (траншее) зависит от ее параметров (уклона, диаметра труб, ширины и высоты БД), которые устанавливаются гидравлическим расчетом [8, 10]. Водопр-

пускная способность дрен и траншейной засыпки принимается, как правило, больше расчетного притока воды к ним. Поэтому уровень воды в дрене (траншее) не будет влиять на режим осушения слабоводопроницаемых грунтов (за исключением периодов значительного подпора дренажа со стороны водоприемника). При отсутствии указанной связи высоту границы «высачивания» воды на стенке дренажной траншеи над дреной (дном траншеи) можно приближенно определить, исходя из условия равенства удельного одностороннего притока воды (V_q) из осушаемых грунтов притоку в траншею из зоны «высачивания» на ее стенке (V_b), т. е.

$$V_q = V_b = K \cdot \frac{H_1^2 - h_1^2}{L} = K \cdot I \cdot h_1.$$

Средний уклон поверхности грунтовых вод (градиент напора) непосредственно у вертикальной стенки дренажной траншеи в слабоводопроницаемых грунтах $I \approx 1$.

Таким образом, для первой фазы «стабилизации» получим

$$h_1 \approx \frac{H_1^2 - h_1^2}{L}. \quad (8)$$

Расчеты по формуле (8) выполняются методом подбора (табл. 1). Для приближенной оценки значений h_1 можно использовать график зависимости $h_1 = f(L)$, представленный на рис. 2.

ТАБЛИЦА 1. Высота границы «высачивания» воды на стенке дренажной траншеи при различной дальности действия дрен

Напор воды над дреной H_1 , м	Высота границы «высачивания» воды h_1 (м) при различной дальности действия дрен L (м)					
	0,5	1	3	5	10	15
1,0	0,78	0,61	0,3	0,19	0,1	0,07
1,5	1,28	1,1	0,6	0,4	0,22	0,15
2,0	1,77	1,56	1,0	0,7	0,38	0,27
2,5	2,26	2,05	1,41	1,03	0,6	0,4
3,0	2,76	2,54	1,86	1,4	0,83	0,57

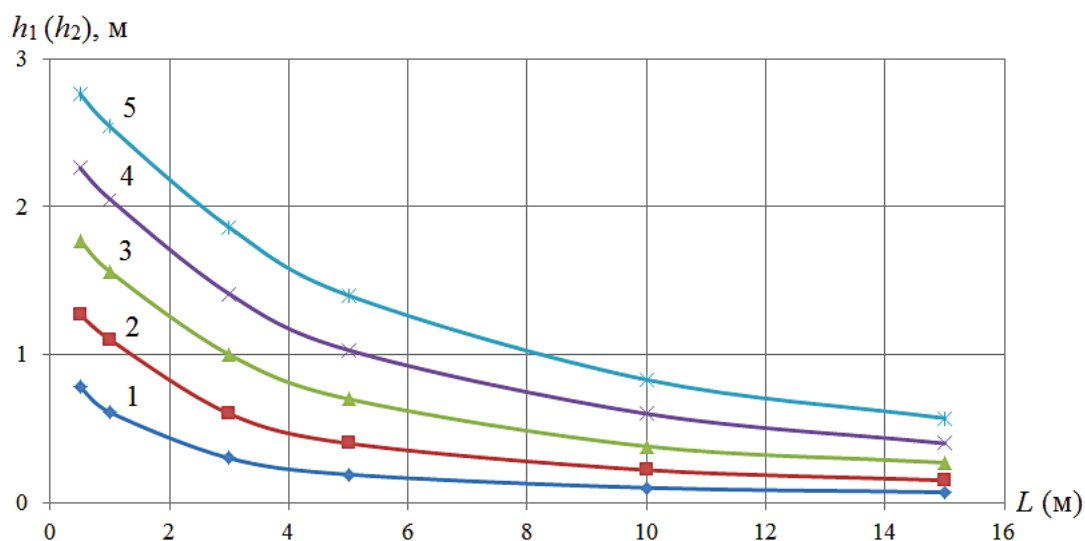


Рис. 2. График зависимости высоты границы «высачивания» на стенке дренажной траншеи от дальности действия дрен (L) и напоре воды над ними (H_1), равном 1 (1), 1,5 (2), 2 (3), 2,5 (4) и 3 м (5)

Для второй фазы «стабилизации» высота границы «высачивания» воды на стенке дренажной траншеи над дренами (дном траншеи) в конце периода t_2 , а также в эксплуатационный период определяется также подбором по формуле (8) или по рис. 2 при $H_1 = H_2$ и $h_1 = h_2$.

Так как значения h_1 , h_2 и h_c зависят от искомого параметра L , то расчеты по (6) и (7) выполнялись методом подбора.

В табл. 2 представлены результаты расчетов дальности действия дрен в слабоводопроницаемых грунтах в зависимости от продолжительности периода осушения и интенсивности инфильтрационного притока воды к

грунтовым водам. Для расчета были приняты следующие исходные данные: начальный напор над дренами $H_1 = 2$ м, конечный напор $H_2 = 1$ м, коэффициент фильтрации грунтов $K = 0,01$ м/сут (легкие суглинки), коэффициент водоотдачи $\delta = 0,03$, коэффициент эллиптической формы кривой депрессии УГВ $\phi = \pi/4$.

Из табл. 2 следует, что дальность действия дрен при продолжительности расчетного периода осушения слабоводопроницаемых грунтов до 3 сут не превышает 5 м при отсутствии осадков и 2,5 м при их интенсивной инфильтрации. Для более длительных сроков осушения дальность действия дрен при отсут-

ТАБЛИЦА 2. Расчетная дальность действия дрен в слабоводопроницаемых грунтах

Период осушения, сут	Интенсивность инфильтрации, м/сут					
	0	0,002	0,004	0,006	0,01	0,015
1	3	2,8	2,6	2,5	2,3	2
2	4,1	3,7	3,4	3,1	2,6	2,3
3	5	4,3	3,8	3,4	2,9	2,4
5	6,4	5,1	4,3	3,8	3,1	2,5
10	8,7	6,2	4,9	4,2	3,3	2,6
Эксплуатационный		2,2	1,6	1,3	0,98	0,8

ствии осадков возрастет до 7–9 м, а с учетом их интенсивной инфильтрации уменьшится в 2–3 раза. При этом расстояние от дрены до границы зоны, в которой УГВ располагаются глубже отметки H_2 , исходя из канонического уравнения эллипса [9], составляет $R \approx (0,15–0,2) L$.

Таким образом, кюветный дренаж, который располагается в 5–10 м от оси дороги, не может своевременно осушать грунты ЗП под балластной призмой. Напротив, БД с этой задачей справляется, так как эти грунты находятся, как правило, в зоне его действия.

В относительно «легких» грунтах (пылеватые супеси и пески с $K = 0,1$ м/сут) дальность действия дрен возрастает примерно в 2,5–3 раза по сравнению с данными, приведенными в табл. 2. Но даже в этих грунтах величина R будет недостаточна для периода осушения кюветным дренажом менее 10 сут.

Низкая эффективность действия дренажа в слабоводопроницаемых грунтах подтверждена полевыми исследованиями [8, 11, 12 и др.], расчетами [13] и лабораторными опытами [14]. Рекомендуемое расстояние между осушителями в таких условиях составляет для этих грунтов иногда не более 2 м [15].

Из уравнения (1) получим, что продолжительность осушения грунтов для первой фазы «стабилизации» режима фильтрации можно определить по формуле

$$t_1 = \frac{2\delta L^2(1-\varphi)(H_1 - h_1)}{4K(H_1^2 - h_1^2) - \omega L_{\text{и}}^2}.$$

Продолжительность второй фазы «стабилизации» режима фильтрации, в течение которой УГВ в середине между дренами должен понизиться от начального H_1 до конечного H_2 напора воды над дренаем, составляет

$$t_2 = \frac{\delta L^2 M}{K(H_c^2 - h_c^2) - \omega_{\text{и}} L^2},$$

где $M = (1 - \varphi)(h_1 - h_2) + \varphi(H_1 - H_2)$.

Таким образом, продолжительность периода «стабилизации» до перехода к установившемуся режиму фильтрации с конечным положением УГВ (H_2) будет равна $T = t_1 + t_2$.

О сроках осушения грунтов кюветным дренажем и БД можно судить по результатам расчетов, приведенным в табл. 3, из которой следует, что продолжительность осушения грунтов притраншейной зоны бесполостных дрен, расположенных под колеями пути ($L < 0,7$ м), в период «стабилизации» при интенсивности инфильтрации до 0,005 м/сут не превышает 2 сут, т. е. допустимых сроков переувлажнения грунтов ЗП для особогрузонапряженных и скоростных железнодорожных линий.

Кюветные дренажи не могут обеспечить понижение УГВ до нормы осушения в грунтах уже в 1,0 м от траншейной засыпки даже при отсутствии инфильтрации осадков (суммарная продолжительность осушения в период «стабилизации»). Таким образом, грунты, расположенные под балластной призмой, в реальных погодных условиях не будут осушаться кюветной дренаем.

В пылеватых супесях и песках с $K = 0,1$ м/сут продолжительность их осушения кюветным дренажем в период «стабилизации» режима фильтрации на порядок снижается. Однако и в этих грунтах кюветные дренажи не могут обеспечить понижение УГВ до нормы осушения в течение 2 сут в 5 м от траншейной засыпки даже при небольшой интенсивности инфильтрации (до 0,002 м/сут).

Повышение эффективности осушения слабоводопроницаемых грунтов земляного полотна железных дорог возможно в результате усовершенствования (модернизации) или разработки новых конструкций и проведения опытных и опытно-производственных их испытаний. К таким конструкциям, достаточно эффективным в гидрологическом отношении, можно, к примеру, отнести конструкции БД, имеющие **гидроизоляционный слой** в основании балластной призмы, который не допускает переувлажнения нижележащих грунтов ЗП и соответственно деформацию верхнего строения пути.

ТАБЛИЦА 3. Сроки осушения дренажем слабоводопроницаемых грунтов ЗП железных дорог в период «стабилизации» режима фильтрации

Интенсивность инфильтрации, м/сут	Продолжительность осушения грунтов на различных расстояниях (L , м) от дрен, сут					
	0,5	1	2	3	5	10
$K = 0,01$ м/сут						
0	1,22 (0,02+1,2)*	2,03 (0,09+1,94)	4,86 (0,4+4,46)	7,63 (0,97+6,66)	16,3 (2,99+13,3)	53,6 (13,5+40,1)
0,002	1,32 (0,02+1,3)	2,47 (0,09+2,38)	9,8 (0,43+9,37)	443 (1,14+442)	∞ (4,64+ ∞)	∞
0,004	1,45 (0,02+1,43)	3,19 (0,1+3,09)	∞ (0,48+ ∞)	∞ (1,38+ ∞)	∞ (10,4+ ∞)	
0,006	1,60 (0,02+1,58)	4,50 (0,1+4,4)	∞ (0,53+ ∞)	∞ (1,76+ ∞)	∞	
0,01	2,02 (0,02+2,00)	28,7 (0,11+28,6)	∞ (0,67+ ∞)	∞ (3,87+ ∞)		
0,015	3,03 (0,03+3,01)	∞ (0,12+ ∞)	∞ (1,03+ ∞)	∞		
$K = 0,1$ м/сут						
0	0,12 (0,002+0,12)	0,2 (0,009+0,19)	0,49 (0,04+0,45)	0,77 (0,1+0,67)	1,63 (0,3+1,33)	5,38 (1,36+4,02)
0,002	0,12 (0,002+0,12)	0,21 (0,01+0,2)	0,51 (0,04+0,47)	0,84 (0,1+0,74)	2,07 (0,31+1,76)	47,4 (1,56+45,8)
0,004	0,12 (0,002+0,12)	0,21 (0,01+0,2)	0,54 (0,04+0,5)	0,93 (0,1+0,83)	2,92 (0,32+2,6)	∞ (1,836+ ∞)
0,006	0,12 (0,002+0,12)	0,22 (0,01+0,21)	0,57 (0,04+0,53)	1,04 (0,1+0,94)	5,27 (0,33+4,95)	∞ (2,22+ ∞)
0,01	0,12 (0,002+0,12)	0,22 (0,01+0,21)	0,64 (0,04+0,6)	1,45 (0,1+1,35)	∞ (0,36+ ∞)	∞ (3,84+ ∞)
0,015	0,13 (0,002+0,13)	0,24 (0,01+0,23)	0,78 (0,04+0,74)	2,66 (0,11+2,55)	∞ (0,41+ ∞)	∞ (49,5+ ∞)

Примечание. Исходные данные – такие же, как для табл. 2, 1,22 (0,02+1,2): перед скобой – суммарная продолжительность осушения, первая цифра в скобках – продолжительность осушения в первую фазу «стабилизации», вторая – во вторую.

На основании проведенного исследования приходим к следующим выводам:

1. Для более эффективного действия водотводных (дренажных) устройств в слабоводопроницаемых грунтах земляного полотна, что является особо актуальным при увеличении

нагрузок на верхнее строение пути, рекомендуется устройство бесполостного дренажа, устраиваемого под балластом вдоль земляного полотна.

2. Дренаж мелкого заложения не может обеспечить необходимое понижение УГВ уже

в 1 м от траншейной засыпки даже при отсутствии осадков. Грунты, расположенные под балластной призмой, в реальных погодных условиях в районах с избыточным увлажнением не будут им осушаться.

3. Продолжительность осушения грунтов притраншейной зоны бесполостной дрены (до 0,7 м) даже в условиях интенсивной инфильтрации осадков не превышает 2 сут, т. е. допустимых сроков переувлажнения грунтов ЗП для особогруazonaпряженных и скоростных железнодорожных магистралей.

Библиографический список

1. СП 32-104-98 «Проектирование земляного полотна железных дорог». – М., 1998.
2. Блажко Л. С. Бесполостной дренаж : опыт и перспективы / Л. С. Блажко, В. И. Штыков, Е. В. Черняев // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 11. – С. 44–47.
3. Шахунянц Г. М. Земляное полотно железных дорог / Г. М. Шахунянц. – М. : Гос. транспорт. изд-во, 1953. – 827 с.
4. Методические указания по проведению гидрогеолого-мелиоративных наблюдений в Нечерноземной зоне РСФСР – Л. : СевНИИГиМ, 1983. – 96 с.
5. Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях. (Справочное пособие к СНиП.) – М. : Стройиздат, 1991. – 272 с.
6. Пособие по проектированию методов регулирования водно-теплого режима верхней части земляного полотна (к СНиП 2.05.02-85). – М. : Стройиздат, 1989. – 97 с.
7. Канцибер Ю. А. Расчетная приточность к дренаруемым площадям в условиях Северо-Запада России / Ю. А. Канцибер, В. И. Штыков // Сб. акад. чтения к 200-летию ПГУПС. – СПб. : ПГУПС, 2009. – С. 88–90.
8. Шкиннис Ц. Н. Гидрологическое действие дренажа / Ц. Н. Шкиннис. – Л. : Гидрометеиздат, 1982. – 311 с.
9. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М. : Наука, 1977. – 871 с.

10. Штыков В. И. Бесполостной дренаж : гидравлическое обоснование, расчет и эффективность действия / В. И. Штыков, С. Г. Гордиенко. – СПб. : Изд-во ОАО ПП-3, 1997. – 224 с.

11. Эггельсманн Р. Руководство по дренажу / Р. Эггельсманн ; пер. с нем. В. Н. Горинского. – М. : Колос, 1978. – 255 с.

12. Канцибер Ю. А. Методы проектирования водного режима осушаемых земель в Нечерноземной зоне РСФСР / Ю. А. Канцибер, А. И. Климко, С. И. Харченко. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 82 с.

13. Бишоф Э. А. Определение параметров регулирующей сети при реконструкции осушительных систем / Э. А. Бишоф, А. А. Тилк // Реконструкция мелиоративных систем. – 1990. – С. 35–42. – (Сб. науч. тр. СевНИИГиМ.)

14. Золотов М. Е. Исследования гидрологической роли траншейной засыпки при работе дренажа в слабоводопроницаемых грунтах / М. Е. Золотов // Реконструкция мелиоративных систем. – 1990. – С. 42–46. – (Сб. науч. тр. СевНИИГиМ.)

15. Временные рекомендации по проектированию и строительству конструкций дренажа в слабоводопроницаемых грунтах на опытно-производственных участках Нечерноземной зоны РСФСР / под ред. В. В. Токаревича. – Л. : СевНИИГиМ, 1988. – 52 с.

References

1. SP 32-104-98. *Proektirovaniye zemlyanogo polotna zheleznikh dorog* [Railway foundation construction]. Moscow, 1998. (In Russian)
2. Blagko L. S., Shtykov V. I. & Chernyaev E. V. *Bespolostnoy drenag: opyt i perspektivy* [Hollowless drainage: experience and perspectives]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2013, no. 11, pp. 44–47. (In Russian)
3. Shakhunyants G. M. *Zemlyanoe polотно zheleznikh dorog* [Railway roadbed]. Moscow, Gosudarstvennoye transportnoye zheleznodorognoye Publ., 1953, 827 p. (In Russian)
4. *Metodicheskiye ukazaniya po provedeniju gidrogeologo-meliorativnykh nabludenij v Nечernozemnoy zone RSFSR* [Study guide on conducting hydrogeological meliorative observation in Non-black soil zones in

RSFSR]. Leningrad, SevNIIGiM Publ., 1983, 96 p. (In Russian)

5. *Prognozy podtopleniya i raschet drenagnykh system na zastraivaemikh i zastroennykh territoriyakh* [Impoundment prognosis and drainage systems calculation on built-up and being built territories]. (Reference book for SNiP.). Moscow, Stroyizdat Publ., 1991, 272 p. (In Russian)

6. *Posobyе po proektirovaniyu metodov regulirovaniya vodno-teplovogo regima verkhney chasti zemlyanogo polotna* [Reference book on developing the methods of aqua-thermal condition of the upper part of the roadbed] (for SNiP 2.05.0285). Moscow, Stroyizdat Publ., 1989, 97 p. (In Russian)

7. Kantsiber Y.A. & Shtykov V.I. Raschetnaya pri-tochnost k drenyruemym ploshadyam v usloviyakh Severo-Zapada Rossii [Calculated inflow onto drainable territories in the North-West conditions of Russia]. *Sbornik akademicheskogo chteniya k 200-letiyu PGUPS* [Coll. Papers of academic reading commemorating the 200th anniversary of PGUPS]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2009, pp. 88–90. (In Russian)

8. Shkinkis T.N. *Gidrologicheskoe dejstvie drenaga* [Hydrological effect of drainage]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 311 p. (In Russian)

9. Vigodskiy M.Y. *Spravochnik po vysshej matematike* [Reference book on higher mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 871 pp. (In Russian)

10. Shtykov V.I. & Gordienko S.G. *Bewspolostnoi drenazh: gidravlicheskie obosnovanie, raschet i effektivnost deistviya* [Hollowless drainage: hydraulic justification, calculation and effectiveness]. Saint Petersburg, OJSC PP-3 Publ., 1997, 224 p. (In Russian)

11. Eggelsmann R. *Rukovodstvo po drenazhu* [Drainage guide]. Tr. from German by V.N. Gorinsky. Moscow, Kolos Publ., 1978, 255 p. (In Russian)

12. Kantsiber Y.A., Klimko A.I. & Kharchenko S.I. *Metody proektirovaniya vodnogo regima osushaemykh zemel v Nechernozemnoy zone RSFSR* [Designing methods of hydromode in drainage regions of Non-black soil zones in RSFSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983, 82 p. (In Russian)

13. Bishof E.A. & Tilk A.A. Opredeleeniye parametrov regulirujushey sety pri rekonstruktsii osushitelnykh system. Rekonstruktsiya meliorativnykh system [Identification of parameters of regulating system in the process of drainage systems reconstruction. Meliorative systems reconstruction]. *Coll. papers/SevNIIGiM*, 1990, pp. 35–42. (In Russian)

14. Zolotov M. E. Issledovaniya gidrologicheskoy roly tranzheinykh zasypki pri rabote drenaja v slabovodopronitsaemykh gruntakh [The study of hydrogeological role of trench filling in poorly water permeable soil. Meliorative systems reconstruction]. *Coll. Papers/SevNIIGiM*, 1990, pp. 42–46. (In Russian)

15. *Vremennyye rekomendatsii po proektirovaniyu i stroitelstvu konstruksiy drenaga v slabovodopronitsaemykh gruntakh na opytno-proizvodstvennykh uchastkakh Nechernozemnoy zony RSFSR* [Temporary guide on designing and building of drainage constructions in poorly water permeable soil in experimental industrial areas of Non-black soil zone of RSFSR]. Ed. by V.V. Tokarevicha. Leningrad, SevNIIGiM Publ., 1988, 52 p. (In Russian)

КАНЦИБЕР Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, ст. научный сотрудник, доцент, kanziber3@yandex.ru; ШТЫКОВ Валерий Иванович – чл.-корр. РАН, доктор техн. наук, профессор; *ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович – канд. техн. наук, доцент, polnom@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.424.3: 629.4.027

В. А. Кручек, А. М. Евстафьев**ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ОСЕВОГО РЕДУКТОРА
КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ РЕАКТИВНОЙ ТЯГОЙ
ГРУППОВОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЛОКОМОТИВА**

Дата поступления: 25.10.2016

Решение о публикации: 05.12.2016

Цель: Получение аналитических зависимостей перемещений горизонтальных реактивных тяг и осевых редукторов в ходовой тележке группового тягового привода колесных пар во время движения локомотива для определения их скоростей и ускорений, а также для снижения динамических нагрузок и повышения надежности элементов привода, учитывая его конструктивные особенности и условия эксплуатации. **Методы:** Применены законы теоретической механики и знания тригонометрии. **Результаты:** Установлены аналитические зависимости кинематических пространственных перемещений горизонтальной реактивной тяги и осевого редуктора колесной пары группового тягового привода от вертикальных перемещений рамы ходовой тележки локомотивов. Определены граничные условия для углов наклона реактивных тяг и линии центров осевых редукторов. Проведен анализ полученных зависимостей. Представлены возможные варианты схем пространственного перемещения горизонтальных реактивных тяг и осевого редуктора в раме ходовой тележки локомотива с возможными отклонениями линейных размеров от технологических допусков. Построены графические зависимости вертикальных перемещений элементов реальных конструкций тягового привода от вертикальных перемещений рамы тележки при движении локомотива. **Практическая значимость:** На основе полученных зависимостей возможны расчет линейных перемещений, угловых скоростей и ускорений реактивных тяг и осевых редукторов колесных пар, а также создание рациональных и надежных конструкций карданного тягового привода колесных пар локомотивов с минимальными динамическими нагрузками на его элементы. Результаты аналитических исследований могут быть применены при проектировании новых локомотивов с высокими динамическими показателями.

Ключевые слова: Тепловоз, тяговый привод, реактивная тяга, осевой редуктор, колесная пара, линия центров, угол поворота, вертикальные перемещения.

***Victor A. Kruchek**, D. Sci., professor; **Andrey M. Yevstafiev**, Cand. Sci., associate professor, head of a chair (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) KINEMATIC CALCULATION SPECIFICITIES OF WHEELSET AXIAL REDUCTION UNIT WITH HORIZONTAL JET THRUST OF GROUP TRACTIVE ENGINE DRIVE

Objective: To obtain analytical responses of horizontal jet thrusts and axial reduction units motion in wheel set group tractive engine drive carrier during engine movement to identify its velocity and acceleration, as well as to reduce dynamic loads and to boost drive components reliability, taking into account its constructive specificities and running conditions. **Methods:** The laws of theoretical mechanics as well as trigonometry knowledge were applied. **Results:** Analytical responses of kinematic spatial movements of horizontal jet thrust and a wheel set axial reduction unit of a group tractive drive were obtained from vertical engine's undercarriage frame shifts. Boundary conditions of jet thrust slopes were detected, as well as center lines of axial reduction units. The analysis of established relations was performed. Possible scheme variants of spatial movements of horizontal jet thrust and a wheel set axial reduction unit in engine's undercarriage frame were presented with possible linear dimensions' discrepancies from production tolerance. Characteristic curves of vertical shifts of actual towline constructions from vertical shifts of undercarriage frame during locomotive's movement were graphed. **Practical importance:** On the basis of obtained relations the analysis of linear displacement, angular velocities and accelerations

of jet thrusts and wheel set axial reduction units is possible, as well as the generation of rational and robust wheel set cardan tractive gear constructions for locomotives with minimal dynamic load on its elements. The results of analytical research might be applied in the designing of new engines with high dynamic parameters.

Keywords: Diesel locomotive, towline, jet thrust, axial reduction unit, wheelset, center line, slope, vertical shifts.

Введение

Промышленные и маневровые тепловозы серии ТГМ4 и ТГМ6 с гидравлической передачей мощности имеют групповой привод колесных пар, тяговые свойства которых для сложных условий эксплуатации могут превышать тяговые свойства локомотивов с индивидуальным приводом колесных пар [1–3]. Наряду с положительными свойствами у группового тягового привода есть отрицательные стороны, которые в первую очередь связаны с их конструктивными особенностями [2, 4–6]. На рис. 1 показана схема силовой трансмиссии четырехосных маневровых тепловозов с групповым карданным приводом колесных пар серии ТГМ6 [7].

Конструкция шкворневой балки рамы челюстной ходовой тележки тепловоза предусматривает горизонтальное расположение реактивной тяги осевого редуктора тяги колесной пары. Двигаясь по рельсовому пути рама тележки и колесные пары локомотива совершают линейные перемещения в вертикальной плоскости [8]. Осевой редуктор колесной пары, опирающийся на ее ось и соединенный с рамой тележки горизонтальной реактивной тягой, при вертикальных перемещениях рамы тележки и колесной пары совершает вращательное перемещение вокруг оси колесной пары [9, 10].

Кинематика перемещений реактивной тяги осевого редуктора тягового привода при движении локомотива

Рассмотрим вертикальные линейные перемещения рамы ходовой тележки относительно

колесной пары. Определим функциональную зависимость между вращательным перемещением редуктора колесной пары относительно оси его вращения и вертикальными перемещениями рамы ходовой тележки.

Рассмотрим общий случай крепления реактивной тяги осевого редуктора к раме тележки (рис. 2, а) и кинематическую схему вращательного его перемещения относительно оси колесной пары при некоторых допустимых технологических отклонениях от идеального положения (рис. 2, б). Пространственное положение реактивной тяги в строго горизонтальном положении в конструкции тележки является частным случаем. Очевидно, что это невозможно в силу различных обстоятельств, связанных как с технологическими трудностями при изготовлении отдельных деталей, так и при сборке привода в целом. На положение реактивной тяги влияют геометрические размеры корпуса редуктора, резиновых амортизаторов, длина реактивной тяги и других деталей привода [11].

Примем корпус редуктора, раму тележки и реактивную тягу абсолютно твердыми телами, а реактивная тяга и линия центров редуктора располагаются в вертикальной продольной по отношению к рельсовому пути плоскости.

Определим линейные и угловые зависимости вращательного перемещения осевого редуктора от вертикальных перемещений тележки относительно колесной пары. В реальных конструкциях редукторов колесных пар $H \gg Z_T$ и $L \gg Z_T$ [12], следовательно, угол поворота редуктора относительно оси вращения колесной пары $\varphi_{Z_T}^r$ мал, поэтому можно допустить, что

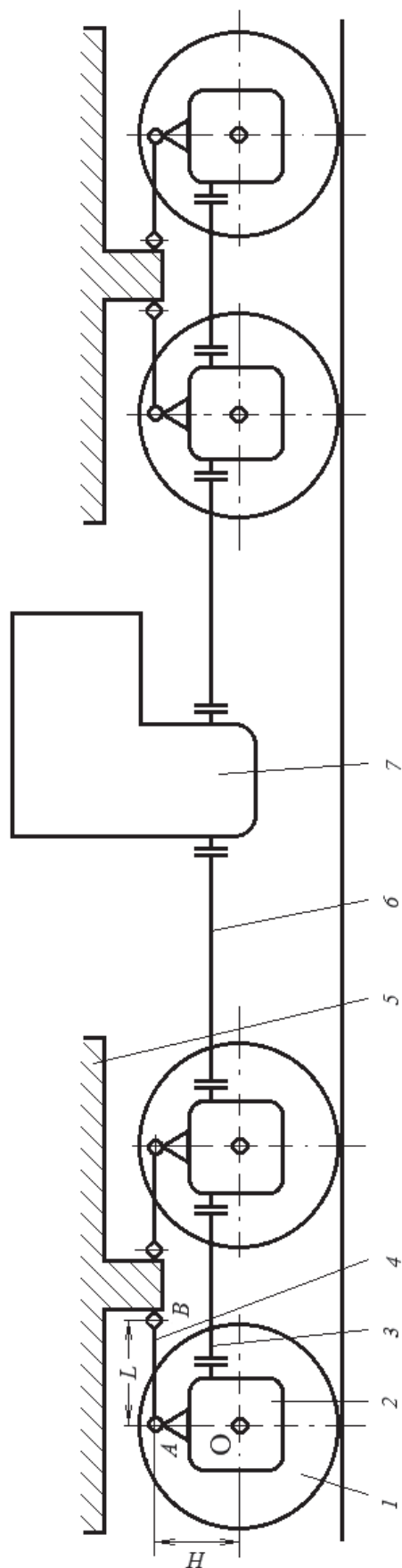


Рис. 1. Схема группового четырехосного тягового привода маневрового тепловоза:

1 – колесная пара; 2 – осевой редуктор; 3 – промежуточный (тележечный) карданный вал; 4 – горизонтальная реактивная тяга; 5 – рама ходовой тележки; 6 – раздаточный карданный вал; 7 – гидropередача

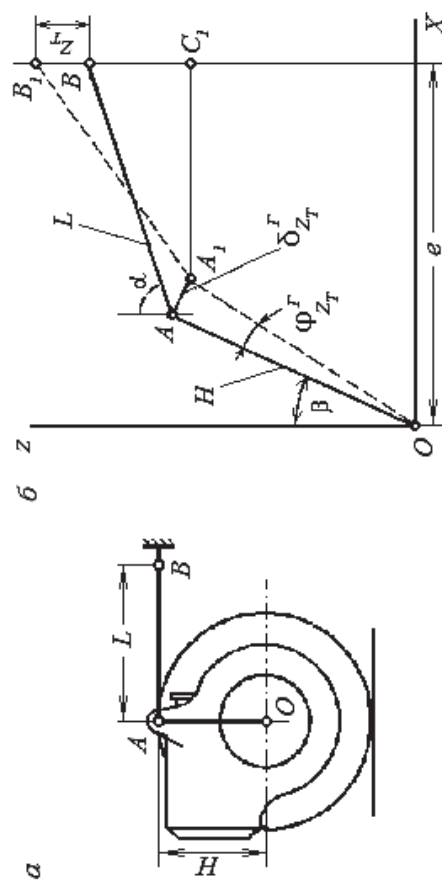


Рис. 2. Способ крепления осевого редуктора колесной пары:

a – крепление осевого редуктора оси колесной пары с горизонтальной реактивной тягой к шкворневой балке рамы тележки; *b* – схема кинематических перемещений горизонтальной реактивной тяги при вертикальных перемещениях рамы тележки: *H* – линия центров – расстояние между центром оси колесной пары и центром шарнирного соединения реактивной тяги с корпусом редуктора; *L* – длина реактивной тяги осевого редуктора; *e* – эксцентриситет крепления реактивной тяги, расстояние по горизонтали между вертикальными линиями, проходящими через ось вращения колесной пары точку *O* и точку *B* крепления реактивной тяги к раме тележки

$$\sin \varphi_{Z_T}^\Gamma = \operatorname{tg} \varphi_{Z_T}^\Gamma \approx \varphi_{Z_T}^\Gamma = \frac{\cup AA_1}{OA},$$

где $\cup AA_1$ – длина дуги окружности OA при перемещении рамы тележки на величину Z_T ; OA – линия центров, расстояние H от оси вращения осевого редуктора до точки крепления горизонтальной реактивной тяги; $\pm Z_T$ – вертикальные линейные перемещения точки B крепления реактивной тяги к шкворневой балке тележки. За положительное перемещение точки B принято перемещение вверх, за отрицательное – вниз; $\varphi_{Z_T}^\Gamma$ – угол поворота редуктора (линии центров – OA) относительно оси вращения колесной пары, вызванный вертикальными перемещениями $\pm Z_T$. Положительным принят угол поворота редуктора по часовой стрелке и наоборот, если поворот редуктора осуществляется против часовой стрелки, то отрицательным.

Так как численные значения $\varphi_{Z_T}^\Gamma$ малы, то можно записать

$$\delta_{Z_T}^\Gamma \approx \cup AA_1.$$

Тогда

$$\varphi_{Z_T}^\Gamma = \frac{\delta_{Z_T}^\Gamma}{OA},$$

где $\delta_{Z_T}^\Gamma$, $\cup AA_1$ – линейная величина перемещения точки A и длина касательной к окружности OA в точке A .

Угол поворота редуктора относительно оси вращения колесной пары является функциональной зависимостью двух переменных $\varphi_{Z_T}^\Gamma = f(\delta_{Z_T}^\Gamma, H)$ [13]. Поэтому, если принять условие, что

$$\begin{cases} OA = H = idem, \\ AB = L = idem, \end{cases} \quad (1)$$

то справедливо выражение

$$\varphi_{Z_T}^\Gamma \approx \delta_{Z_T}^\Gamma.$$

Рассмотрим треугольник $A_1 B_1 C_1$ (рис. 2, б). Учитывая, что

$$Z_T = B_1 C_1 - B C_1,$$

$$(A_1 B_1)^2 = (A_1 C_1)^2 + (B_1 C_1)^2,$$

где $A_1 B_1 = L$;

$$A_1 C_1 = L \cdot \sin \alpha - \delta_{Z_T}^\Gamma \cdot \cos \beta;$$

$$B_1 C_1 = L \cdot \cos \alpha + \delta_{Z_T}^\Gamma \cdot \sin \beta + Z_T;$$

получим

$$L^2 = (L \cdot \sin \alpha - \delta_{Z_T}^\Gamma \cdot \cos \beta)^2 + (L \cdot \cos \alpha + \delta_{Z_T}^\Gamma \cdot \sin \beta + Z_T)^2.$$

После ряда преобразований и сокращений находим

$$(\delta_{Z_T}^\Gamma)^2 - [2L \sin(\alpha - \beta) - 2Z_T \sin \beta] \delta_{Z_T}^\Gamma + (Z_T^2 + 2LZ_T \cos \alpha) = 0. \quad (2)$$

Учитывая, что угол поворота редуктора $\varphi_{Z_T}^\Gamma$, вызванный положительным перемещением рамы тележки Z_T , отрицательный, после решения квадратного уравнения (2) определим величину перемещения точки A $\delta_{Z_T}^\Gamma$

$$\delta_{Z_T}^\Gamma = L \sin(\alpha - \beta) - Z_T \sin \beta - \sqrt{[L \sin(\alpha - \beta) - Z_T \sin \beta]^2 - (Z_T^2 + 2LZ_T \cos \alpha)}, \quad (3)$$

здесь α – угол наклона горизонтальной реактивной тяги AB к вертикали, проходящей через центр шарнирного соединения тяги с редуктором в точке A , положительный в том случае, если поворот центра шарнирного соединения редуктора с реактивной тягой A до совмещения с линией AB проходит в направлении принятого положительного угла поворота редуктора вокруг оси вращения колесной пары; β – угол наклона линии центров OA от вертикали, проходящей через ось вращения колесной пары, положительный, если поворот вертикальной линии, идущей через ось вращения колесной пары O до совмещения с линией центров OA , проходит в направлении приня-

того положительного угла поворота редуктора вокруг оси вращения колесной пары.

Анализ выражения (3) показывает, что величина перемещения точки соединения редуктора с реактивной тягой является функциональной зависимостью от нескольких переменных $\delta_{Z_T}^\Gamma = f(Z_T, \alpha, \beta, L)$.

Упростим выражение (3). Учитывая то, что α, β, L в конструкции практически постоянные, ограничимся первыми двумя членами при разложении функции $\delta_{Z_T}^\Gamma(Z_T)$ по степени Z_T в ряду Маклорена. Получим более удобное для анализа выражение

$$\delta_{Z_T}^\Gamma = \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha - \beta)} Z_T + \left(\frac{1}{2L \sin(\alpha - \beta)} + \frac{\sin \beta \cdot \cos \alpha}{L \sin^2(\alpha - \beta)} + \frac{\cos^2 \alpha}{2L \sin^3(\alpha - \beta)} \right) Z_T^2. \quad (4)$$

В теоретических исследованиях [9, 10, 13] доказано, что при расположении реактивной тяги с углом $\beta = 0^\circ$ поворот осевого редуктора от вертикальных перемещений колесной пары отсутствует. Однако в действительности угол поворота осевого редуктора, вызванный вертикальными перемещениями тележки Z_T , во многом зависит от ранее принятых условий (1), т. е. от расстояния H и длины самой реактивной тяги L . Если это так, то угол поворота осевого редуктора определяется так же, как и в работе [6]:

$$\phi_{Z_T}^\Gamma = \frac{1}{2HL} Z_T^2. \quad (5)$$

Исследование и анализ зависимости кинематических перемещений реактивной тяги осевого редуктора с технологическими погрешностями изготовления и при сборке тягового привода локомотива

На практике линейные размеры элементов тягового привода, включая колесную пару,

реактивную тягу, амортизаторы, корпус и другие детали осевого редуктора имеют отклонения от номинальных значений в пределах технических допусков и норм [11, 14]. Поэтому при сборке тягового привода возможны комбинации их сочленения, которые будут нарушать горизонтальность установки реактивной тяги, а углы $\alpha \neq 90^\circ$ и $\beta \neq 0^\circ$. На рис. 3 показаны возможные схемы крепления реактивной тяги и осевого редуктора в раме тележки с возможными отклонениями линейных размеров от технологических допусков при выполнении условия (3).

Анализ схем крепления реактивных тяг и осевого редуктора в раме тележки показывает, что все возможные варианты отклонения этих деталей от идеального положения в приводе можно объединить и показать двумя характерными схемами (рис. 4).

Граничные допуски углов α и β для варианта I:

$$\arcsin \frac{e}{H+L} < |\alpha| < 180^\circ - \arcsin \frac{e}{H+L}, \quad (6)$$

$$0^\circ < |\beta| < \arcsin \frac{e}{H+L};$$

для варианта II:

$$\arcsin \frac{e}{H} < |\alpha| < 180^\circ - \arcsin \frac{e}{L}, \quad (7)$$

$$0^\circ < |\beta| < \arcsin \frac{L-e}{H}.$$

На рис. 5 и 6 приведены зависимости $\delta_{Z_T}^\Gamma(Z_T)$ и $\delta_{Z_T}^\Gamma(L)$ для редуктора с идеально установленной горизонтальной реактивной тягой ($\alpha = 90^\circ$ и $\beta = 0^\circ$), построенные по формуле

$$\delta_{Z_T}^\Gamma = \frac{1}{2L} Z_T^2. \quad (8)$$

Анализ выражений (4), (5), (8) и рис. 5, 6 показал, что:

1) исследованные зависимости не линейны;

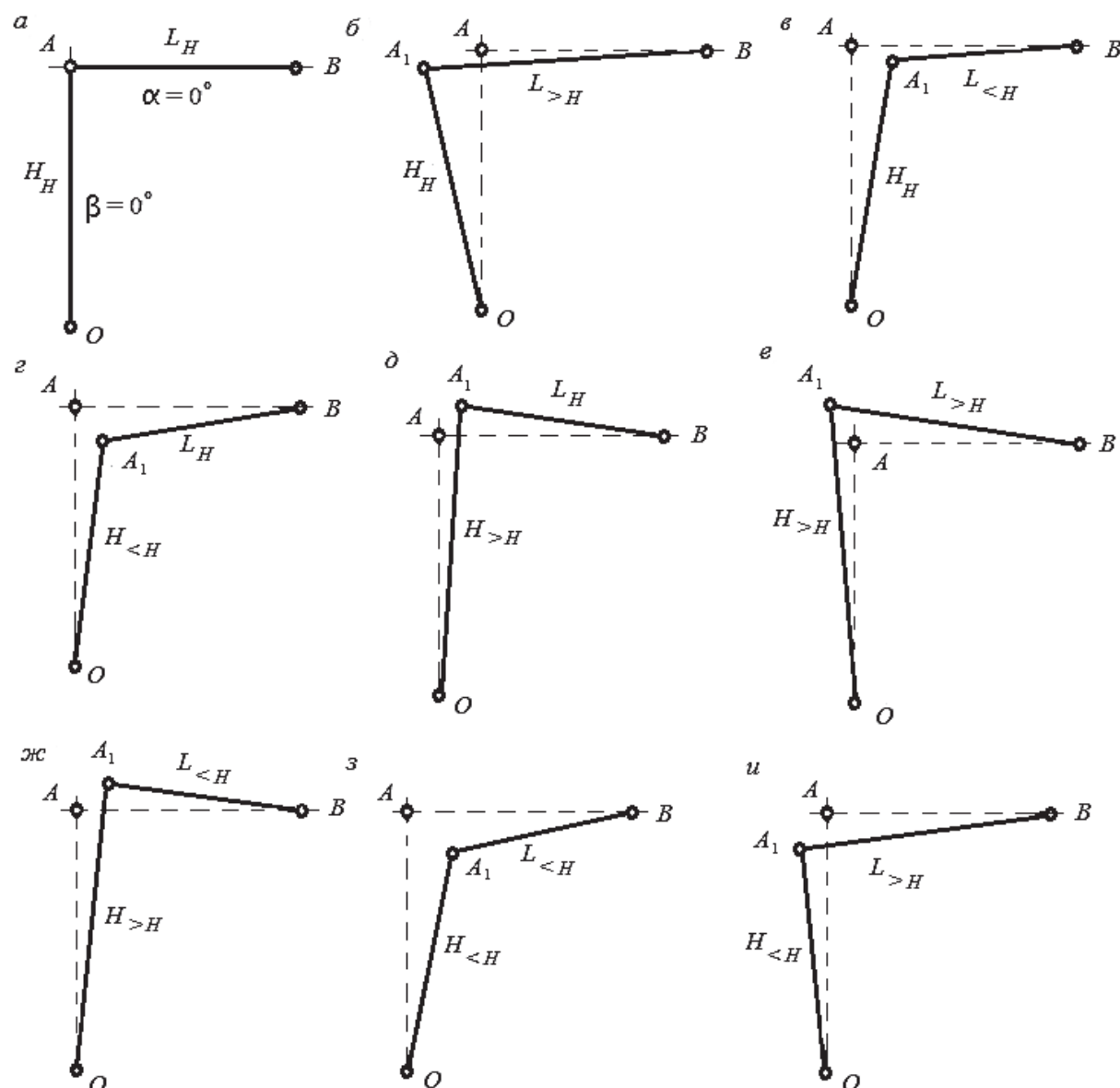


Рис. 3. Схемы крепления реактивной тяги осевого редуктора при условии $OA = H = idem$ и $AB = L = idem$:

H_H, L_H – линия центров OA и длина реактивной тяги AB соответствуют номинальным значениям технических норм установки, $H_{<H}, L_{<H}$ – меньше, $H_{>H}, L_{>H}$ – больше; а – при H_H, L_H ; б – при $H_H, L_{>H}$; в – при $H_H, L_{<H}$; г – при $H_{<H}, L_H$; д – при $H_{>H}, L_H$; е – при $H_{>H}, L_{>H}$; ж – при $H_{>H}, L_{<H}$; з – при $H_{<H}, L_{<H}$; и – при $H_{<H}, L_{>H}$

2) из возможных схем расположения горизонтальной реактивной тяги редуктора с технологическими погрешностями их установки, представленных на рис. 3, достаточно рассмотреть два общих случая, которые приведены на рис. 4;

3) выражение (4) справедливо для варианта I. Для варианта II величину $\delta_{Z_T}^{\Gamma}$ можно определить из этого выражения, если угол β заменить на $-\beta$, так как его направление не совпадает с положительным направлением поворота редуктора $\delta_{Z_T}^{\Gamma}$:

$$\delta_{Z_T}^{\Gamma} = \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} Z_T + \left(\frac{1}{2L \sin(\alpha + \beta)} + \frac{\sin \beta \cdot \cos \alpha}{L \sin^2(\alpha + \beta)} + \frac{\cos^2 \alpha}{2L \sin^3(\alpha + \beta)} \right) Z_T^2; \quad (9)$$

4) определены граничные значения (6), (7) для углов α и β , в пределах изменения которых справедливы полученные формулы для рас-

чета величин перемещения точки крепления редуктора с тягой;

5) значение $\delta_{Z_T}^{\Gamma}$ зависит от длины реактивной тяги L ;

6) функция $\delta_{Z_T}^{\Gamma}$ положительна при аргументе $\pm Z_T$, так как выражение (8) является уравнением параболы, симметричной относительно оси ординат с вершиной в начале координат;

7) зависимость перемещения точки A (см. на рис. 2) крепления реактивной тяги к осе-

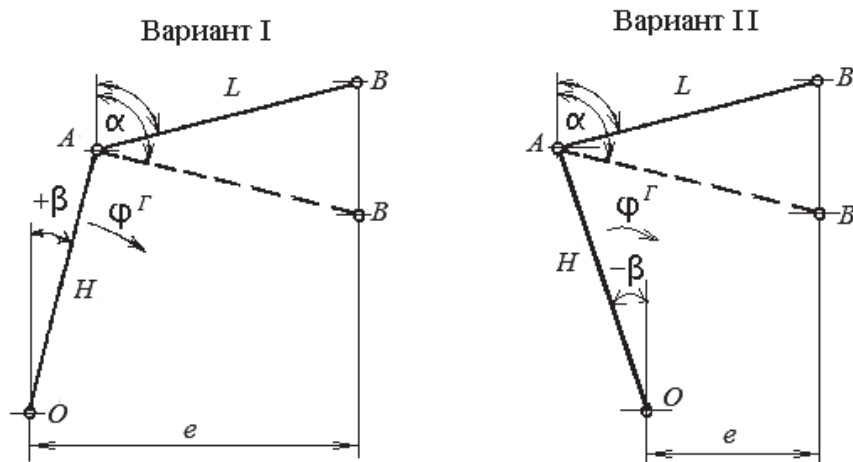


Рис. 4. Варианты схем пространственного перемещения горизонтальных реактивных тяг и осевого редуктора в раме ходовой тележки локомотива

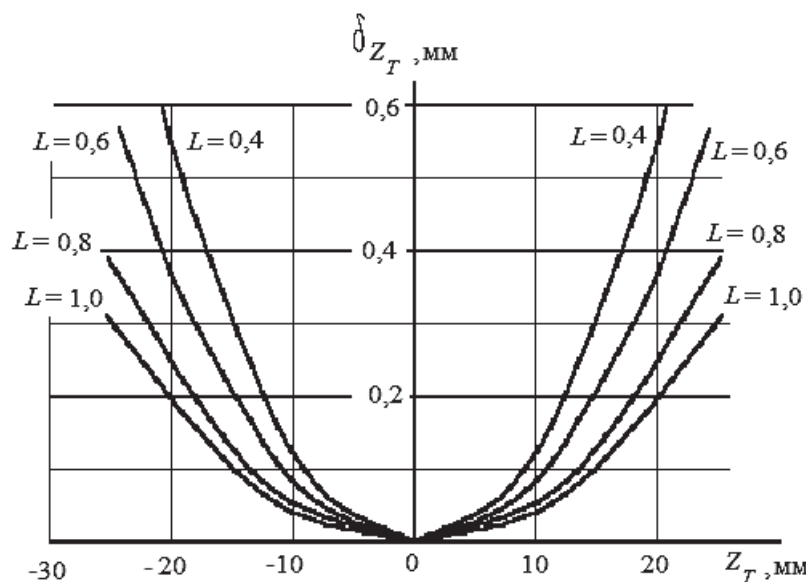


Рис. 5. Зависимости перемещения точки крепления идеально установленной горизонтальной реактивной тяги $\delta_{Z_T}^{\Gamma}$ от вертикальных перемещений рамы тележки $\pm Z_T$

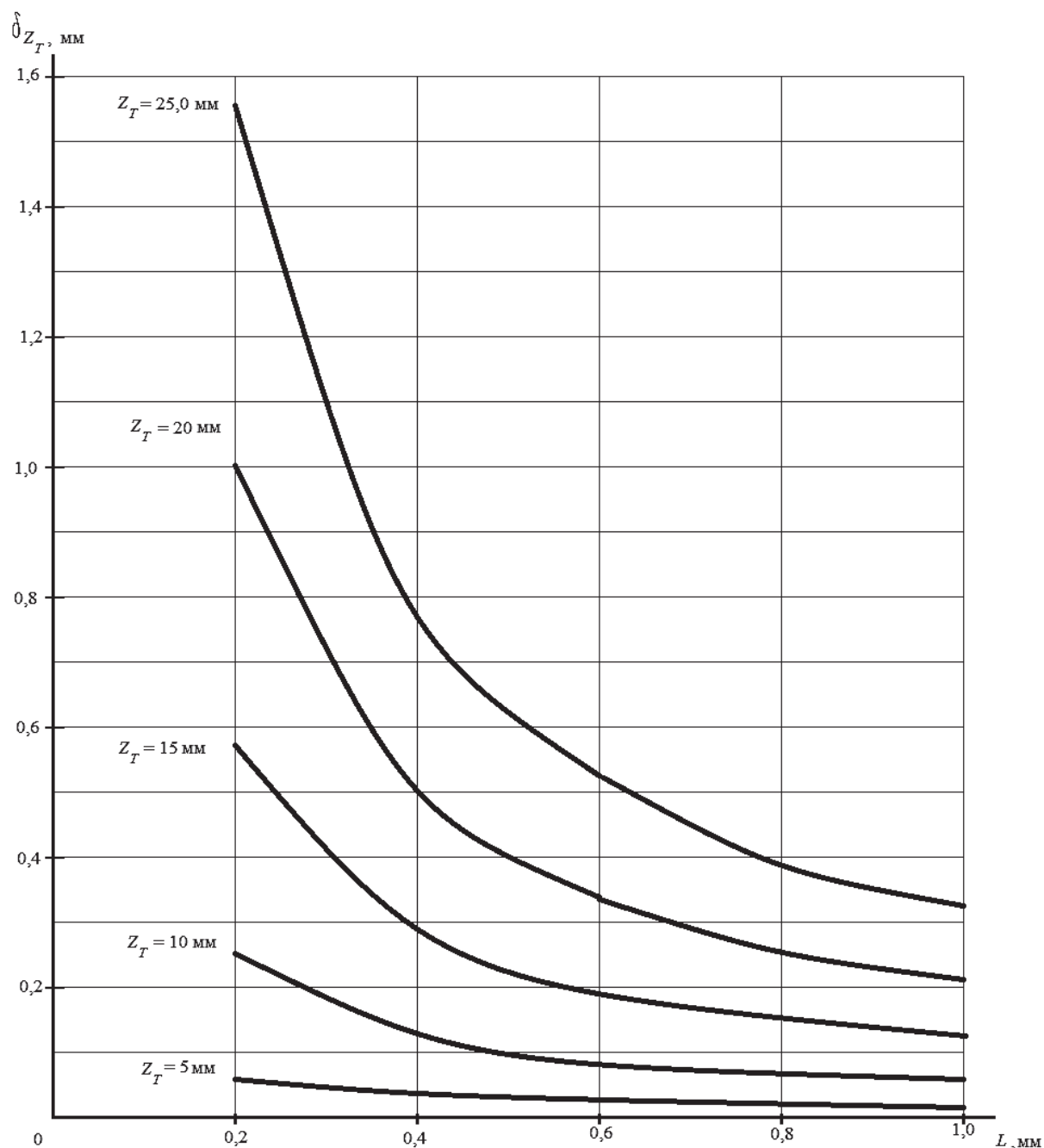


Рис. 6. Зависимости перемещения точки крепления идеально установленной горизонтальной реактивной тяги осевого редуктора от ее длины L

вому редуктору $\delta_{Z_T}^\Gamma = f(Z_T)$ (4) и (9) от вертикальных перемещений рамы тележки Z_T (рис. 5, 6) представляет квадратичную функцию и может быть записана в следующем виде:

$$\delta_{Z_T}^\Gamma = a_Z \cdot z_T + b_Z \cdot z_T^2, \quad (10)$$

где a_z, b_z – коэффициенты линейного и квадратичного членов функции

$$a_Z = \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha \mp \beta)},$$

$$b_Z = \frac{1}{2L \sin(\alpha \mp \beta)} \mp \frac{\sin \beta \cos \alpha}{L \sin^2(\alpha \mp \beta)} +$$

$$+\frac{\cos^2 \alpha}{2L \sin^3(\alpha \mp \beta)}. \quad (11)$$

Для варианта I схемы расположения реактивной тяги редуктора (см. рис. 4) соответствует знак «минус», а для варианта II – «плюс».

Рассмотрим несколько частных случаев расположения реактивной тяги:

а. Идеальное горизонтальное расположение реактивной тяги, т.е. $\alpha = 90^\circ$ и $\beta = 0^\circ$. Тогда коэффициенты линейного и квадратичного членов функции (10) равны

$$a_Z = 0, \quad b_Z = \frac{1}{2L}.$$

Угол поворота осевого редуктора при таком положении тяги и линии центров редуктора определяется формулой

$$\varphi_{Z_T}^r = \frac{1}{2HL} Z_T^2. \quad (12)$$

Отметим следующее: полученная формула (12) совпадает с представленной в работе [14].

б. Промежуточное расположение реактивной тяги, т.е. $\alpha = 90^\circ$ и $\beta \neq 0^\circ$. Тогда

$$a_Z = 0, \quad b_Z = \frac{1}{2L \cos \beta}.$$

в. Промежуточное расположение реактивной тяги, т.е. $\alpha \neq 90^\circ$ и $\beta = 0^\circ$. Тогда

$$a_Z = \operatorname{ctg} \alpha, \quad b_Z = \frac{1}{2L \sin^3 \alpha}.$$

Анализ выражений (10) и (11) показывает, что с увеличением отклонения реактивной тяги от горизонтали ($\alpha \neq 90^\circ$) и линии центров редуктора от вертикали ($\beta \neq 0^\circ$) коэффициенты a_Z и b_Z растут, что приводит к большим линейным и угловым перемещениям $\delta_{Z_T}^r$ и $\varphi_{Z_T}^r$ реактивной тяги. В качестве примера на рис. 7 показаны реальные перемещения точки A соединения осевого редуктора с горизонтальной реактивной тягой $\delta_{Z_K}^r$ при $\alpha = 85^\circ$ и $\beta = 5^\circ$ от вертикальных перемещений рамы

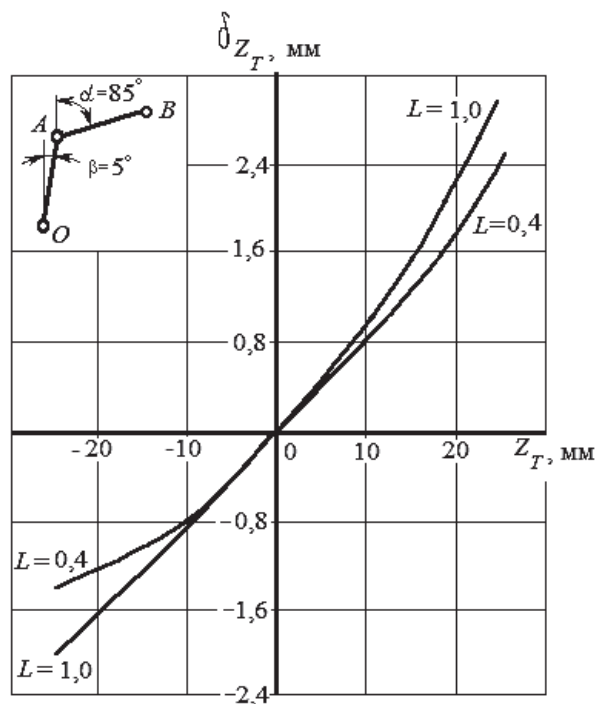


Рис. 7. Зависимость перемещения точки A соединения осевого редуктора с горизонтальной реактивной тягой $\delta_{Z_K}^r$ при вертикальном перемещении рамы тележки Z_T и от ее длины L

тележки во время движения локомотива, а также от ее длины.

Заключение

Из рис. 5–7 следует, что в зависимости $\delta_{Z_T}^r(Z_T)$ и выражениях (11) преобладающее значение имеет линейный член этих функций, поэтому:

- 1) изменение направления вертикальных перемещений тележки на величину Z_T вызывает изменения знака функций $\delta_{Z_T}^r$ и, следовательно, направления поворота регулятора;
- 2) увеличивается линейность приведенных функциональных зависимостей. При $Z_T < 10$ мм эти зависимости можно считать линейными, а функцию $\delta_{Z_T}^r(L)$ не зависящей от длины L ;
- 3) незначительное отклонение тяги от идеального горизонтального положения вы-

зывает дополнительное увеличение угла поворота редуктора относительно оси вращения колесной пары при вертикальных перемещениях рамы тележки и колесной пары;

4) изменение величины перемещения точки соединения редуктора с реактивной тягой, когда $\alpha \neq 90^\circ$ и $\beta \neq 0^\circ$, от идеального положения может составлять от 1 до 9 раз для реальных значений L и H ;

5) на основе полученных зависимостей $\delta_{Z_T}^r(Z_T)$ и $\delta_{Z_T}^r(L)$ возможны расчет линейных перемещений, угловых скоростей и ускорений реактивной тяги и осевого редуктора колесной пары, а также создание рациональных и надежных конструкций карданного тягового привода колесных пар локомотивов с минимальными динамическими нагрузками на его элементы [15].

Библиографический список

1. Кручек В. А. Показатели тяговых свойств локомотивов с групповым приводом колесных пар / В. А. Кручек // Повышение надежности и эффективности локомотивов : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2002. – С. 56–61.
2. Развитие локомотивной тяги / под ред. Н. А. Фуфрянского, А. Н. Бевзенко. – М. : Транспорт, 1988. – 344 с.
3. Сабуров Ф. Ф. Эффективность применения группового привода колесных пар на тепловозах переменного тока / Ф. Ф. Сабуров, В. А. Кручек, А. Б. Удальцов // Межвуз. сб. науч. ст. – Гомель : БелИИЖТ, 1989. – С. 73–74.
4. Сабуров Ф. Ф. Исследование распределения тяговых нагрузок по колесным парам в групповом приводе тепловоза / Ф. Ф. Сабуров, В. А. Кручек, Г. И. Игнатенков // Повышение эффективности работы тепловозов. – Л. : ЛИИЖТ, 1983. – С. 28–33.
5. Собенин Л. А. Исследование вариантов карданного привода к осям колесных пар тепловоза / Л. А. Собенин, Ф. Ф. Сабуров // Сб. науч. тр. ЛИИЖТа. – Л. : ЛИИЖТ, 1970. – Вып. 309. – С. 84–91.
6. Шаройко П. М. Гидравлические передачи тепловозов / П. М. Шаройко, В. Т. Середа. – М. : Транспорт, 1969. – 160 с.
7. Логунов В. Н. Устройство тепловоза ТГМ6А / В. Н. Логунов, Л. Н. Кузнецов, Е. Н. Чебанов и др. – М. : Транспорт, 1981. – 287 с.
8. Крепгорский С. С. Вертикальные колебания надрессорного строения поддрессоренного строения подвижного состава и влияние их на путь / С. С. Крепгорский // Сб. науч. тр. ЦНИИ МПС. – 1956. – Вып. 152. – С. 25–31.
9. Бирюков И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. – М. : Транспорт, 1986. – 256 с.
10. Бирюков И. В. Об одной особенности группового привода с опорно-осевыми редукторами / И. В. Бирюков // Сб. науч. тр. МИИТа. – 1973. – Вып. 445. – С. 155–163.
11. Игнатенков Г. И. Влияние разницы в жесткостях амортизаторов реактивных тяг на тяговые возможности экипажа / Г. И. Игнатенков, Ф. Ф. Сабуров, В. А. Кручек // Повышение эффективности работы тепловозов. – Л. : ЛИИЖТ, 1986. – С. 42–45.
12. Кручек В. А. Кинематика тягового привода локомотивов / В. А. Кручек, А. В. Овчинников // Актуальные вопросы обеспечения войск (сил) в транспортном отношении : межвуз. сб. науч. тр. – СПб. : ВАТТ (ВТУ ЖДВ РФ), 2002. – Вып. 2. – С. 17–25.
13. Яблонский А. А. Курс теоретической механики / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – 16-е изд., стер. – М. : КНОРУ, 2011. – 608 с.
14. Бахолдин В. И. Исследование взаимодействия элементов группового привода колесных пар локомотивов : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / В. И. Бахолдин. – Л. : ЛИИЖТ, 1979. – 142 с.
15. Кручек В. А. Проблемы проектирования группового тягового привода колесных пар для локомотивов / В. А. Кручек // Локомотивы : межвуз. сб. науч. тр. – Ростов-н/Д. : РГУПС, 2002. – С. 6–12.

References

1. Kruchev V. A. Pokazately tyagovykh svoystv lokomotyvov s gruppovym pryvodom kolesnykh par [Indices of tractive features of locomotives with group wheelset gear]. *Coll. papers "Povysheniye nadezhnosti i effektivnosti lokomotivov"* [Safety and engines' effectiveness improvement]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2002, pp. 56–61. (In Russian)

2. *Razvitiye lokomotivnoy tyagy* [Locomotive traction development]. Ed. by N.A. Fufryanskogo, A. N. Bevzenko. Moscow, Transport Publ., 1988, 344 p. (In Russian)
3. Saburov F.F., Kruchek V.A. & Udaltsov A.B. Efektivnost primeneniya gruppovogo pryvoda kolesnykh par na teplovozhakh peremennogo toka [Application effectiveness of group wheelset gear in alternating-current diesel locomotives]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh statey* [Interuniversity Coll. Papers]. Gomel, BelIIZhT Publ., 1989, pp. 73–74. (In Russian)
4. Saburov F.F., Kruchek V.A. & Ignatenkov G.I. Issledovaniye raspredeleniya tyagovykh nagruzok po kolesnym param v gruppovom pryvode teplovoza [The study of distribution of tractional loads among wheelsets in diesel locomotive's group gear]. *Povyseniye effektivnosti raboty teplovozhov* [The improvement of effectiveness of diesel locomotives' functioning]. Leningrad, LIIZhT Publ., 1983, pp. 28–33. (In Russian)
5. Sobenin L.A. & Saburov F.F. Issledovaniye variantov kardannogo pryvoda k osyam kolesnykh par teplovoza [The study of options of cardan gear to axes of diesel locomotive's wheelset]. *Sbornik nauchnykh trudov LIIZhTa* [LIIZhT Coll. Sci. Papers]. Leningrad, LIIZhT Publ., 1970, issue 309, pp. 84–91. (In Russian)
6. Sharoyko P.M. & Sereda V.T. *Gidravlicheskiye peredachy teplovozhov* [Hydraulic gears of diesel locomotives]. Moscow, Transport Publ., 1969, 160 p. (In Russian)
7. Logunov V.N., Kuznetsov L.N., Chabanov E.N. et al. *Ustroystvo teplovoza TGMbA* [The structure of TGMbA diesel locomotive]. Moscow, Transport Publ., 1981, 287 p. (In Russian)
8. Krepogorsky S.S. Vertykalnye kolebaniya nadressornogo stroeniya podressornogo stroeniya podvignogo sostava i vliyaniye ikh na put [Vertical oscillations of overspring structure and underspring structure of railway vehicles and their influence on the way]. *Sbornik nauchnykh trudov TsNII MPS* [Coll. Sci. Papers of TsNII MPS], 1956, issue 152, pp. 25–31. (In Russian)
9. Byrukov I.V., Belyaev A.I. & Rybnikov E.K. *Tyagovye peredachy elektropodvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [Traction gears of electromobile railway train]. Moscow, Transport Publ., 1986, 256 p. (In Russian)
10. Byrukov I.V. Ob odnoy osobennosti gruppovogo pryvoda s oporno-osevymy reduktorami [One of the specificities of a group gear with axial-support gears]. *Sbornik nauchnykh trudov MIITa* [Coll. Sci. Papers of MIIT], 1973, issue 445, pp. 155–163. (In Russian)
11. Ignatenkov G.I., Saburov F.F. & Kruchek V.A. Vliyaniye raznitsy v zhestkostiakh amortizatorov reaktivnykh tyag na tyagovye vozmozhnosti ekypazha [The impact of difference between the rigidity of suppressors on tractive capacity of a vehicle]. *Povyseniye effektivnosti raboty teplovozhov* [Effectiveness increase of diesel locomotive functioning]. Leningrad, LIIZhT Publ., 1986, pp. 42–45. (In Russian)
12. Kruchek V.A. & Ovchinnikov A.V. Kinematika tyagovogo pryvoda lokomotyvov [Locomotive's traction gear kinematics]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Aktualnye voprosy obespecheniya voisk (sil) v transportnom otnoshenii"* [Interuniversity Coll. Papers "Topical issues on the provision of troops (forces) with transport"]. Saint Petersburg, VATT (VTU ZhDVR RF) Publ., 2002, issue 2, pp. 17–25. (In Russian)
13. Yablonsky A.A. & Nikiforova A.A. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* [The course in theoretical mechanics]. Moscow, KNORU Publ., 2011, 608 p. (In Russian)
14. Bakhholdyn V.I. *Issledovaniye vzaimodeystviya elementov gruppovogo pryvoda kolesnykh par lokomotyvov* [The study of locomotive's group wheelset gear elements interworking]. Diss. abstract... Cand. Sci.: 05.22.07. Leningrad, LIIZhT Publ., 1979, 142 p. (In Russian)
15. Kruchek V.A. Problemy proektyrovaniya gruppovogo tyagovogo privoda kolesnykh par dlya lokomotivov [The construction issues of the group wheelset traction gear for locomotives]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Lokomotivy"* ["Locomotives" interuniversity Coll. Papers]. Rostov-on-Don, RGUPS Publ., 2002, pp. 6–12. (In Russian)

*КРУЧЕК Виктор Александрович – доктор техн. наук, профессор; ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.331

А. С. Мазнев, О. А. Степанская, О. И. Шатнев**СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ТОРМОЖЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ГОРОДСКОМ
ТРАНСПОРТЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА**

Дата поступления: 30.11.2016

Решение о публикации: 13.03.2017

Цель: Изучение возможностей внедрения рекуперативно-резисторного торможения с осуществлением рекуперации энергии торможения в тяговую аккумуляторную батарею на электроподвижном составе Петербургского метрополитена и применения в качестве приемника энергии торможения гибридных накопителей на городском наземном электротранспорте. **Методы:** Проводились экспериментальные исследования по внедрению рекуперативно-резисторного торможения на различных типах подвижного состава ГУП «Петербургский метрополитен». Для изучения режимов торможения и пуска с использованием накопителей энергии применялось математическое моделирование. **Результаты:** Оборудование контактно-аккумуляторного электровоза схемой рекуперативно-резисторного торможения с осуществлением рекуперации энергии торможения в тяговую аккумуляторную батарею позволило: 1) определить потенциальные условия в силовой цепи тяговых двигателей для подключения блока рекуперации; 2) установить, что при рекуперации энергии торможения в аккумуляторную батарею ток заряда постоянен и мало зависит от начальной скорости торможения; 3) вычислить минимальную скорость торможения, при которой реализована рекуперация. При реализации рекуперативно-резисторного торможения на вагоне электропоезда ЕМ 6264 обнаружено, что на линиях всегда существует приемник энергии при подходе к станции и на затяжных спусках; ток рекуперации нестабилен (в случае диодной схемы), так как режим работы электроподвижного состава в качестве приемника энергии имеет вероятностный характер. Токораспределение в системе электроснабжения зависит от графика движения и режима ведения электроподвижного состава. **Практическая значимость:** Для повышения эффективности рекуперативного торможения предлагается на подвижном составе применить емкостные накопители энергии нового поколения, что позволит аккумулировать энергию торможения, а затем использовать ее в режиме пуска без передачи энергии рекуперации в тяговую сеть. Внедрение гибридных накопителей в качестве приемников энергии на наземном городском электротранспорте даст возможность запасать энергию торможения в блоке аккумуляторных батарей и осуществлять автономный ход.

Ключевые слова: Рекуперации энергии торможения подвижного состава, рекуперативно-резисторное торможение, накопители энергии, городской электротранспорт.

Alexander S. Maznev, D. Sci., professor; ***Olga A. Stepankaya**, Cand. Sci., associate professor, step_step@mail.ru; **Oleg N. Shatnev**, Cand. Sci., associate professor, sholeg@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) **RECUPERATION SYSTEMS OF ELECTROMOBILE TRAIN STOPPING POWER IN URBAN TRANSPORT OF SAINT PETERSBURG**

Objective: To study adaption options of resistor-recuperative stopping power to traction battery on electric mobile train at St. Petersburg subway and to apply it as a stopping power receiver of hybrid accumulator in urban surface transport. **Methods:** Experimental research was held on adaption of resistor-recuperative stopping on various types of mobile trains at SUE “St. Petersburg subway” Mathematical

modeling was applied to study breaking and starting modes with the usage of energy accumulators. **Results:** The use of the equipment of contact-accumulator electric mobile train by resistor-recuperative stopping scheme with realization of stopping power recuperation to traction battery allowed to: 1) identify potential conditions in power train traction engines to cut in recuperation block; 2) determine that during recuperation of stopping power in accumulator, charging rate is current and hardly depends on initial stopping speed; 3) calculate the minimal stopping speed, during which recuperation was realized. In the process of recuperative-resistor brake action on EM 6264 electric mobile car it was detected that there is always an energy receiver on the lines when getting to the station and during slow descending; recuperation current is unstable (in case of diode circuit), since the operation mode of electric mobile train as the energy receiver is of probabilistic nature. Current distribution in the system of power supply depends on train schedule and driving mode of electric mobile train. **Practical importance:** To boost the effectiveness of recuperative breaking it is suggested to apply capacitive energy storage of the new generation on mobile train, which will allow to accumulate stopping power, and then to use it in the starting mode without recuperation energy transmission into tractive circuit. The implementation of hybrid accumulators as energy receivers in surface urban electric transport will allow to accumulate stopping power in battery accumulator pack and implement autonomous mode.

Keywords: Mobile train stopping power recuperation, resistor-recuperative stopping, energy accumulators, urban electric transport.

В настоящее время экономия электроэнергии в условиях постоянного роста тарифов на нее играет важную роль, особенно для предприятий городского электрического транспорта, являющихся наиболее энергоемкими потребителями [1]. К эффективным способам экономии энергии относится использование на электроподвижном составе (ЭПС) рекуперативного торможения. Теоретические и экспериментальные работы позволили создать отечественный ЭПС с рекуперативным и рекуперативно-реостатным торможением [2, 3].

Современное развитие систем рекуперативного торможения на ЭПС связано с внедрением плавного регулирования напряжения коллекторных двигателей, а также применения асинхронного тягового привода. Однако с введением режима рекуперативного торможения возникает проблема использования энергии рекуперации.

Известно, что процесс рекуперативного торможения имеет стохастический характер, так как эффективное взаимодействие тормозящего ЭПС и отбора тяговой энергии зависит от большого числа случайных факторов и предусматривает согласование рекуперированной и потребляемой энергии для поддер-

жания требуемой силы торможения. Для эффективного решения проблемы рекуперации необходимы в каждом случае продуманные решения, связанные с преобразованием энергетического потока.

При рекуперативном торможении поезд работает параллельно с тяговыми агрегатами подстанций. Эта особенность определяет условия работы всей системы электроснабжения [4].

Для метрополитена выявление условий, обеспечивающих лучшее использование энергии электрического торможения, а также влияние рекуперации на режимы электроснабжения поездов, является актуальной задачей [5].

Варианты приема рекуперативной энергии можно представить в следующем порядке:

- энергия передается в энергосистему, питающую подстанции метрополитена (на шины 6 или 10 кВ) с помощью инверторов;
- энергия передается в сеть 380 В потребителей собственных нужд метрополитена;
- преобразование электрической энергии в другие виды энергии (нагрев воды, расходуемой на хозяйственные нужды);
- потребление энергии непосредственно ЭПС в тяговом режиме;

– применение на ЭПС или в системе электроснабжения накопителей энергии [6–8].

Начиная с 1997 г. на ЭПС Петербургского метрополитена проводились работы по внедрению рекуперативно-резисторного торможения [9, 10].

На первом этапе схемой рекуперативно-резисторного торможения был оборудован контактно-аккумуляторный электровоз. Рекуперация энергии торможения осуществлялась в тяговую аккумуляторную батарею. Внедрение схемы рекуперативно-резисторного торможения позволило получить следующие результаты:

– достигнута устойчивая работа системы рекуперативно-резисторного торможения, ток рекуперации составил 23 % от полного тока торможения;

– при рекуперации энергии торможения в аккумуляторную батарею ток заряда по-

стоянен и мало зависит от начальной скорости торможения (рис. 1);

– минимальная скорость торможения, при которой реализована рекуперация, – 15 км/ч;

– для расширения диапазона скоростей начала рекуперативного торможения аккумуляторная батарея была разделена на две секции, что позволило снизить напряжение приемника энергии (аккумуляторной батареи) до 220–230 В;

– в тяговом режиме в среднем снижение емкости тяговой батареи равно 3,93 А/ч на 1 км пройденного пути. В этом случае предельное расстояние для электровоза составляет 60 км, при этом емкость батареи снижается до 380 А/ч, а напряжение аккумуляторной батареи уменьшается на 80 В. Применение рекуперации увеличило величину зарядной емкости в течение рабочего цикла на 12 % от максимальной емкости аккумуляторной бата-

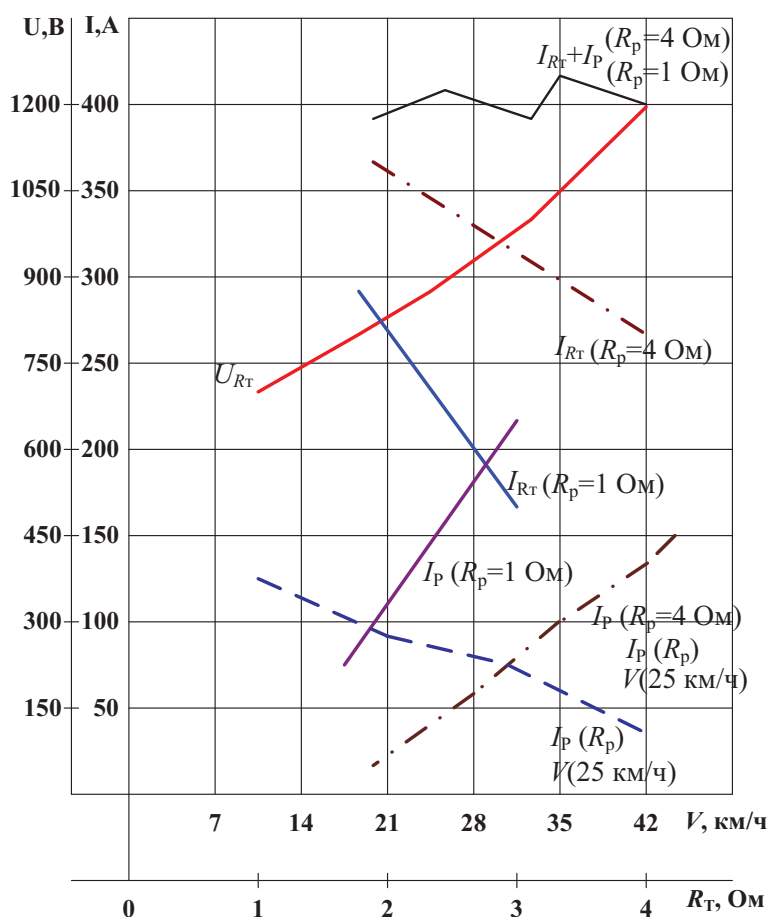


Рис. 1. Результаты исследования режима рекуперации контактно-аккумуляторных электровозов

реи, что позволило увеличить длину пробега электровоза в среднем на 12 км;

– для снижения скорости торможения, при которой возможна рекуперация, следует использовать импульсный регулятор [11].

Для определения и обоснования точки подключения контура рекуперации применительно к вагонам метрополитена и контакторно-аккумуляторным электровозам был проведен анализ потенциальных условий в силовой цепи тяговых двигателей. При разработке учитывалось, что для возврата энергии торможения в контактную сеть необходимо согласовать напряжения на тяговых двигателях и контактной сети. Контур рекуперации можно подключить через диод (диодный мост) либо к точкам соединения якорей и обмоток возбуждения, либо к тормозному сопротивлению.

Для схемы, представленной на рис. 2, исходная система уравнений без регулирования поля имеет вид

$$\begin{aligned} 4E &= U_D + I_T R_T + I_P R_P, \\ 2E &= I_T R_T + I_B R_B, \\ I_P &= I_A - I_B, \\ I_T &= I_A + I_B. \end{aligned} \quad (1)$$

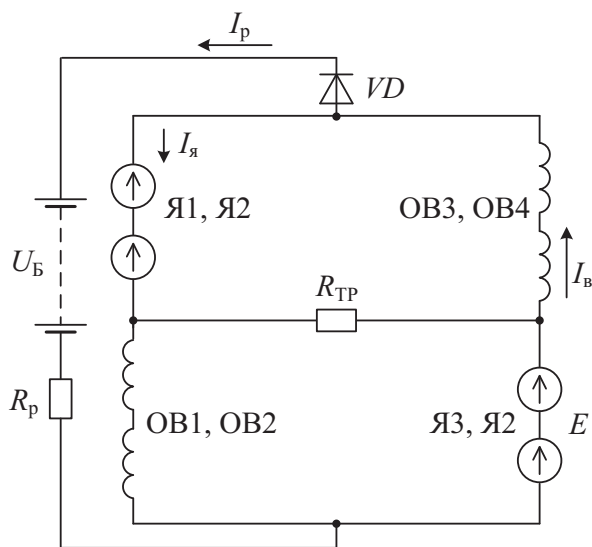


Рис. 2. Схема подключения контура рекуперации к якорям тяговых двигателей

В этой системе уравнений $E = C\Phi V$ – ЭДС вращения тягового двигателя, I_P , I_B , I_T , I_A – токи контуров рекуперации, возбуждения, тормозного резистора и якоря соответственно, R_T , R_P , R_B – сопротивления тормозного резистора, контура рекуперации и обмоток возбуждения.

При составлении системы уравнений (1) сделан ряд допущений. Падение напряжения на обмотках якоря и дополнительных полюсов включены в ЭДС вращения тягового двигателя.

В результате решения системы уравнений относительно тока якоря и тока возбуждения соответственно получим

$$\begin{aligned} I_A &= 2E - I_B (R_T + R_B)/R_T, \\ I_B &= \frac{U - 2E \cdot \left(1 - \frac{R_P}{R_T}\right)}{\frac{R_B}{R_T}(R_T + R_P) + 2R_P}. \end{aligned} \quad (2)$$

Анализ работы силовой электрической схемы в режиме торможения проведен с использованием полученных аналитических выражений (2). При $R_P = 0$ ток возбуждения запишем следующим образом:

$$I_B = (U - I_A R_T)/(R_T + 2R_B).$$

Исходными параметрами для расчета электромеханических и тормозных характеристик, представленных на рис. 3, являются ток якоря I_A и кривая намагничивания (рис. 4).

Если $R_P \rightarrow \infty$, то выражения для тока возбуждения и тока якоря соответственно примут вид

$$I_B = \lim_{R_P \rightarrow \infty} \frac{U - 2E(1 - \frac{R_P}{R_T})}{\frac{R_B}{R_T}(R_T + R_P) + 2R_P} \cdot \frac{2E}{R_B + 2R_T},$$

откуда $2E = I_B (R_B + 2R_T)$, $I_A = I_B$.

Из уравнения (2) следует, что в данном случае токи якоря и обмотки возбуждения равны,

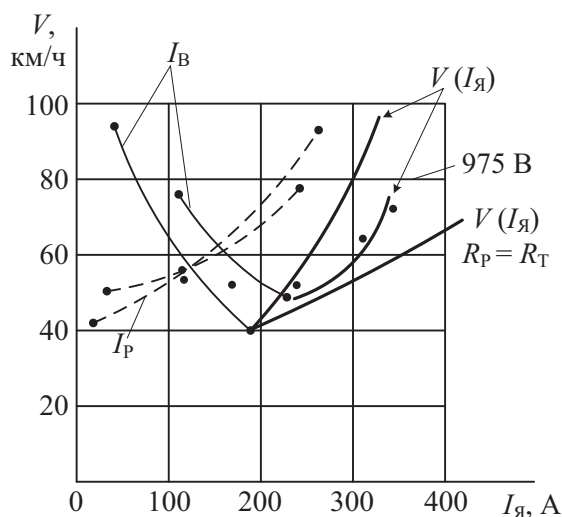


Рис. 3. Тормозная характеристика скорости вагона метрополитена

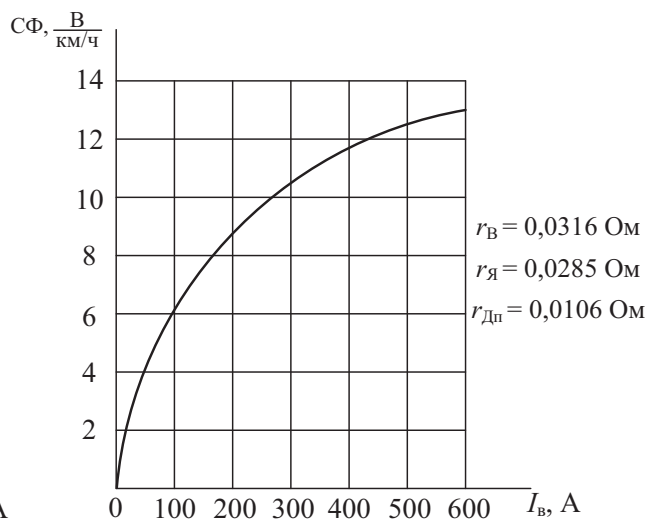


Рис. 4. Кривая намагничивания тягового двигателя вагона 81-717

а это соответствует работе схемы в режиме реостатного торможения.

Ток якоря в схеме рекуперативно-резисторного торможения – величина постоянная, потому система уравнений (1) решается относительно тока рекуперации:

$$I_p = \frac{I_{\text{я}} - \frac{U_D}{2R_T}}{\left(\frac{R_p}{2R_T} + 0,5\right)}.$$

Сопротивление контура рекуперации может изменяться от $0 < R_p < \infty$. При $R_p = 0$ ток рекуперации будет определяться сопротивлением R_T и с учетом подключения контура рекуперации через ключевой элемент (диод) потенциальными условиями на аноде и катоде диода:

$$I_p = \frac{2I_2 R_T - U_D}{R_T}, \quad I_p > 0,$$

если $(2I_2 - I_p)R_T \geq U_D$.

В этом случае ток рекуперации не зависит от скорости торможения. При $R_T = R_p$ ток рекуперации

$$I_p = I_{\text{я}} - \frac{U_D}{2R_T} = \frac{2I_{\text{я}} R_T - U_D}{2R_T},$$

т.е. он уменьшится в 2 раза по сравнению с полученным в предыдущем случае.

При $R_p = \infty$ ток рекуперации $I_p = 0$ (отсутствие приемника энергии), что соответствует реостатному торможению.

Предлагаемая схема рекуперативно-резисторного торможения может эффективно применяться, если параметры приемника энергии (ток, напряжение) и ток тяговых двигателей рекуперирующего ЭПС постоянны, а ток рекуперации и реализуемые тормозные усилия во всем диапазоне скоростей одинаковы. Результаты проведенных испытаний и эксплуатация контактно-аккумуляторного электроваза подтвердили правильность предлагаемых схемных решений.

На следующем этапе работ рекуперативно-резисторное торможение было реализовано на моторном вагоне ЕМ 6264. Схема торможения была дополнена защитой от аварийных режимов, которая позволяет отключать блок рекуперации и переводить силовую схему в штатный режим торможения.

Испытания, проведенные на всех линиях Петербургского метрополитена, позволили прийти к следующим выводам:

- на линиях метрополитена всегда существует приемник энергии;
- ток рекуперации не стабилен (в случае диодной схемы), так как режим приемника

В режиме торможения конденсаторный накопитель подключен по перекрестно-мостовой схеме с помощью импульсного преобразователя к двигателям вагона вместо тормозных резисторов. В этом случае зарядный ток конденсатора равен току рекуперированного вагона электропоезда, при этом напряжение на конденсаторе будет возрастать по линейному закону:

$$u_c = U_{x,x} + (I_{рек} / C) \cdot t_p,$$

где t_p – продолжительность рекуперации, с.

До напряжения $U_{x,x}$ накопитель заряжается от зарядного источника.

Режим движения ЭПС позволяет эффективно рекуперировать энергию торможения в конденсаторный накопитель, а затем использовать накопленную энергию для разгона электропоезда.

Для исследования режимов торможения и пуска с помощью накопителя энергии была разработана компьютерная модель электропривода вагона серии 81-717. Результаты моделирования представлены в [12].

Для городского наземного электротранспорта самым перспективным вариантом также является установка накопителей энергии на ЭПС [13, 14]. Такой вариант обеспечивает ряд преимуществ:

- установка накопителей на ЭПС способствует минимизации падения напряжения, так как отсутствует передача накопленной энергии на расстояние;
- режим пуска будет осуществляться за счет накопителей, что исключает потери мощности;
- равномерная нагрузка будет препятствовать возникновению потенциалов между тяговыми подстанциями и перетоков;
- при отсутствии напряжения в тяговой сети появляется возможность выведения ЭПС с зоны, в которой отсутствует напряжение за счет накопленной электроэнергии.

Применение на городском наземном ЭПС асинхронного тягового привода и современных систем управления, в схемах которых

применены новейшие технологии, позволяет создавать дополнительные функциональные свойства, такие как возможность использования в качестве приемника энергии торможения гибридных накопителей.

Анализ типов накопителей показывает, что наиболее универсальным для ЭПС городского транспорта является накопитель энергии, состоящий из аккумуляторной батареи и конденсатора [15]. В качестве примера был рассмотрен трамвай ЛМ68-М2 с асинхронным приводом [16]. Силовая схема тягового привода представлена на рис. 6.

В схему дополнительно подключен блок рекуперации, который состоит из трех ключей, блока конденсаторов и тяговой аккумуляторной батареи. В режиме рекуперации замыкаются контакты $QF1$ и $QF2$, открывается тиристор $VT1$ и энергия торможения поступает в блок емкостных накопителей. Ток рекуперации поддерживается постоянным с помощью тягового преобразователя трамвая.

После завершения рекуперации открывается тиристор $VT3$ и осуществляется подзаряд тяговой аккумуляторной батареи. В режиме пуска контакты $QF1$ и $QF2$ разомкнуты, открывается тиристор $VT2$ и питание тягового привода осуществляется от тяговой аккумуляторной батареи. При достижении скорости 20 км/ч замыкаются контакты $QF1$ и $QF2$ и закрывается тиристор $VT2$. Питание тягового привода производится от контактной сети.

В данной системе становится возможным запасать энергию торможения в блоке аккумуляторных батарей и осуществлять автономный ход трамвая.

Библиографический список

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учебник для вузов ж.-д. транспорта / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Мазнев А. С. Электрические аппараты и цепи подвижного состава : учебник для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования.

ного образования / А. С. Мазнев, О. И. Шатнев. – М. : Академия, 2008. – 272 с.

3. Щербаков В. Г. Тяговые электрические машины : учебник / В. Г. Щербаков, А. Д. Петрушин, Б. И. Хомченко, В. И. Седов, С. А. Пахомин, А. С. Мазнев, П. Г. Колпахчан ; под ред. В. Г. Щербакова, А. Д. Петрушина. – М. : ФГБОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2016. – 641 с.

4. Тер-Оганов Э. В. Электроснабжение железных дорог : учебник для студентов УрГУПС / Э. В. Тер-Оганов, А. А. Пышкин. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. – 432 с.

5. Богданов А. А. Устройство и ремонт электропоездов метрополитена : учебник для ПТУ / А. А. Богданов, В. С. Гусев, Ю. Я. Могильнер, Э. А. Сементовский ; под ред. Э. А. Сементовского. – М. : Транспорт, 1991. – 335 с.

6. Иванов М. А. Молекулярные накопители электрической энергии на основе двойного электрического слоя / А. М. Иванов, А. Ф. Герасимов // Электричество. – 1991. – № 8. – С. 16–19.

7. Накопители энергии / сост. Д. А. Бут. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.

8. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии / сост. И. В. Пентегов. – Киев : Наукова думка, 1982. – 424 с.

9. Мазнев А. С. Применение энергонакопительных устройств на электроподвижном составе / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев // Транспорт Урала. – 2009. – № 2 (21). – С. 83–85.

10. Мазнев А. С. Применение рекуперативно-резисторного торможения на электрическом подвижном составе метрополитена / А. С. Мазнев, О. И. Шатнев, С. В. Рыбалко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 6. – С. 2–5.

11. Тиристорные импульсные преобразователи / сост. В. П. Феокистов, О. Г. Чаусов. – М. : Информэлектро, 1985. – 56 с.

12. Степанская О. А. Выбор варианта системы рекуперации энергии торможения электроподвижного состава на Петербургском метрополитене / О. А. Степанская, М. А. Шарпилова, О. И. Шатнев // Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте : материалы

пятого Междунар. симпозиума «Элтранс-2009». 20–23 октября 2009 года. – СПб. : ПГУПС, 2009. – С. 581–594.

13. Естафьев А. М. Применение суперконденсаторов на электрическом подвижном составе / А. М. Естафьев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2009. – № 1. – С. 16–19.

14. Васильев В. А. Анализ возможности применения емкостных накопителей энергии на электрическом подвижном составе / В. А. Васильев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – 2011. – Вып. 1. – С. 35–44.

15. Алексеев Е. Н. Конденсаторные накопители энергии для электроподвижного состава / Е. Н. Алексеев, Н. Н. Широченко, Н. С. Охотников, И. В. Ванин // Локомотив. – 2008. – № 8. – С. 31–33.

16. Руководство по эксплуатации вагона трамвайного пассажирского ЛМ68-М2 / сост. Н. М. Петров. – СПб. : ГУП «ГорЭлектроТранс», 2012. – 14 с.

References

1. Markvardt K. G. *Elektrosnabgeniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Electric supply of electrified railway]. Moscow, Transport Publ., 1982, 528 p. (In Russian)

2. Maznev A. S. & Shatnev O. I. *Elektricheskiye apparaty i tsepi podvizhnogo sostava* [Electric devices and electric circuits of a mobile train]. Moscow, Akademiya Publ., 2008, 272 p. (In Russian)

3. Sherbakov V. G., Petrushin A. D., Khomchenko B. I., Sedov V. I., Pakhomin S. A., Maznev A. S. & Kolpakhchyan P. G. *Tyagovye elektricheskyye mashyny* [Tractive electric engines]. Eds: V. G. Sherbakova, A. D. Petrushina. Moscow, FGBOU “Railway educational training center” Publ., 2016, 641 p. (In Russian)

4. Ter-Oganov E. V. & Pyshkin A. A. *Elektrosnabgeniye zheleznykh dorog* [Railway electric supply]. Yekaterinburg, UrGUPS Publ., 2014, 432 p. (In Russian)

5. Bogdanov A. A., Gusev V. S., Mogylner Y. Y. & Semenskoy E. A. *Ustroystvo i remont elektropoezdov metropolitena* [The structure and servicing of under-

ground railway electric trains]. Ed. by E.A. Sementkovsky. Moscow, Transport Publ., 1991, 335 p. (In Russian)

6. Ivanov M.A. & Gerasimov A.F. Molekulyarnye nakopitely elektricheskoy energii na osnove dvojnogo elektricheskogo sloya [Molecular electric power accumulators on the basis of double electrical layer]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1991, no. 8, pp. 16–19. (In Russian)

7. *Nakopitely energii* [Energy accumulators]. Comp. by D.A. But. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 400 p. (In Russian)

8. *Osnovy teorii zaryadnikh tsepey yemkostnikh nakopiteley energii* [Basic theory on charging circuits of capacitive energy storage]. Comp. by I.V. Pentegov. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982, 424 p. (In Russian)

9. Maznev A.S. & Yestafyev A.M. Primeneniye energonakopitelnykh ustroystv na elektropodvizhnom sostave [Application of energy accumulators on electric mobile train]. *Transport Urala*, 2009, no. 2 (21), pp. 83–85. (In Russian)

10. Maznev A.S., Shatnev O.I. & Rybalko S.V. Primeneniye rekuperativno-rezistornogo tormozheniya na elektricheskoy podvizhnoy sostave metropolitena [Application of resistor-recuperative stopping on underground electric mobile train]. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* [Electronics and electrical equipment for transport], 2014, no. 6, pp. 2–5. (In Russian)

11. *Tyristornyye impulsnyye preobrazovateli* [Thyristor pulse converters]. Comp. by V.P. Feoktystov, O.G. Chaurov. Moscow, Informelektro Publ., 1985, 56 p. (In Russian)

12. Stepanskaya O.A., Sharpylova M.A. & Shatnev O.I. Vybory variantov sistema rekuperatsii energii tormozheniya elektropodvizhnoy sostavy na Peter-

burgskom metropolitene [The options of stopping power recuperation of electric mobile train at St. Petersburg subway]. *Elektrifikatsiya, innovatsionnyye tekhnologii, skorostnoye i vysokoskorostnoye dvizheniye na zheleznodorozhnom transporte* [Railway transport electrification, innovation technologies, fast and high-speed traffic]. Materialy pyatogo mezhdunarodnogo simpoziuma “Eltrans-2009” – The materials of the 5th International workshop “Eltrans-2009”, 2009, Oct. 20–23. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2009, pp. 581–594. (In Russian)

13. Evstafiev A.M. Primeneniye superkondensatorov na elektricheskoy podvizhnoy sostave [The application of super capacitors on electric mobile train]. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* [Electronics and electrical equipment for transport], 2009, no. 1, pp. 16–19. (In Russian)

14. Vasiliev V.A. Analiz vozmozhnostey primeneniya yemkostnikh nakopiteley energii na elektricheskoy podvizhnoy sostave [The analysis of application possibilities of capacitive energy storage on electric mobile train]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobsheniya* [Proceedings of the Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2011, issue 1, pp. 35–44. (In Russian)

15. Alekseev E.N., Shyrochenko N.N., Okhotnykov N.S. & Vanyin I.V. Kondensatornyye nakopitely energii dlya elektropodvizhnogo sostava [Condensing energy storage systems for electric mobile train]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2008, no. 8, pp. 31–33. (In Russian)

16. *Rukovodstvo po ekspluatatsii vagona tramvaynogo passazhyrskogo LM68-M2* [Operation manual of LM68-M2 passenger tramcar]. Comp. by N.M. Petrov. Saint Petersburg, GUP “GorElektroTrans” Publ., 2012, 14 p. (In Russian)

МАЗНЕВ Александр Сергеевич – доктор техн. наук, профессор; *СТЕПАНСКАЯ Ольга Андреевна – канд. техн. наук, доцент, step_step@mail.ru; ШАТНЕВ Олег Игоревич – канд. техн. наук, доцент, sholeg@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.4.027.3

А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. Н. Комарова, А. В. Гусев**ОБОСНОВАНИЕ НАЗНАЧЕНИЯ МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО
ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА КОНСТРУКТИВНОГО ЗАПАСА ПРОГИБА
РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ**

Дата поступления: 20.01.2017

Решение о публикации: 13.03.2017

Цель: Определение коэффициента конструктивного запаса прогиба рессорного подвешивания $K_{зп}$ на примере тележек с различной силовой характеристикой рессорного подвешивания. Уточнение минимально допустимого значения $K_{зп}$ на основе проведенного в работе расчета. **Методы:** Построение графиков плотностей вероятности смыкания витков пружин подвешивания с использованием коэффициента вертикальной динамики, определенного аналитическим и эмпирическим методами и методом численного интегрирования уравнений движения вагона. **Результаты:** Приведенная методика расчета $K_{зп}$ позволила установить, что тележка с улучшенными показателями ходовых частей (со сниженным коэффициентом вертикальной динамики обрессоренных частей вагона) обеспечивает отсутствие смыкания витков пружин при $K_{зп} = 1,50$. **Практическая значимость:** Минимально допустимое значение $K_{зп}$ для тележек с улучшенными показателями ходовых частей по рассмотренной методике позволяет сделать заключение, что данные тележки могут иметь более низкое значение $K_{зп}$, чем указано в «Нормах для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» (далее – Нормы) [1] – 1,75, при этом обеспечивается отсутствие смыкания рабочих витков пружин.

Ключевые слова: Коэффициент конструктивного запаса прогиба, коэффициент вертикальной динамики обрессоренных частей вагона, коэффициент относительного трения, вероятность смыкания рабочих витков пружины, динамический прогиб, нелинейный пружинный комплект.

Anna M. Orlova, D. Sci., professor, aorlova@uniwagon.com (PAO “NPK OVK”); **Yekaterina A. Rudakova**, Cand. Sci., leading researcher, erudakova@tt-center.ru; **Anna N. Komarova**, Cand. Sci., researcher, ankomarova@mail.ru (All-Union Research and Development Centre for Transportation Technology LLC); ***Artem V. Gusev**, postgraduate student, agusev@tt-center.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University)

Objective: To estimate the coefficient of constructive deflection margin of springing $K_{зп}$ by example of four-wheel trucks with different load bearing characteristics of springing. To improve permissible minimum of $K_{зп}$ meaning on the basis of conducted calculations during the research. **Methods:** Construction of graphs on density of suspension spring coils closing probability with application of vertical dynamics coefficient, detected by analytical and empirical methods as well as the method of numerical integration of car motion equations. **Results:** The given calculating procedure of $K_{зп}$ allowed to determine that the car with the improved indices of trucks (with the decreased vertical dynamics coefficient of buffer-spring parts of a car) provides closing of spring coils absence when $K_{зп} = 1,50$. **Practical importance:** Permissible minimum of $K_{зп}$ for the carts with improved indices of trucks calculated, by means of the method in question, allows to conclude that the cars in question may have a lower $K_{зп}$ meaning than it is stated in “The norms for the calculation and designing of MPS railway cars with 1520 mm gauge (non-self-propelled)” (further – Norms) [1] – 1,75, at the same time the absence of working spring coils closing is provided.

Keywords: Coefficient of constructive deflection margin of springing, vertical dynamics coefficient of buffer-spring parts of a car, coefficient of relative friction, probability of working spring coils closing, dynamic deflection, non-linear spring set.

Введение

В России налажено производство и выпущены в эксплуатацию вагоны с повышенной до 25 тс осевой нагрузкой (свыше 40 тыс. вагонов), обладающие улучшенными характеристиками ходовых частей (тележки 18-194-1, 18-9836, 18-9855), которые приводят к улучшению показателей динамических качеств, воздействия на путь и повышению показателей безопасности движения по сравнению с тележкой 18-100 (осевая нагрузка 23,5 тс) [2]. Указанные преимущества обеспечиваются в том числе за счет применения рессорного подвешивания с нелинейной вертикальной силовой характеристикой [3].

Одним из параметров, характеризующих работу рессорного подвешивания, является коэффициент конструктивного запаса прогиба ($K_{зп}$), методы расчета которого и назначение допустимого значения применительно к нелинейным рессорным комплектам требуют актуализации.

Для обоснования назначения минимально допустимого значения $K_{зп}$ будет рассмотрена тележка с улучшенными характеристиками и

нелинейным пружинным комплектом с фрикционными гасителями колебаний (УХТ).

Методы расчета $K_{зп}$ для комплектов пружин с нелинейной силовой характеристикой

Физический смысл $K_{зп}$ и его расчет по номинальным характеристикам пружин подвешивания

Физический смысл $K_{зп}$ рессорного подвешивания заключается в том, чтобы рессорное подвешивание тележки при установке под вагон с максимальной расчетной массой (далее – грузеный вагон) обеспечивало наличие запаса прогиба до смыкания рабочих витков пружин.

В трехэлементных тележках с фрикционными гасителями (рис. 1) при действии на рессорное подвешивание статической нагрузки $P_{ст}$ сопротивление обеспечивается упругой силой $F_{уп}$, создаваемой жесткостью пружин, расположенных под наддрессорной балкой и клиньями, и силой трения во фрикционных

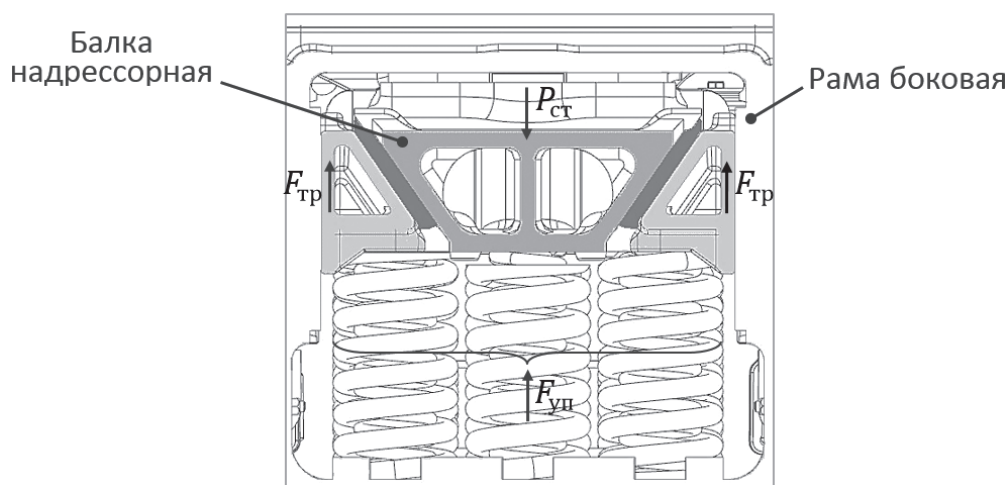


Рис. 1. Сопротивление рессорного подвешивания при действии вертикальной силы

клиньях $F_{тр}$, т.е. фактический прогиб подвешивания зависит в том числе от работы клиновой системы [4, 5].

Пример статической характеристики рессорного подвешивания трехэлементных тележек приведен на рис. 2.

Аналитически описать работу рессорного подвешивания с учетом трения можно переводом его из статического состояния в динамическое путем создания колебательного процесса [6].

Для этого при работе рессорного подвешивания в пределах линейного участка характеристики между точками A и B на рис. 2 необходимо приложить пульсирующую динамическую силу P_a , создающую вертикальные колебания с амплитудой прогиба f_a (цикл колебаний обозначен зеленым цветом). При этом динамическая сила будет рассчитываться по выражению

$$P_a = C_{\Sigma} \cdot f_a \pm 2F_{тр}, \quad (1)$$

где C_{Σ} – вертикальная жесткость пружинного комплекта; f_a – амплитуда прогиба (дина-

мический прогиб) пружинного комплекта; $F_{тр}$ – сила трения, создаваемая одним фрикционным клином.

Знак «плюс» в выражении (1) соответствует нагружению рессорного подвешивания, знак «минус» – разгрузке.

В уравнении (1) принято, что при малых перемещениях сила трения не определяется f_a , однако в более общем случае $F_{тр}$ является функцией зависимости от динамического прогиба и обуславливается поджатием клиновой системы [7].

Для рассматриваемого случая коэффициент вертикальной динамики обрессоренных частей вагона $K_{д.а}$ можно найти путем деления динамической силы на статическую нагрузку $P_{ст}$:

$$K_{д.а} = \frac{P_a}{P_{ст}} = \frac{f_a}{f_{бр}^p} \pm \varphi = K_{д}^{подв} \pm \varphi, \quad (2)$$

здесь $\varphi = \frac{2F_{тр}}{P_{ст}}$ – коэффициент относительного трения рессорного подвешивания; $f_{бр}^p = \frac{P_{ст}}{C_{\Sigma}}$ – расчетный прогиб рессорного под-

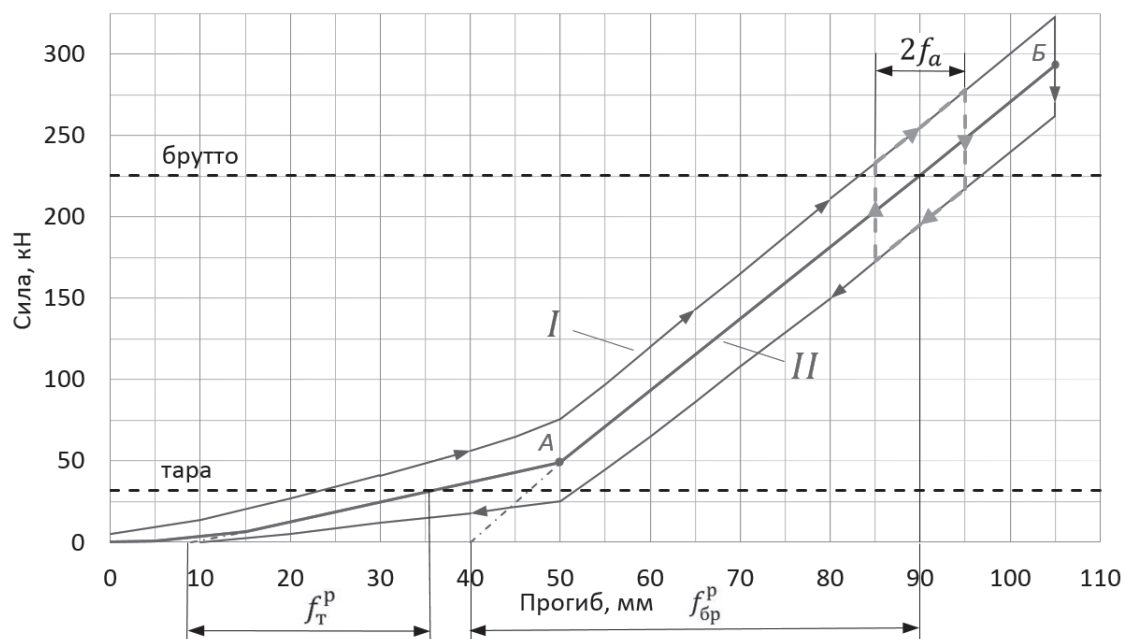


Рис. 2. Диаграмма нелинейной силовой характеристики рессорного подвешивания с учетом трения (I) и без него (II)

вешивания груженого вагона, который определяется без учета сил трения в подвешивании; $K_{\text{д}}^{\text{подв}}$ – коэффициент вертикальной динамики, устанавливаемый по прогибу подвешивания (отношение динамического прогиба к расчетному).

В случае, когда трение в подвешивании отсутствует ($\varphi \rightarrow 0$), динамический ход может быть ограничен только полным сжатием пружин. Это служит основным условием для определения коэффициента конструктивного запаса прогиба пружин.

При сжатии наибольшее значение f_a достигается при смыкании рабочих витков пружин (рис. 3), когда

$$f_a = f_{\text{см}} = H_{\text{св}} - H_{\text{сж}} - (f_{\text{бр}} - \Delta'), \quad (3)$$

где $f_{\text{см}}$ – динамический прогиб пружинного комплекта до смыкания рабочих витков пружин; $H_{\text{св}}$, $H_{\text{сж}}$ – высота пружины в свободном состоянии и при полном сжатии (до соприкосновения рабочих витков пружин) соответственно; $f_{\text{бр}}$ – полный прогиб рессорного подвешивания груженого вагона; Δ' – разность высот (в свободном состоянии) между самой высокой пружиной рессорного подвешивания и пружиной, для которой определяют запас прогиба.

Для любой пружины рессорного подвешивания в сжатом состоянии формулы (2) и (3) можно преобразовать к виду

$$K_{\text{д.см}} \big|_{\varphi=0} = K_{\text{зп}} - 1, \quad (4)$$

где $K_{\text{д.см}}$ – наибольший возможный коэффициент вертикальной динамики, соответствующий смыканию витков пружины рессорного комплекта при $\varphi = 0$; $K_{\text{зп}}$ – коэффициент конструктивного запаса прогиба

$$K_{\text{зп}} = 1 + \frac{H_{\text{св}} - H_{\text{сж}} - (f_{\text{бр}} - \Delta')}{f_{\text{бр}}^{\text{р}}}. \quad (5)$$

В соответствии с формулой (5) $K_{\text{зп}}$ каждой из пружин подвешивания находится без учета трения исходя из геометрических параметров пружин, полного и расчетного прогибов подвешивания. Соответственно возможный разброс величины $K_{\text{зп}}$ определяется полем допусков (при изготовлении) высоты пружины в свободном и сжатом состояниях, указанным в конструкторской документации, и отклонением полного и расчетного прогибов подвешивания, вызванным возможным изменением вертикальной жесткости пружин, на которую, в свою очередь, влияет поле допуска на изготовление таких геометрических размеров как диаметр прутка, средний диаметр пружины, рабочее число витков [8].

Согласно п. 7.3.3 Норм, в случае применения подвешивания с нелинейными характеристиками жесткости коэффициент конструктивного запаса прогиба определяется как отношение силы, соответствующей полному, допускаемому конструкцией, сжатию рессоры, к силе ее статического нагружения брутто.

В данном определении, если принимать, что рессора обладает свойством демпфирования, то $K_{\text{зп}}$ совпадает с коэффициентом вер-

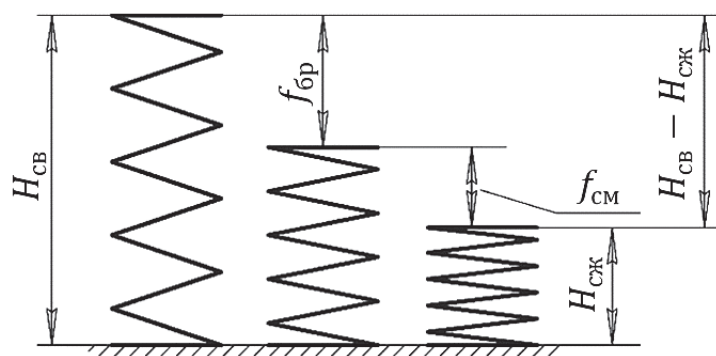


Рис. 3. Геометрические параметры пружины при сжатии

тикальной динамики обрессоренных частей вагона K_d . Выше показано: наличие запаса до полного сжатия пружин должно оцениваться без учета трения в подвешивании, что необходимо было бы указать в определении.

При установлении допустимого значения $K_{зп}$, согласно формуле (4), следует принимать во внимание наличие трения и выполнение условия

$$K_{зп} \geq 1 + \frac{f_d(\varphi)}{f_{бр}^p} = 1 + K_d^{подв}, \quad (6)$$

в котором $K_d^{подв}$ – коэффициент вертикальной динамики, определяемый по прогибу подвешивания (отношение динамического прогиба к расчетному), при движении подвижного состава по рельсовому пути связанный с работой клиновой системы и являющийся функцией зависимости от трения $f_d = f(\varphi)$. При этом необходимо отметить, что $K_d^{подв}$ не совпадает с коэффициентом вертикальной динамики обрессоренных частей вагона K_d , получаемым по результатам испытаний (отношение динамической силы к статической).

Таким образом, $K_{зп}$ должен быть достаточным для того, чтобы при суммарном статическом и динамическом прогибе подвешивания ($f_{ст} + f_d$), обусловленном неровностями пути и инерционными характеристиками обрессоренных частей вагона, отсутствовало смыкание витков.

На основе анализа работы рессорного подвешивания и аналитических выражений (4) – (6) можно заключить о невозможности пря-

мого сравнения $K_{зп}$ и K_d ($K_{зп} \neq K_d$). Минимально допустимое значение $K_{зп}$ должно назначаться только из условия (6).

Учет завышения и занижения фрикционных клиньев и допусков на геометрические размеры пружин при расчете $K_{зп}$

Несмотря на то, что расчеты характеристик рессорного подвешивания проводятся при номинальных величинах, на значение коэффициента конструктивного запаса прогиба подвешивания существенное влияние оказывает положение опорной поверхности фрикционного клина относительно опорной поверхности надрессорной балки, которое определяется, исходя из допусков на изготовление фрикционного клина, надрессорной балки и рессорного проема боковой рамы. Поэтому данный параметр должен рассчитываться с учетом допусков на изготовление и максимально возможного занижения $a_{зп}$ / завышения $a_{зв}$ опорной поверхности фрикционного клина относительно опорной поверхности надрессорной балки.

При нагружении вагона в зависимости от положения опорной поверхности клина относительно опорной поверхности надрессорной балки (рис. 4) изменяется прогиб пружин, расположенных под надрессорной балкой и клиньями [9].

Занижение опорной поверхности клина относительно опорной поверхности надрессорной балки (рис. 4, I) приводит к «увеличению»

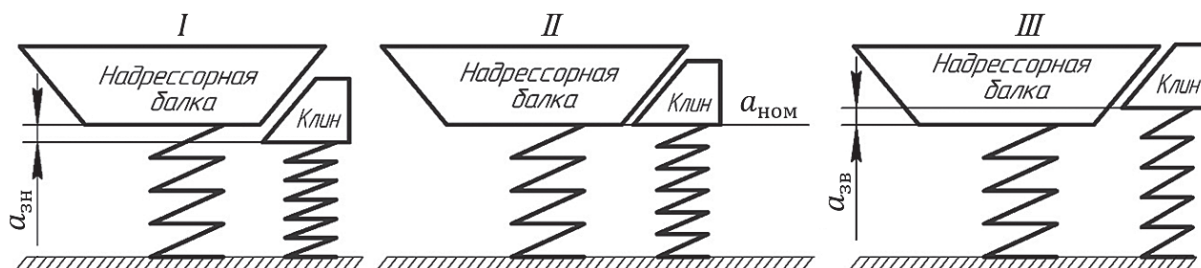


Рис. 4. Конструктивно возможное положение опорной поверхности клина относительно опорной поверхности надрессорной балки:

I – занижение; II – номинальное положение; III – завышение

прогиба подклиновых пружин (уменьшению $K_{зп}$) и «уменьшению» прогиба под наддрессорной балкой (увеличению $K_{зп}$), завышение (рис. 4, III) – к «уменьшению» прогиба подклиновых пружин (увеличению $K_{зп}$) и «увеличению» прогиба под наддрессорной балкой (уменьшению $K_{зп}$). Поэтому положение опорной поверхности клина оказывает различное влияние на $K_{зп}$ подклиновых пружин и под наддрессорной балкой.

Для сравнения $K_{зп}$ пружин тележек 18-100 и УХТ в табл. 1 приведены параметры пружин подвешивания (с учетом допусков) данных тележек.

Значения $K_{зп}$ для пружин подвешивания тележек 18-100 и УХТ с учетом приведенных допусков на геометрические размеры и различного положения опорной поверхности клина относительно опорной поверхности наддрессорной балки представлены в табл. 2. Как из нее следует, при наиболее неблагоприятных сочетаниях допусков на все пружины в комплекте и с учетом максимально возможного занижения опорной поверхности клина отно-

сительно опорной поверхности наддрессорной балки коэффициент конструктивного запаса прогиба подвешивания может уменьшиться на 17% относительно номинала.

Допускаемое Нормами значение $K_{зп}$ составляет 1,8 для тележки со статическим прогибом до 50 мм, что, предположительно, было получено на основе эмпирических зависимостей при испытаниях тележки 18-100 с линейной характеристикой рессорного подвешивания (статический прогиб тележки 18-100 равен 49 мм).

Результаты расчета $K_{зп}$ пружин тележки 18-100 (табл. 2) свидетельствуют, что значение 1,8 соответствует пружинам с номинальной жесткостью и с учетом допустимого занижения опорной поверхности клина относительно опорной поверхности наддрессорной балки. Однако стоит отметить, что при минимальной жесткости пружин (даже при $a_{ном} = 0$ мм) $K_{зп} < 1,8$ и при $a_{зн} = 12$ мм достигает 1,57.

Рассмотрим вопрос достаточности минимального значения $K_{зп}$ и выполнения условия (6) на примере тележки УХТ.

ТАБЛИЦА 1. Параметры пружин тележек 18-100 и УХТ

Пружина	Средний диаметр пружины, D , мм	Диаметр прутка пружины, d , мм	Число рабочих витков, n_p	Высота в свободном состоянии, l_0 , мм	Жесткость пружины, кН/м		
					минимальная	номинальная	максимальная
Тележка 18-100							
Наружная	$170^{+2,5}_{-2,71}$	$29_{-0,21}$	$3,9 \pm 0,13$	249 ± 2	332,12	369,13	400,72
Внутренняя	$111^{+1,71}_{-1,5}$	$20_{-0,21}$	$6,1 \pm 0,13$	249 ± 2	171,95	191,79	204,13
Тележка УХТ							
Наружная	$115^{+0,5}_{-0,63}$	$25_{-0,13}$	$5,64 \pm 0,25$	240^{+4}	413,64	446,86	475,35
Внутренняя	$73^{+0,61}_{-0,5}$	$14_{-0,11}$	$10,86 \pm 0,25$	275^{+4}	72,62	78,40	81,68
Наружная подклиновая	$118^{+0,5}_{-0,63}$	$22_{-0,13}$	$6,55 \pm 0,25$	285^{+4}	198,39	213,59	225,66
Внутренняя подклиновая	$79^{+0,61}_{-0,5}$	$14_{-0,11}$	$10,86 \pm 0,25$	290^{+4}	57,41	61,86	64,35

ТАБЛИЦА 2. Значения $K_{зп}$ для пружин тележек 18-100 и УХТ

Вертикальная жесткость пружины	Коэффициент конструктивного запаса прогиба пружин					
	18-100			УХТ		
	$a_{ном}^* = 0$ мм	$a_{зн} = 4$ мм	$a_{зн} = 12$ мм	$a_{ном} = 0$ мм	$a_{зн} = 7$ мм	$a_{зв} = 6$ мм
Наружная пружина						
Номинальная	1,998	2,019	2,062	1,641	1,659	1,626
Максимальная	2,271	2,294	2,340	1,946	1,965	1,930
Минимальная	1,716	1,735	1,774	1,424	1,440	1,410
Внутренняя пружина						
Номинальная	2,000	2,021	2,064	1,640	1,658	1,625
Максимальная	2,249	2,272	2,318	1,889	1,908	1,873
Минимальная	1,745	1,764	1,803	1,480	1,496	1,466
Наружная подклиновная пружина						
Номинальная	1,998	1,944	1,838	1,639	1,522	1,740
Максимальная	2,271	2,213	2,098	1,929	1,804	2,035
Минимальная	1,716	1,668	1,572	1,437	1,329	1,530
Внутренняя подклиновная пружина						
Номинальная	2,000	1,946	1,839	1,640	1,523	1,741
Максимальная	2,249	2,191	2,076	1,889	1,765	1,996
Минимальная	1,745	1,697	1,601	1,480	1,371	1,573

Примечание. В тележке 18-100 опорная поверхность клиньев рессорного комплекта ниже опорной поверхности надрессорной балки в пределах 4–12 мм.

Расчет вероятности смыкания витков пружин и назначение минимально допустимого значения коэффициента конструктивного запаса прогиба рессорного подвешивания

Смыкание витков пружин подвешивания может происходить в основных эксплуатационных режимах, к которым относятся:

- движение вагона в составе поезда по прямым и кривым участкам пути и стрелочным переводам с допускаемой скоростью, вплоть до конструкционной;
- осаживание и трогание тяжеловесного состава с места;

– соударение вагонов при маневрах, в том числе при роспуске с сортировочных горок.

Режим движения вагона по рельсовому пути

В режиме движения вагона в составе поезда оценочным критерием служит коэффициент вертикальной динамики, который можно оценить несколькими методами:

- 1) аналитическим (расчет по формуле (2.1) Норм или (Д.1) Приложения Д ГОСТ 33211–2014 [10]);

2) численного интегрирования уравнений движения вагона по фактическим неровностям рельсовых нитей (в результате расчета на динамических моделях, например [11]);

3) эмпирическим (анализ результатов ходовых динамических испытаний).

Формула (2.1) Норм справедлива «для современных вагонов на тележках, имеющих соответствующее фрикционное или гидравлическое демпфирующее устройство и статический прогиб рессорного подвешивания, равный и более 0,015 м», поэтому с помощью нее можно определить K_d с учетом трения и для тележки УХТ, у которой расчетный статический прогиб более 20 мм. При этом коэффициент вертикальной динамики по прогибу подвешивания $K_d^{\text{подв}}$ при нагружении, в соответствии с формулой (2), будет определяться по формуле (2.1) Норм с вычитанием коэффициента относительного трения рессорного подвешивания, составляющего $\varphi = 0,12$ для тележки УХТ.

Методами эмпирическим и численного интегрирования $K_d^{\text{подв}}$ определяется из динамического прогиба, зависящего от трения в подвешивании $f_d = f(\varphi)$.

Результаты расчета K_d аналитическим методом с вероятностным распределением скоростей по таблице 3.4 Норм или таблице 6 ГОСТ 33211–2014 с учетом предельных отклонений вертикальной жесткости пружинного комплекта тележки УХТ представлены в табл. 3.

Для определения $K_d^{\text{подв}}$ методом численного интегрирования были созданы динамические модели двух типов вагонов: полувагон и цистерна [11, 12], а эмпирическим методом – рассмотрены результаты ходовых динамических испытаний полувагона, проведенных на скоростном испытательном полигоне ст. Майкоп – ст. Белореченская Северо-Кавказской железной дороги.

Для последних двух методов на основе полученных данных были построены функции плотности вероятности распределения коэффициента вертикальной динамики подвешивания $p(K_d^{\text{подв}})$, а для аналитического – функции плотности вероятности распределения $p(K_d)$ в соответствии с табл. 3 и $p(K_d^{\text{подв}})$ с учетом $\varphi = 0,12$ (рис. 5).

Следует отметить, что при полученных в ходе ходовых динамических испытаний зна-

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета K_d аналитическим методом

Среднее значение скорости в интервале, V_{cp} , м/с	Доля времени, приходящаяся на эксплуатацию в i -м интервале скоростей, P_{vi}	Коэффициент вертикальной динамики, K_d , при вертикальной жесткости пружины		
		минимальной	номинальной	максимальной
6,25	0,03	0,078	0,078	0,078
13,75	0,07	0,171	0,171	0,171
16,25	0,09	0,202	0,203	0,204
18,75	0,12	0,232	0,236	0,239
21,25	0,16	0,262	0,268	0,273
23,75	0,19	0,292	0,301	0,307
26,25	0,16	0,322	0,333	0,342
28,75	0,10	0,352	0,365	0,376
31,25	0,06	0,382	0,398	0,410
33,75	0,02	0,412	0,430	0,445

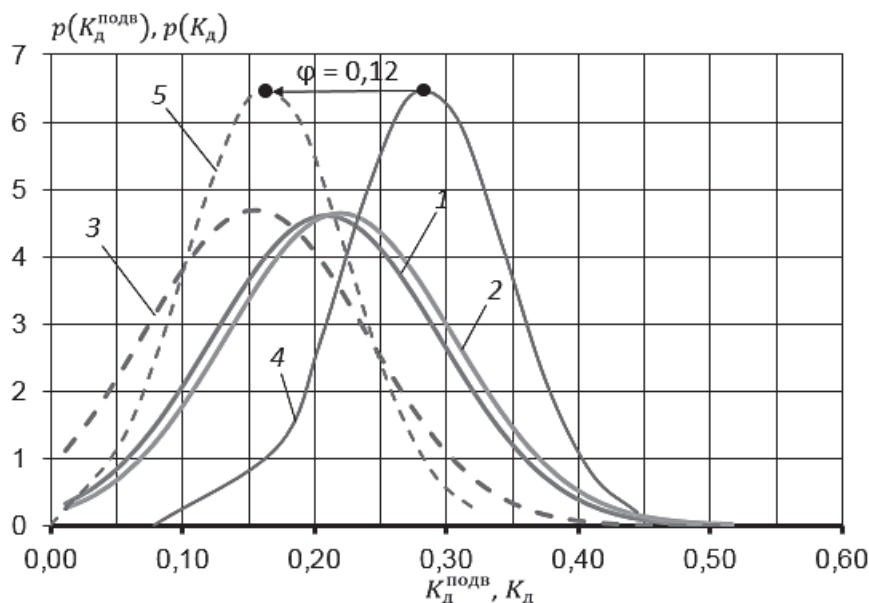


Рис. 5. Плотности вероятности распределения коэффициента вертикальной динамики, полученного различными методами:

1, 2 – $K_d^{\text{подв}}$, численный метод (цистерна и полувагон соответственно); 3 – $K_d^{\text{подв}}$, эмпирический метод (полувагон); 4, 5 – аналитический метод (K_d и $K_d^{\text{подв}}$ соответственно)

чений $K_d^{\text{подв}}$ смыкание рабочих витков пружин не наблюдалось.

Из представленных на рис. 5 функций отчетливо видно, что данные аналитического метода определения функции $p(K_d^{\text{подв}})$ сопоставимы с результатами эмпирического метода и математического моделирования (функция $p(K_d)$ смещается в сторону меньших значений на величину ϕ). Так как на параметр $K_d^{\text{подв}}$ существенное влияние оказывает состояние пути (неровности), результаты методов эмпирического и математического моделирования, полученные на путях с различными неровностями рельсовых нитей, имеют расхождение.

Построенные плотности вероятности распределения значений $K_d^{\text{подв}}$ в виде функций $p(1 + K_d^{\text{подв}})$, которые лимитируют $K_{\text{зп}}$ в соответствии с формулой (6), были использованы для расчета вероятности смыкания витков пружин в режиме движения вагона в составе поезда (методы эмпирический и численного интегрирования). Поскольку минимальная

величина $K_{\text{зп}}$ достигается при максимально возможном занижении опорной поверхности клина относительно опорной поверхности надрессорной балки, расчет вероятности смыкания витков пружин производился для этого случая. Для каждой пружины была построена плотность вероятности нормального распределения конструктивного запаса прогиба пружин $p(K_{\text{зп}})$, которая учитывает разброс значений вследствие допусков на изготовление пружин и клиновой системы.

Вероятность смыкания рабочих витков каждой отдельной пружины определялась площадью, образованной пересечением функций $p(K_{\text{зп}})$ и $p(1 + K_d^{\text{подв}})$ [13]. Графики плотности и результаты расчета вероятности смыкания рабочих витков пружин подвешивания тележки УХТ для движения вагона в составе поезда представлены на рис. 6 и в табл. 4 соответственно.

Наибольшую вероятность смыкания рабочих витков имеют подклиновые пружины. При движении в составе поезда максимальная вероятность смыкания рабочих витков

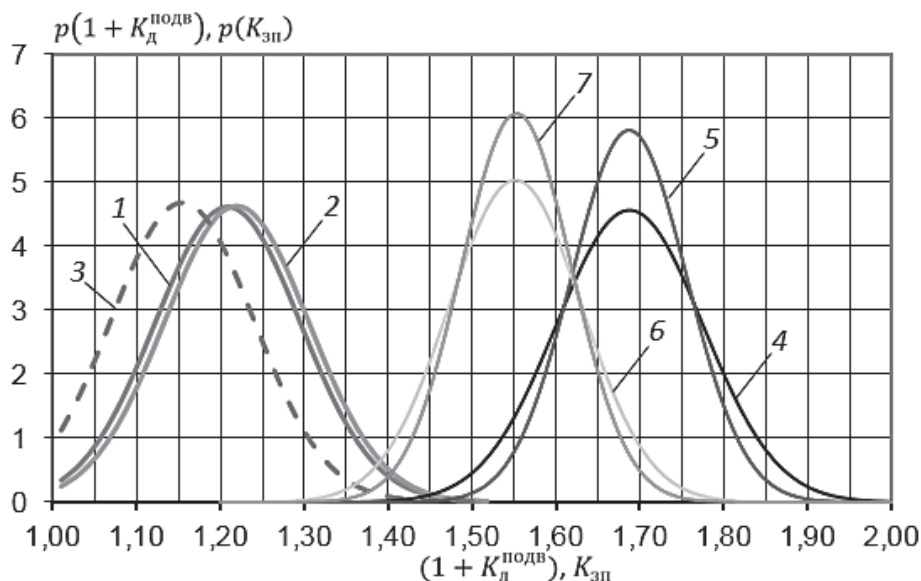


Рис. 6. Плотности вероятности смыкания витков пружин подвешивания для случая движения вагона в составе поезда ($K_{\text{д}}^{\text{подв}}$ определен различными методами):
 1, 2 – $(1 + K_{\text{д}}^{\text{подв}})$, численный метод (цистерна и полувагон соответственно); 3 – $(1 + K_{\text{д}}^{\text{подв}})$, эмпирический метод (полувагон); 4, 5, 6, 7 – $K_{\text{зп}}$ пружин наружной, внутренней, наружной подклиновой и внутренней подклиновой соответственно

ТАБЛИЦА 4. Вероятность смыкания рабочих витков пружин подвешивания для движения вагона в составе поезда

Метод определения $K_{\text{д}}^{\text{подв}}$		Вероятность смыкания рабочих витков пружины подвешивания			
		наружной	внутренней	наружной подклиновой	внутренней подклиновой
Эмпирический		0,00109	0,00043	0,01270	0,00521
Численного интегрирования	полувагон	0,00643	0,00244	0,04294	0,02459
	цистерна	0,00502	0,00218	0,03898	0,02024

наружной подклиновой пружины по данным испытаний составила 1,3 %, а по результатам моделирования 3,9 и 4,3 %. Для рессорного комплекта в целом наибольшую вероятность смыкания рабочих витков дал метод численного интегрирования, наименьшую – эмпирический. Однако, если принять вероятность $p_0 < 1$ для события, что вероятность смыкания рабочих витков отдельной пружины имеет 5 %, то вероятность такого события в тележке, имеющей 36 пружин, будет равна p_0 в 36-й степени, т. е. практически нулю.

При определении минимально допустимого значения коэффициента конструктивного

запаса прогиба рессорного подвешивания $K_{\text{зп}}$ достаточно, чтобы максимальная величина $1 + K_{\text{д}}^{\text{подв}}$ (см. рис. 5: $1 + 0,45$ для эмпирического метода и $1 + 0,50$ для метода численного интегрирования) не превышала среднего значения $K_{\text{зп}}$ по вертикальной жесткости для максимально возможного по конструкторской документации занижения опорной поверхности фрикционного клина относительно опорной поверхности надрессорной балки каждой из пружин подвешивания.

Следовательно, учитывая условие (6), для режима движения вагона по рельсовому пути отсутствие смыкания рабочих витков обеспе-

чивается при минимально допустимом значении коэффициента конструктивного запаса прогиба рессорного подвешивания 1,50.

Режимы соударения при маневровых работах и на сортировочных горках

В режимах осаживания и трогания тяжеловесного состава с места, соударения вагонов при маневрах в качестве оценочного критерия можно принять коэффициент вертикальной динамики обрессоренных частей вагона $K_{дN_p/N_c}$, пересчитанный аналитическим методом из вертикальной добавки от продольных сил растяжения N_p /сжатия N_c (по формулам (2.9) и (2.11) Норм или (4.2) и (4.3) ГОСТ 33211–2014, где вместо N – внешней продольной силы удара или рывка, приложенной к автосцепке, подставлены значения сил из П. 1.1 Норм или таблицы 4 ГОСТ 33211–2014), отнесенной к вертикальной статической нагрузке на рессорный комплект.

В соответствии с формулой (2) коэффициент вертикальной динамики подвешивания

при действии продольных сил $K_{дN_p/N_c}^{подв}$ с учетом трения определен по формуле

$$K_{дN_p/N_c}^{подв} = K_{дN_p/N_c} - \varphi, \quad (7)$$

где φ – коэффициент относительного трения. Значение $\varphi = 0,07$ соответствует минимально допустимому по ГОСТ 9246–2013 [14], $\varphi = 0,12$ – среднему для тележки УХТ груженого вагона.

Результаты расчета представлены в табл. 5.

В расчетах коэффициент относительного трения φ в диапазоне $K_{дN_p/N_c} < 0,66$ (до смыкания витков) принят постоянным (изменение значения φ при увеличении $K_{дN_p/N_c}$ не учитывается), а после смыкания рабочих витков пружин подвешивания $\varphi = 0$.

Плотности вероятности распределения значений $K_{дN_p/N_c}^{подв}$ в виде функций $p(1 + K_{дN_p}^{подв})$ и $p(1 + K_{дN_c}^{подв})$ были использованы для расчета вероятности смыкания витков пружин в режиме соударения вагонов при маневрах. Графики плотности и результаты расчета ве-

ТАБЛИЦА 5. Коэффициент вертикальной динамики подвешивания для случая действия продольных сил в автосцепку вагона

Среднее значение в интервале продольных сил, кН	Частость продольных сил		Вертикальная добавка от продольных сил, действующая на рессорный комплект, кН	Коэффициент вертикальной динамики обрессоренных частей вагона, $K_{дN_p/N_c}$		Коэффициент вертикальной динамики подвешивания, $K_{дN_p/N_c}^{подв}$			
	сжимающих	растягивающих							
250	0,0990	0,1390	20,51	0,091	$\varphi = 0,07$	$\varphi = 0,12$	0,021	$\varphi = 0,12$	0,000
600	0,2390	0,3090	49,21	0,220			0,150		0,100
1000	0,2690	0,2890	82,02	0,366			0,296		0,246
1400	0,1990	0,1790	114,83	0,512			0,442		0,392
1800	0,1190	0,0600	147,64	0,659			0,589		0,539
2200	0,0500	0,0200	180,45	0,805	$\varphi = 0$	$\varphi = 0$	0,805	$\varphi = 0$	0,805
2600	0,0190	0,0034	213,26	0,951			0,951		0,951
3000	0,0050	0,0006	246,07	1,098			1,098		1,098
3400	0,0010	0	278,87	1,244			1,244		1,244
3800	0,0002	0	311,68	1,391			1,391		1,391

роятности смыкания рабочих витков пружин подвешивания тележки УХТ для режима соударения вагонов при маневровых работах и на сортировочных горках с учетом коэффициента относительного трения ($\varphi = 0,07$ и $\varphi = 0,12$) приведены на рис. 7 и в табл. 6 соответственно.

При данном режиме вероятность смыкания рабочих витков пружин определялась площадью, образованной пересечением функций $p(K_{\text{зп}})$ и $p(1 + K_{\text{дНр}/N_c}^{\text{подв}})$.

Максимальная вероятность смыкания рабочих витков наружной подклиновой пружины составила 43,4 % для $\varphi = 0,07$ и 40,7 % для

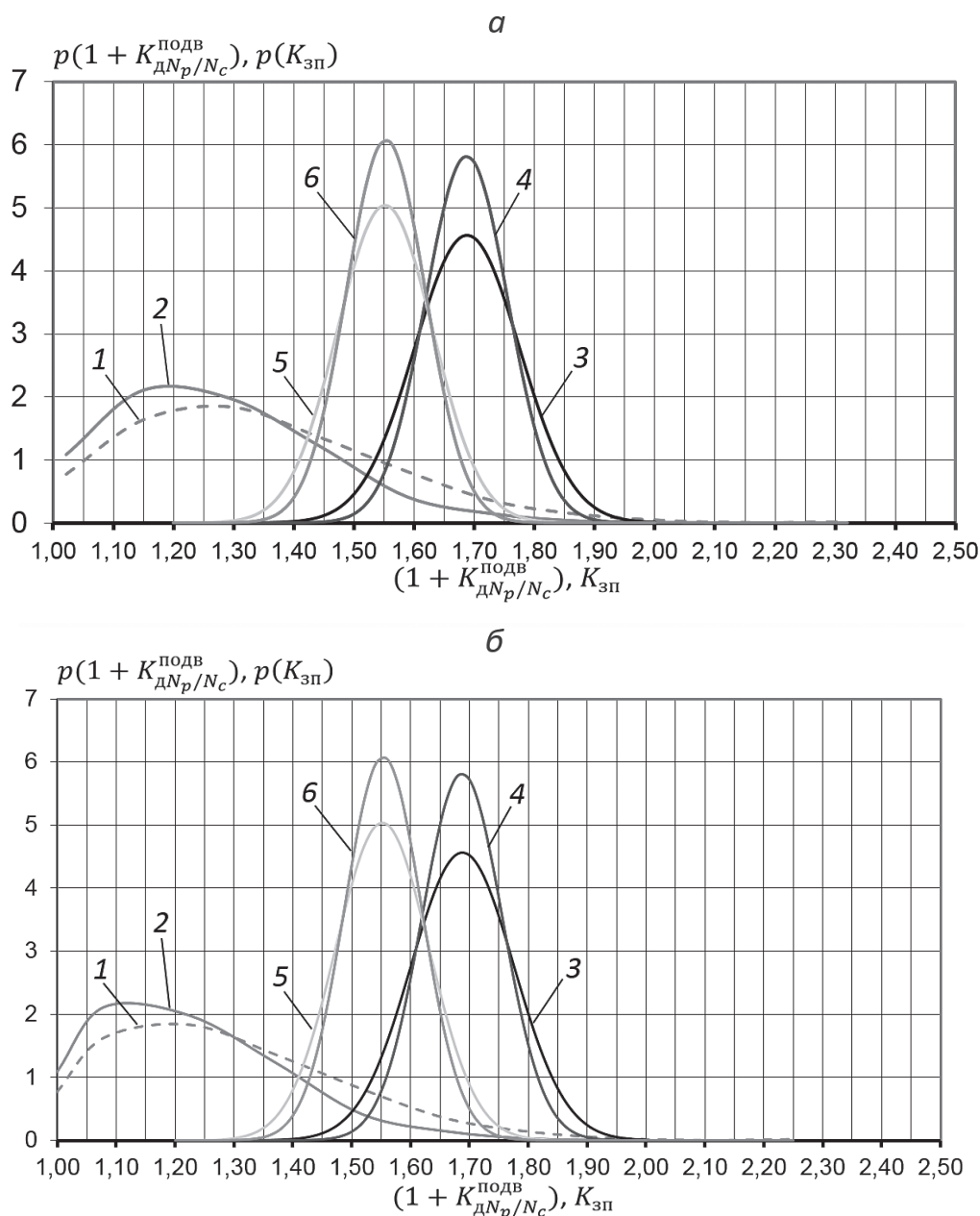


Рис. 7. Плотности вероятности смыкания витков пружин подвешивания для случая соударения вагонов при маневрах и $\varphi = 0,07$ (а), $\varphi = 0,12$ (б):

1 – $(1 + K_{\text{дНр}}^{\text{подв}})$, сжатие (удары); 2 – $(1 + K_{\text{дНр}}^{\text{подв}})$, растяжение (рывок); 3, 4, 5, 6 – $K_{\text{зп}}$ пружин наружной, внутренней, наружной подклиновой и внутренней подклиновой соответственно

ТАБЛИЦА 6. Вероятность смыкания рабочих витков пружин подвешивания в режиме соударения вагонов при маневрах

Аналитический метод определения $K_{\text{д}}^{\text{подв}}$	Вероятность смыкания рабочих витков пружины подвешивания			
	наружной	внутренней	наружной подклиновой	внутренней подклиновой
$\varphi = 0,07$				
Сжатие	0,3896	0,3499	0,4338	0,3701
Растяжение	0,3064	0,2694	0,4099	0,3564
$\varphi = 0,12$				
Сжатие	0,3217	0,2841	0,4072	0,3528
Растяжение	0,2364	0,1973	0,3784	0,3481

$\varphi = 0,12$. Учитывая малоцикловость действия продольных сил (число циклов действия сжимающих/растягивающих усилий за назначенный ГОСТ 1452–2011 [15] ресурс пружин 16 лет 120 тыс./280 тыс.), допустимо принять вероятность смыкания рабочих витков каждой отдельной пружины не более 50 % при условии обеспечения пружинами усталостной прочности. Данная вероятность имеет место при $K_{\text{зп}}$ не менее 1,50 в соответствии с выражением (6).

Таким образом, для тележки с улучшенными показателями ходовых качеств (со сниженным коэффициентом вертикальной динамики обрессоренных частей вагона) свойственно отсутствие смыкания рабочих витков пружин при значительно более низком коэффициенте конструктивного запаса прогиба рессорного подвешивания – 1,50, чем указано в Нормах – 1,75 для грузовых вагонов со статическим прогибом свыше 50 мм.

Заключение

Разработанная методика определения коэффициента конструктивного запаса прогиба рессорного подвешивания позволила проанализировать работу рессорного подвешивания с установлением минимально допустимого значения $K_{\text{зп}}$ применительно к тележкам с нелинейным рессорным комплектом.

Расчет $K_{\text{зп}}$ производился вероятностным методом, а его минимально допустимое значение находилось из полученного в ходе работы условия $K_{\text{зп},0,05} \geq 1 + K_{\text{д}}^{\text{подв}}$ (максимальная вероятность смыкания рабочих витков каждой отдельной пружины должна быть не более 5 %), учитывающего параметры пружин с допусками, положение нижней опорной поверхности клина относительно опорной поверхности надрессорной балки и трение в подвешивании. Данное условие позволило снять неоднозначную интерпретацию определения $K_{\text{зп}}$ согласно п. 7.3.3 Норм и заключить, что $K_{\text{зп}}$ не совпадает с коэффициентом вертикальной динамики обрессоренных частей вагона $K_{\text{д}}$.

Результаты расчета $K_{\text{зп}}$ в соответствии с представленной в статье методикой свидетельствуют и о том, что в Нормах указано завышенное минимально допустимое значение $K_{\text{зп}}$.

Согласно расчету $K_{\text{зп}}$ по разработанной методике, для трехэлементной тележки с трением в подвешивании ($\varphi = 0,12$) и нелинейным рессорным комплектом рекомендуется установить минимально допустимую величину коэффициента конструктивного запаса прогиба, рассчитанную по номинальным геометрическим параметрам пружин с учетом номинального занижения/завышения фрикционного клина, не менее 1,50.

Библиографический список

1. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ–ВНИИЖТ, 1996.

2. Лесничий В. С. Тележки грузовых вагонов нового поколения : учеб. пособие / В. С. Лесничий, И. К. Самаркина, В. Н. Белоусов, А. В. Жеменов. – СПб. : ПГУПС, 2012. – 40 с.

3. Белоусов А. В. Применение рессорного подвешивания с билинейной характеристикой для улучшения динамических качеств грузовых вагонов : дис. ... канд. техн. наук. – М. : ВНИИЖТ, 2001. – 156 с.

4. Эстлинг А. А. Проектирование рессорного подвешивания вагонов. Ч. 1 : метод. указания / А. А. Эстлинг. – СПб. : ПГУПС, 1993. – 26 с.

5. Бороненко Ю. П. Проектирование ходовых частей вагонов. Ч. 1. Проектирование рессорного подвешивания двухосных тележек грузовых вагонов : учеб. пособие / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова, Е. А. Рудакова. – СПб. : ПГУПС, 2003. – 74 с.

6. Челноков И. И. Основные направления совершенствования и разработки рессорного подвешивания вагонов для перспективных условий эксплуатации / И. И. Челноков, М. М. Соколов, Г. В. Левков, В. А. Кошелев, Ю. Г. Путин, Е. А. Корнильев, В. Г. Болдырев // Динамика вагонов : сб. тр. / под ред. И. И. Челнокова. – Л. : ЛИИЖТ, 1977. – Вып. 403. – С. 45–56.

7. Варгунин В. И. Эксплуатационная безопасность клинового гасителя колебаний тележки типа ЦНИИ-ХЗ-0 при варьировании массы железнодорожного вагона / В. И. Варгунин, П. Н. Добровольский, Н. В. Михайлов, О. П. Мулюкин, А. Н. Носов. – Самара : СамГАПС, 2005. – 92 с.

8. Пономарев С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980. – 326 с.

9. Селенский И. А. О стабильности фрикционного сопротивления клиновых гасителей колебаний / И. А. Селенский, П. М. Богданов // Вестн. ВНИИЖТа. – 1962. – № 4. – С. 15–18.

10. ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам». – М. : ВНИИЖТ, 2014.

11. Орлова А. М. Требования к динамическим качествам грузовых вагонов и методы их подтверждения : учеб. пособие / А. М. Орлова, В. С. Лесничий, Е. А. Рудакова, А. Н. Комарова, А. В. Саидова. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 51 с.

12. Саидова А. В. Разработка математических моделей вагонов на тележках 18-9810 и 18-9855 для исследования износов колес / А. В. Саидова, А. М. Орлова // Наука и прогресс транспорта. – Вестн. Днепропетровск. нац. ун-та ж.-д. транспорта им. акад. В. Лазаряна. – 2013. – Вып. 2 (44). – С. 118–123.

13. Шадур Л. А. Вагоны : Конструкция, теория и расчет / Л. А. Шадур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1980. – 440 с.

14. ГОСТ 9246–2013 «Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия». – М. : ВНИИЖТ, 2013.

15. ГОСТ 1452–2011 «Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог. Технические условия». – М. : ВНИИЖТ–ВНИИЖТ, 2011.

References

1. *Normy dlya rascheta i proektyrovaniya vagonov zheleznikh dorog MPS koley 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Codes of design and construction of 1520 mm gauge railway cars (non-self-propelled) for the Ministry of railroads]. Moscow, GosNIIV–VNIIZhT Publ., 1996. (In Russian)

2. Lesnichiy V. S., Samarkyna I. K., Belousov V. N. & Zhemenov A. V. *Telezhki gruzovykh vagonov novogo pokoleniya* [New generation bogies for freight cars]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012, 40 p. (In Russian)

3. Belousov A. V. *Prymeneniye resornogo podveshivaniya s bylyneinoy kharakterystikoy dlya uluchsheniya dynamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov* [The application of springing with bilinear response for the improvement of freight cars' dynamic qualities]. Diss. abstract... Cand. Sci. Moscow, 2001, 156 p. (In Russian)

4. Estling A.A. *Proektyrovaniye ressnogo podveshyvaniya vagonov* [The construction of car springing]. Pt 1. The point technique. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 1993, 26 p. (In Russian)
5. Boronenko Y.P., Orlova A.M. & Rudakova Y.A. *Proektyrovaniye khodovykh chastey vagonov. Ch. 1. Proektyrovaniye ressnogo podveshyvaniya dvukhsnykh tezhkek gruzovykh vagonov* [The design of running gears of a car. Pt 1. The design of springing of freight biaxial cars]: tutorial. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2003, 74 p. (In Russian)
6. Chelnokov I.I., Sokolov M.M., Levkov G.V., Koshelev V.A., Putin Y.G., Kornilyev E.A. & Boldyrev V.G. Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya i razrabotky ressnogo podveshyvaniya vagonov dlya perspektivnykh usloviy ekspluatatsii. *Dinamika vagonov* [The basic directions of improvement and development of cars' springing for long-term running conditions. Dynamics of cars]. *Coll. Papers*. Ed. by I.I. Chelnokov. Saint Petersburg, LIIZhT Publ., 1977, issue 403, pp. 45–56. (In Russian)
7. Vargunyn V.I., Dobrovolsky P.N., Mykhailov N.V., Mulukyn O.P. & Nosov A.N. *Ekspluatatsionnaya bezopasnost klynovogo gasytelya kolebanij tezhky tyra TsNII-X3-0 pry varjirovanii massy zhelezнодорожного vagona* [Operating safety of wedge-like oscillation damper of TsNII-X3-0 cart type with weight variation of a car]. Samara, SamGAPS (State Academy of transport) Publ., 2005, 92 p. (In Russian)
8. Ponomarev S.D. & Andreeva L.Y. *Raschet uprugykh elementov mashyn i pryborov* [Estimation of resilient members of engines and equipment and mechanisms]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1980, 326 p. (In Russian)
9. Selensky I.A. & Bogdanov P.M. O stablynosti fryktsionnogo soprotivleniya klynovykh gasyteley kolebanij [On consistency of friction resistance of wedge-like oscillation dampers]. *Vestnik VNIIZhTa* [VNIIZhT Bull.], 1962, no. 4, pp. 15–18. (In Russian)
10. GOST 33211–2014. *State Standard 33211–2014 “Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosty i dynamicheskym kachestvam”* [“Freight cars. Robustness requirements and dynamic properties”]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2014. (In Russian)
11. Orlova A.M., Lesnichiy V.S., Rudakova Y.A., Komarova A.N. & Saidova A.V. *Trebovaniya k dynamicheskym kachestvam gruzovykh vagonov i metody ikh podtverzhdeniya* [Requirements for dynamic properties of freight cars and confirmation methods]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, 51 p. (In Russian)
12. Saidova A.V. & Orlova A.M. Razrabotka matematicheskikh modeley vagonov na tezhkakh 18-9810 i 18-9855 dlya issledovaniya iznosov koles [The development of mathematical models of cars on 18-9810 and 18-9855 carts to study the wheels wear-out]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsionalnogo unyversiteta zhelezнодорожного транспорта imeny akademika V. Lazaryana* [Science and transport development. Lazaryan Dnepropetrovsky national railway transport university], 2013, issue 2 (44), pp. 118–123. (In Russian)
13. Shadur L.A., Chelnokov I.I., Nykolsky L.N. at all. *Vagony: Konstruktsiya, teoriya i raschet* [Cars: Design, theory and analysis]. 3d ed., updated. Moscow, Transport Publ., 1980, 440 p. (In Russian)
14. GOST 9246–2013. *State Standard 9246–2013 “Tezhky dvukhsnyye trekhelementnye gruzovykh vagonov zheleznykh dorog koley 1520 mm”* [“Biaxial three-element 1520 mm gauge railway cars. General specifications”]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2013. (In Russian)
15. GOST 1452–2011. *State Standard 1452–2011 “Pruzhyne tsilindricheskiye vyntovye tezhkek i udarnotyagovykh pryborov podvizhnogo sostava zheleznykh dorog. Tekhnicheskyye usloviya”* [“Helical springs of cars and draw-and-buffer gears of a mobile railway train”]. Moscow, VNIKI–VNIIZhT Publ., 2011. (In Russian)

ОРЛОВА Анна Михайловна – доктор техн. наук, профессор, aorlova@uniwagon.com (ПАО «НПК ОБК»); РУДАКОВА Екатерина Александровна – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, erudakova@tt-center.ru; КОМАРОВА Анна Николаевна – канд. техн. наук, научный сотрудник, ankomarova@mail.ru (ООО «ВНИЦТТ»); *ГУСЕВ Артем Владимирович – аспирант, agusev@tt-center.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.073:658.8

О. Д. Покровская, О. Б. Маликов, М. А. Зачешигрина**МОРФОЛОГИЯ ТЕРМИНАЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

Дата поступления: 20.01.2017

Решение о публикации: 25.01.2017

Цель: Исследование морфологии терминальных сетей, разработка методологии их конфигурирования. **Методы:** Использован аналитический метод исследования. **Результаты:** Предпринята попытка изучения морфологии терминальных сетей. В частности предложена методология их формирования по ряду целевых функций. Охарактеризована теория расчета терминальных сетей и логистических объектов, которая отличается интеграцией известных задач концентрации грузовой работы, специализации станций узла и др. Предложена методика декомпозиции состава терминальных сетей. Проведены моделирование таких сетей и их классифицирование по морфологическим признакам. Описана методика проектирования терминальных сетей как отыскания наилучшего варианта ее конфигурации (двухуровневая и трехэтапная задача формирования транспортно-складских систем). Разработанная теория расчета терминальных сетей и логистических объектов представляет собой интегрированный вариант теории складских систем О. Б. Маликова, теории расчета грузовых фронтов, теории размещения и специализации грузовых станций в крупных узлах по принципу концентрации грузовой работы на опорных узловых элементах данных сетей. Интегрирована экономико-математическая модель, как усложненная модификация известных задач концентрации грузовой работы, специализации станций узла и др. **Практическая значимость:** Для ОАО «РЖД» применение авторского подхода к формированию терминальных сетей позволит оптимизировать состав объектов терминально-складской инфраструктуры.

Ключевые слова: Транспортно-складская система, логистический объект, терминальная сеть, морфология и конфигурация терминальных сетей.

***Oksana D. Pokrovskaya**, Cand. Sci., associate professor, insight1986@inbox.ru; **Oleg B. Malykov**, D. Sci., professor, stadnitskey@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Marina A. Zacheshigrina**, Cand. Sci., associate professor (Siberian State Transport University)
THE MORPHOLOGY OF TERMINAL NETWORK

Objective: To study the morphology of terminal network, to develop the methodology of its configuration management. **Methods:** Analytical method was used for the research. **Results:** An attempt to study the morphology of terminal network was made. Particularly, the methodology of terminal network forming on series of purpose-oriented functions was introduced. Design theory of terminal network and logistic objects was described, which is notable for the integration of the given tasks of freight operation concentration, junction stations specialization, etc. The method of terminal network decomposing was introduced. Modelling of such types of network as well as their classification on morphological characters was conducted. The method of terminal network design was described as the way of searching for the best variant of its configuration (two-level and three-step task of part handling-and-storage systems formation). The developed theory of terminal network and logistic objects analysis is an integrated version of storage systems theory by O. B. Malykov, calculation of freight front theory, the theory of allocation and specialization of terminal stations in major junctions on the basis of freight operation concentration on the supporting elements of the network. Economical mathematical model was integrated, as the complicated modification of the given tasks of freight operation concentration, junction stations specialization, etc. **Practical importance:** For “RRR” UJSC the application of author’s approach in the terminal network formation will allow to optimize the composition of objects of terminal storage infrastructure.

Keywords: Part handling-and-storage system, logistic object, terminal network, morphology and configuration of terminal networks.

Введение

Роль транспортно-складских систем (ТСС) в доставке грузов трудно переоценить. От их бесперебойной работы и слаженного взаимодействия видов транспорта в них зависит эффективность всей транспортно-логистической системы страны. Очевидно, что такая сложнейшая задача как комплексное проектирование и развитие терминально-складской инфраструктуры должна решаться с учетом всей группы взаимосвязанных вопросов: «подключения» к транспортной сети и транспортным коридорам, эффективного взаимодействия участников процесса перевозок и др.

При этом от качества решений, принятых на самом низшем уровне формирования ТСС (создание простейших складов на опорных железнодорожных станциях) зависит эффективность и успешность работы всей терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта. Это связано с тем, что вопросы проектирования, формирования и развития узловых элементов терминально-складской инфраструктуры – логистических объектов (ЛО) различного вида (склады, терминалы, логистические центры и др.) должны решаться комплексно, во взаимосвязи построения складских комплексов и их эффективного «подключения» к инфраструктуре базового транспортного узла и к логистической системе доставки грузов железнодорожным транспортом в целом.

Таким образом, от современной транспортной науки требуется комплексное исследование ТСС, включая оптимальное проектирование их состава.

Целью работы является исследование морфологии терминальных сетей (ТС), в частности разработка методологии конфигурирования ТС.

Огромный вклад в создание отечественной теории транспортных узлов внесли такие ученые как В. Н. Образцов, К. Ю. Скалов, С. В. Земблинов, И. Е. Савченко, Л. В. Канторович, В. Я. Негрей, Н. В. Правдин, А. В. Комаров, В. В. Повороженко, Е. В. Архангель-

ский, В. М. Акулиничев, Ю. И. Ефименко, В. И. Апатцев, В. Г. Шубко, С. П. Вакуленко и др. Важнейшее значение для железнодорожной отрасли имеют труды С. М. Резера, Б. А. Левина, П. А. Козлова, А. Т. Осьминина, В. А. Кудрявцева, В. А. Персианова, П. В. Куренкова, А. Ф. Бородина, С. Ю. Елисеева, посвященные совершенствованию транспортных и логистических технологий доставки грузов. Значительную роль в формировании теории транспортно-грузовых систем, проектирования компоновки и технического оснащения транспортных узлов играют работы А. А. Смехова, В. Н. Дегтяренко, И. С. Беседина, Н. П. Журавлева, Г. П. Гриневич, О. Б. Маликова, О. Н. Числова и др. Существенный вклад в систему проектирования транспортно-логистических систем внесли научные труды Н. Д. Иловайского, Ю. О. Пазойского, В. П. Клепикова, С. В. Милославской, К. В. Плужникова, В. В. Багиновой, А. Н. Рахмангулова, А. С. Балалаева, А. М. Гаджинского, Э. В. Шабаровой, В. И. Сергеева, Т. А. Прокофьевой, Б. А. Аникина, В. С. Лукинского, В. В. Дыбской, В. М. Самуйлова, М. Б. Петрова, В. М. Николашина, Р. Г. Леонтьева, О. Н. Ларина и т. д. В работе учитывались научные результаты трудов [1–11 и др.], посвященных проектированию транспортно-логистических систем. ТСС – это элемент терминально-складской инфраструктуры транспорта. Она может быть представлена логистическими объектами любого формата и терминальными сетями.

Общие сведения о морфологии терминальных сетей

Состав ТС – это совокупность определенного количества ЛО, размещенных на некотором количестве участков сети U , обладающих определенными параметрами для обеспечения перевозок (рис. 1):

$$ТС = \{ЛО_i; U_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$
$$50 \text{ км} < L < 500 \text{ км}.$$

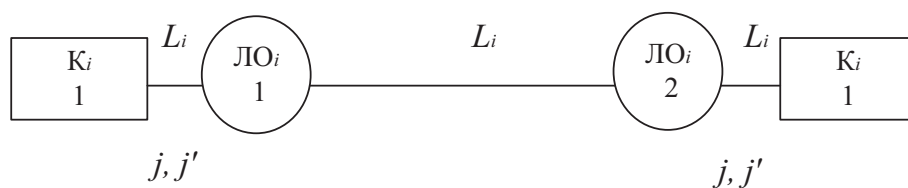


Рис. 1. Общий вид ТС

Здесь ЛО – подмножество n количества ЛО i -го типа (по авторской классификации), расположенных на участке U (j – унимодальном и j' – мультимодальном), входящих в ТС, в ед.:

$$\text{ЛО} = \sum_{i=1}^n \{\text{ЛО}_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, 9,$$

$$\text{ЛО} = \begin{cases} \{\text{ЛО}_i^{u,j,j'} \mid \text{ЛО}_i^{u,j,j'} \in \text{ЛО}(\text{ТС}), \\ u \in \{1, 2, \dots, n\}; i \in \{1, 2, \dots, n\}; \end{cases}$$

U – подмножество n количества транспортных участков j - и j' -того типа, соединяющих клиентов и ЛО в ТС, в ед.:

$$U = \sum_{i=1}^n \{U_i^{j,j'}\}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

$$U = \begin{cases} \{U_i^{j,j'} \mid U_i^{j,j'} \in U(\text{ТС}), \\ U = \{U_{j,j'}\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, j \neq j'; \end{cases}$$

j, j' – множество j -х унимодальных и j' -х мультимодальных участков ТС,

$$U = \{L_{\text{ЛО-ЛО}}, L_{\text{К-ЛО}}, L_{\text{ЛО-К}}\},$$

$$U = \{L_{k1}, \dots, L_{kn}\}, \quad n = 2 (\text{RT, AT}),$$

$$U_j = \{L_{k1}^j, \dots, L_{kn}^j\}; \quad U_{j'} = \{L_{k1,2}^{j'}, \dots, L_{kn}^{j'}\};$$

RT, AT – железнодорожный и автомобильный транспорт.

Конфигурация ТС $CNF(\text{ТС}_{\text{alt}})$ – это морфологическая структура вариантного сочетания элементов ТС:

$$CNF(\text{ТС}_{\text{alt}}) = \text{VAR}\{\text{ТС}_i\} \parallel CNF(\text{ТС}_{\text{alt}}),$$

в которой $CNF(\text{ТС}_{\text{alt}})$ – альтернативный вариант конфигурации ТС; $\parallel$ – дизъюнкция, или логическое «или»; $\text{VAR}\{\text{ТС}_i\}$ – вариант параметрической структуры ТС, включая тип ЛО и состав реализуемых ими услуг для клиента (транспортных, логистических и дополнительных).

В развернутом виде вариант конфигурации ТС представляет собой

$$\begin{aligned} CNF(\text{ТС}_i) &= \text{VAR}\{\text{ТС}_i\} = \\ &= \{\text{VAR}(T), \text{VAR}(VS), \text{VAR}(\text{LOG}), \\ &\quad \text{VAR}(M), \text{VAR}(\text{ЛО})\}, \end{aligned}$$

где $\text{VAR}(T)$ – вариант подключения вида (видов) транспорта к ТС; $\text{VAR}(VS)$ – вариант взаимодействия соседних ТС; $\text{VAR}(\text{LOG})$ – вариант пакета логистического сервиса, предоставляемого клиенту при прохождении груза через ТС, у.е. за пакет/год; $\text{VAR}(M)$ – вариант маршрута прохождения ТС, реализующий минимум затрат клиента по $K(\text{ТС}_i)$; $\text{VAR}(\text{ЛО})$ – вариант параметрической структуры ЛО (по типу, мощности, площади и др.).

Морфологическая структура ТС ($\text{STR}(\text{ТС})_I$) такова. Каждый элемент системы – участок U , узел ЛО или сектор SEC (как агрегированное сочетание участка/участков и узла/узлов ТС) – обладает характеристиками: **пространства** $P(\text{ТС})_I$: участок U – протяженность, средняя удаленность ЛО; узел ЛО – общая площадь территории, площадь хранения; сектор SEC – протяженность, способ подключения транспорта, способ взаимодействия; **мощности** $Q(\text{ТС})_I$: участок U – коэффициент плотности логистической сети, грузонапряженность, эксплуатационная производительность, покрытие логистическим

сервисом (авторские показатели, см. формулы), техническая оснащенность (особенности пути, тяги...); узел ЛО – грузоперерабатывающая способность, полезная площадь хранения, техническая оснащенность; сектор *SEC* – совокупные показатели грузонапряженности, грузоперерабатывающей способности, технической оснащенности. Элементы системы описываются множествами

$$\text{STR}(\text{TC})_I \in \{U, \text{ЛО}, \text{SEC}\},$$

$$\text{STR}(\text{TC})_I \in \{P_i, Q_i\},$$

$$P(\text{TC})_I = \sum_{i,n} P(U, \text{ЛО}, \text{SEC}),$$

или в развернутом виде:

$$P(\text{TC})_U = \sum_{i,n} U\{L_i; L_{\text{уд ср}}\},$$

$$P(\text{TC})_{\text{ЛО}} = \sum_{i,n} \text{ЛО}\{S_{\text{сумм}}; S_{\text{хр сумм}}\},$$

$$P(\text{TC})_{\text{SEC}} = \sum_{i,n} \text{SEC}\{L_{i \text{ SEC}}; T; VS\},$$

$$Q(\text{TC})_I = \sum_{i,n} Q(U, \text{ЛО}, \text{SEC}),$$

или в развернутом виде:

$$Q(\text{TC})_U = \sum_{i,n} U\{K_{\text{пл лс}}; W; R_{\text{экс пл}}; \text{LOG}; Z\},$$

$$Q(\text{TC})_{\text{ЛО}} = \sum_{i,n} \text{ЛО}\{W; S_{\text{хр полез}}; Z\},$$

$$Q(\text{TC})_{\text{SEC}} = \sum_{i,n} \text{SEC}_{\text{сумм}}\{W; R_{\text{экс пл}}; Z\}.$$

Классификация терминальных сетей

Рассмотрим особенности решений участковой конфигурации ТС (рис. 2).

Частные случаи возможны, когда ГО или ГП имеет ЛО или сам является им (рис. 3).

Задачей экономико-математического моделирования является отыскание такого наилучшего варианта конфигурации (построения структуры) ТС, который удовлетворял бы требованиям целевой функции того или иного этапа проектирования ТС (табл. 1).

Модель терминальной сети

Представим математическую модель типичной ТС как логистической цепи доставки груза в виде

$$K(\text{ЛО}_m)_i \rightarrow T_{k(m-c)} \rightarrow C(\text{ЛО}_i) \rightarrow \\ \rightarrow T_{j(c-n)} \rightarrow K(\text{ЛО}_n)_i,$$

где $K(\text{ЛО}_m)_i$ – клиент-грузоотправитель, пользующийся услугами ЛО i -го типа в пункте отправления груза m ; $T_{k(m-c)}$ – k -й вид транспорта, работающий на участке доставки груза от пункта отправления груза m до центрального ЛО; $C(\text{ЛО}_i)$ – центральный ЛО i -го типа на ТС, на который прибывают грузы k -м видом транспорта, отправляются j -м видом транспорта; $T_{j(c-n)}$ – j -й вид транспорта, работающий на участке доставки груза от ЛО i -го типа до пункта назначения груза n ; $K(\text{ЛО}_n)_i$ – клиент-грузополучатель, пользующийся услугами ЛО i -го типа в пункте на-



Рис. 2. Классический вариант построения ТС

значения груза n . В общем виде описываемую данным выражением типовую логистическую цепь можно представить как простейшую схему (рис. 4).

Варианты решения вопросов управления процессами перевозок по ТС показаны на рис. 5.

На рис. 5 каждой дуге – направлению грузопотока, который движется от отправителей m (овал) к получателям n (овал), – соответствуют определенные объем груза, расстояние участка перевозки, срок доставки на участке перевозки и стоимость перевозки груза k -м видом транспорта: $D_{mn} \in \{Q_{mn}; L_{mn}; T_{mn}; S_{mnk}\}$.

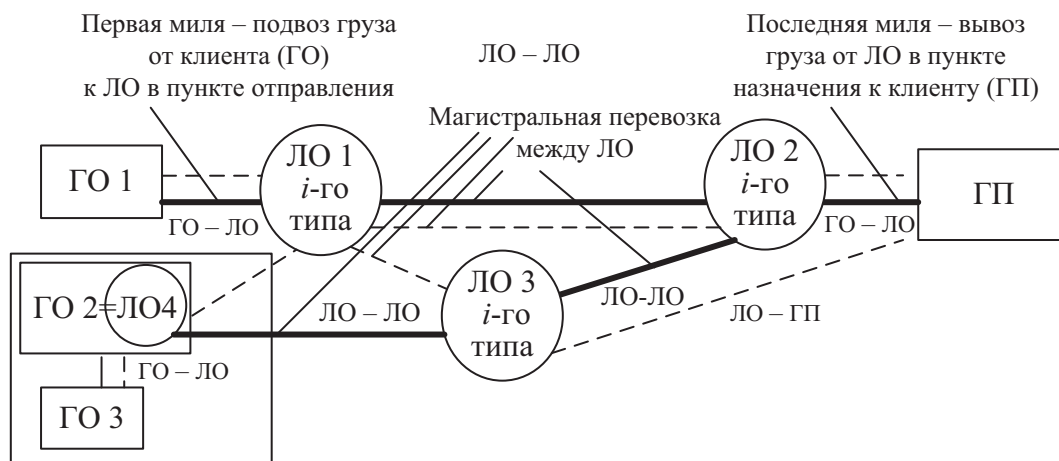
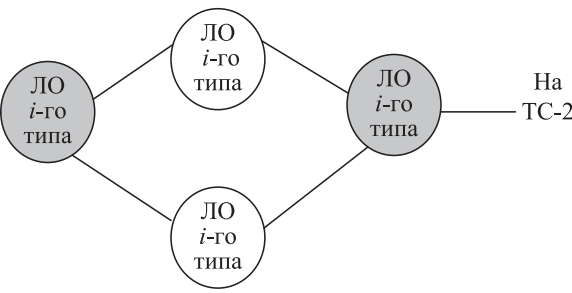
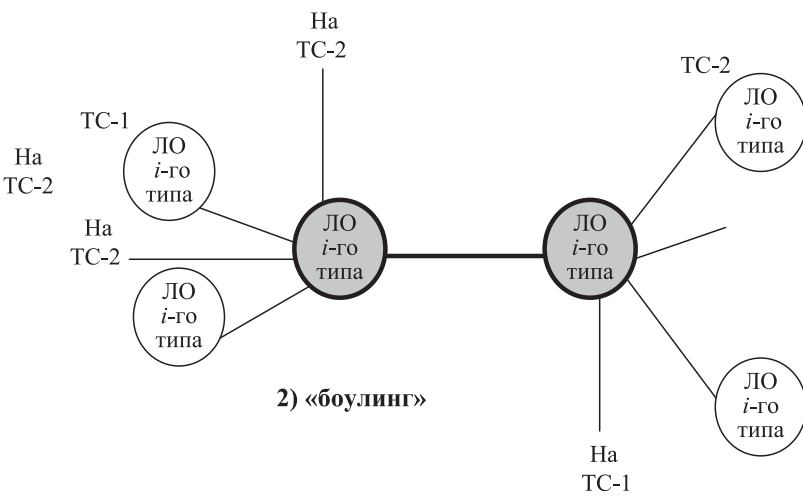
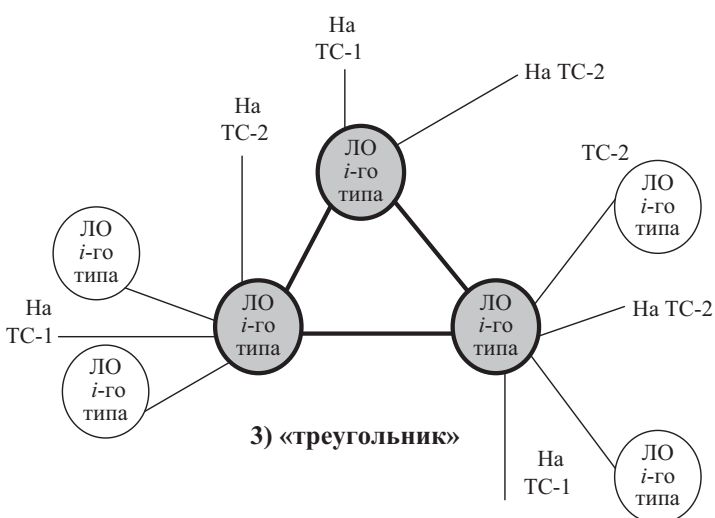


Рис. 3. Усложненный (развернутый) классический вариант построения ТС: сплошная линия – железнодорожное сообщение, пунктирная – автомобильное

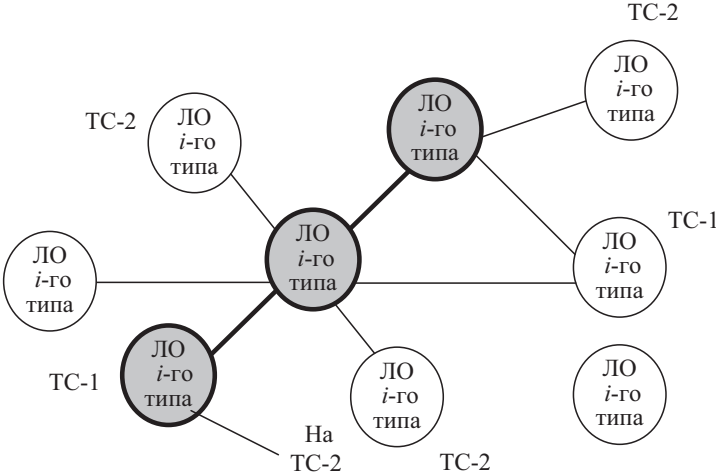
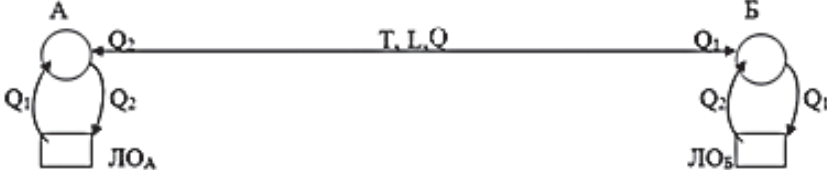
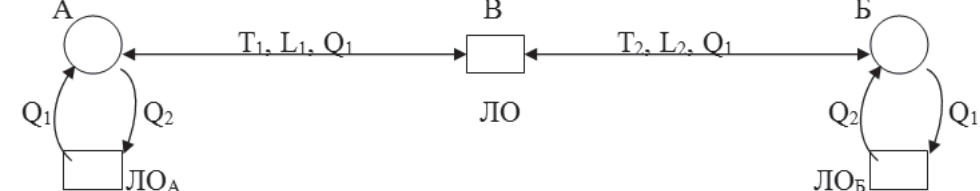
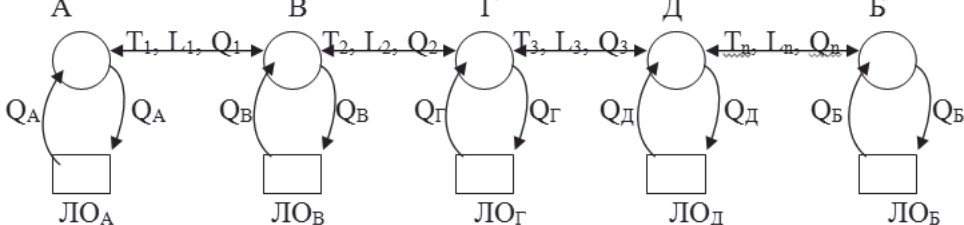
ТАБЛИЦА 1. Классификация морфологии ТС

Признак	Морфологический тип и схема ТС
1. По подключению к путям сообщения видов транспорта	Унимодального подключения (одна и та же транспортная связь не может одновременно обслуживаться несколькими видами транспорта):
	ЛО i-го типа или ЛО i-го типа
	ЛО i-го типа или ЛО i-го типа
	Мультимодального подключения (одна и та же транспортная связь может одновременно обслуживаться несколькими видами транспорта):
	ЛО i-го типа или ЛО i-го типа или ЛО i-го типа

Продолжение табл. 1

Признак	Морфологический тип и схема ТС
2. По взаимодействию региональных ТС	При участии не менее 2 ЛО и не менее 1 участка взаимодействия  1) «звезда»  2) «боулинг» Примечание. Без детализации по видам транспорта на участках ТС. Цветом выделены общие узлы – ЛО, толщиной линии – общие транспортные участки – У. Взаимодействуют две ТС. При участии не менее 2 ЛО и более 1 участка взаимодействия  3) «треугольник»

Продолжение табл. 1

Признак	Морфологический тип и схема ТС
	При участии не менее 2 ЛО и не менее 2 участков взаимодействия  4) «диагональ»
3. По составу ТС	Простая одномодальная ТС 
	Простая мультимодальная ТС  Сложная мультимодальная ТС  Примечание. А, Б – ЛО начала и окончания ТС; В – Д – промежуточные ЛО на ТС; Т – вид транспорта; L – длина ТС/ее участков; Q – объемы перевозок грузов по участкам ТС, по всей ТС и грузопотоки ЛО.

Окончание табл. 1

Признак	Морфологический тип и схема ТС
4. По варианту построения ТС, варианты а, б, в	Примечание. И – изготовители, П – потребители, СП – станция примыкания.

Каждому k -му виду транспорта (подписи дуг) соответствуют тарифное расстояние, срок доставки и тариф на перевозку груза: $T_k \in \{L_{mnk}; T_{mnk}; S_{mnk}\}$. Дуги и их подписи представляют собой U – транспортные участки j -го типа (j – унимодальные и j' – мульти-модальные):

$$\sum U_{in}^{j,j'} = \sum \{L; k; Z; G; S\},$$

где L – протяженность участка ТС, км; k – вид транспорта, обслуживающий данный транспортный участок; Z – техническая оснащенность участка ТС (покрытие ЛО); G – грузонапряженность участка ТС; S – затраты по текущему содержанию и ремонту участка ТС, у. е./год.

Каждому из n узлов цепи – ЛО (квадраты) – на рис. 5 соответствуют определенный тип (по авторской классификации, 1, ..., 9); дислокация (координаты), км; площадь хранения, кв. м; грузоперерабатывающая способность (мощность), тыс. т/год (конт/год, подд/год и др.); R – радиус обслуживания ЛО клиентов, км; S – ассортимент реализуемо-

го ЛО транспортно-логистического сервиса, наимен.; $S_{гр}$ – стоимость грузопереработки, у. е./ед.; I – инвестиции в строительство ЛО, у. е.:

$$\sum \text{ЛО}_{in}^{j,j'} = \sum \{i; D; S_{хр}; Q; R; S; S_{гр}; I\}.$$

Для декомпозиции структуры ТС при исследовании и последующей оптимизации ТСС используется понятие сектор ТС – это совокупность некоторых транспортных участков и некоторых ЛО, соединенных частью логистической цепи доставки груза по маршруту от начального (грузоотправителя) до конечного клиента (грузополучателя). $SEC_i = \{\sum U_{in}^{j,j'}; \sum \text{ЛО}_{in}^{j,j'}\}$ при количестве ЛО и секторов: $N_{\text{ЛО}ni} \geq 2; 1 \geq N_{SECni} < N_{\text{ЛО}ni}$. Это показано на рис. 6.

При этом при проектировании ТС наилучшей конфигурации возникает вопрос выбора вида транспорта, реализующего минимальные затраты (эксплуатационные – для перевозчика, тарифные стоимости – для клиента):

$$T_{abk}(\text{ЛО}_n)_i \rightarrow \min,$$

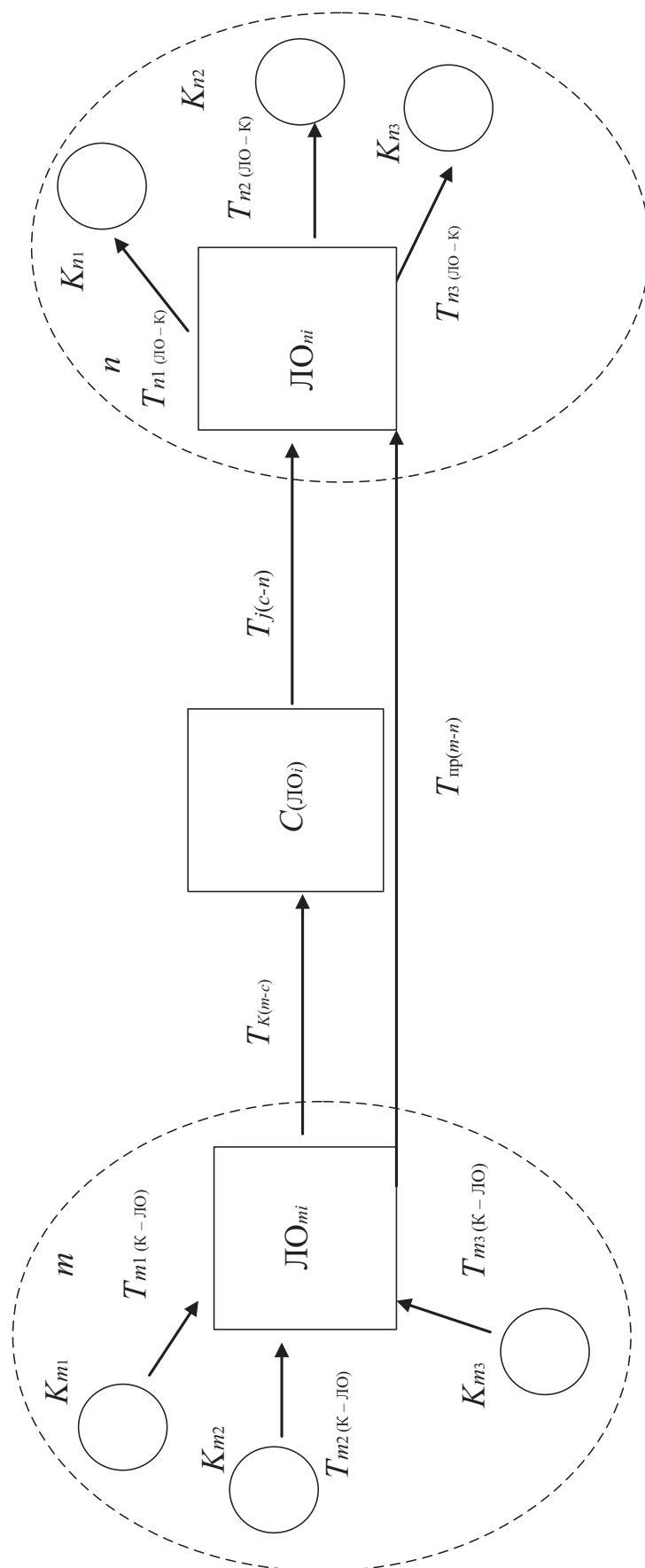


Рис. 4. Типовая ТС

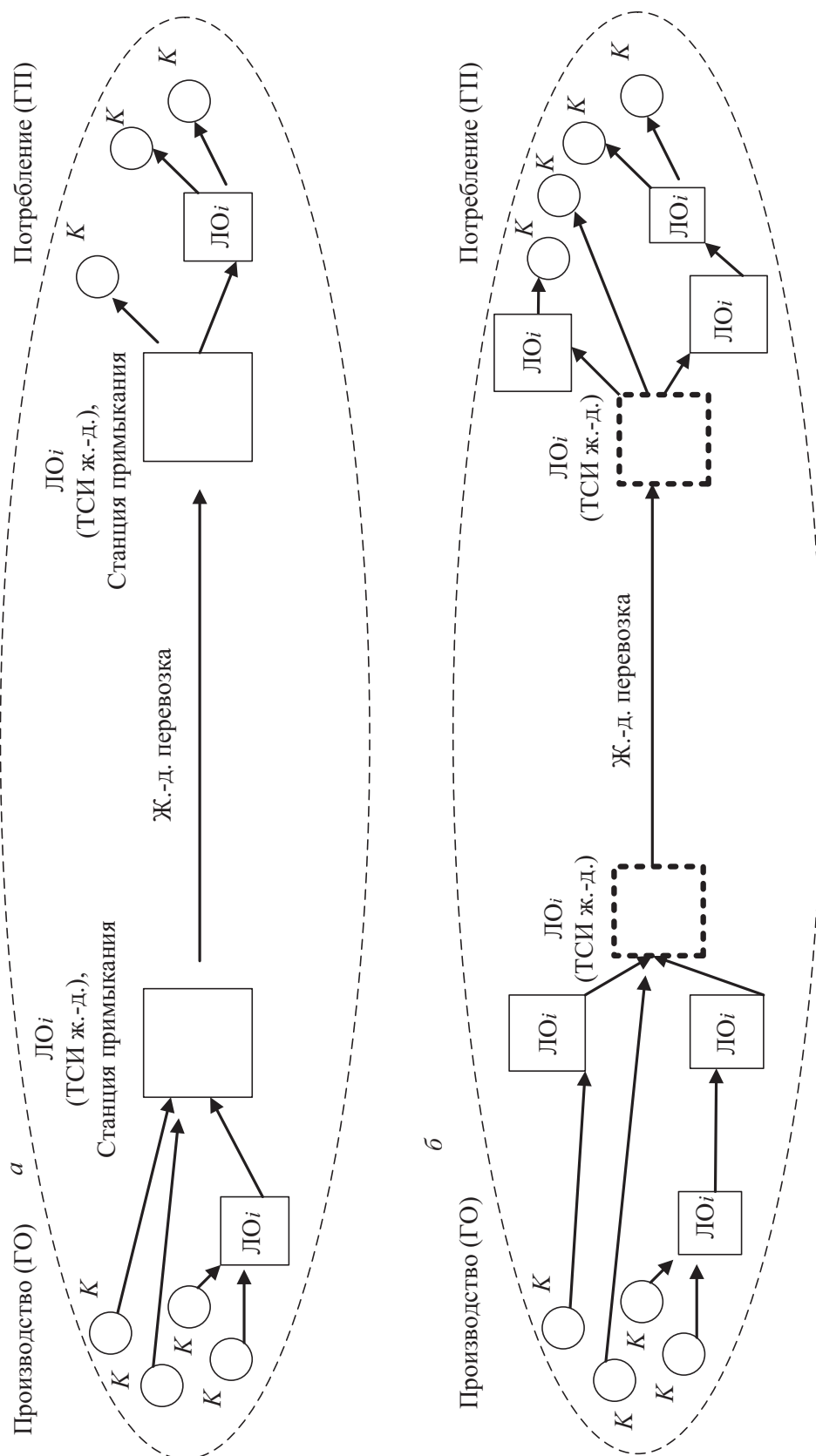


Рис. 5. Варианты конфигурации ТС:

а – простейший вариант конфигурации логистической цепи; б – усложненный вариант конфигурации логистической цепи мультимодального сообщения (с подключением множества клиентов и включением ЛО разных типов)

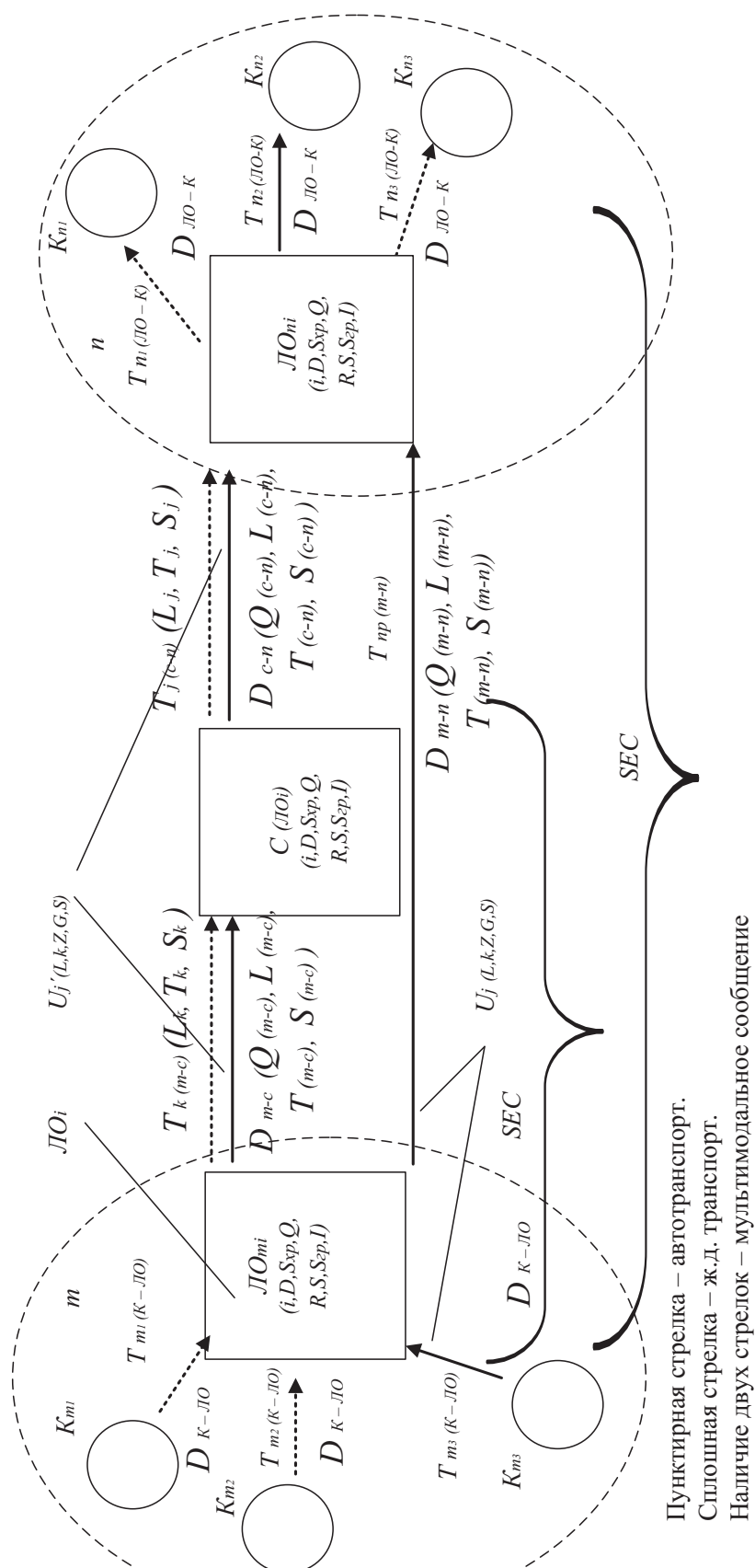


Рис. 6. Морфология ТС

где $T_{abk}(\text{ЛО}_n)_i$ – стоимость перевозки груза k -м видом транспорта через сеть из n ЛО того типа на плече $a-b$, у. е. Каждому узловому пункту цепи – ЛО i -го типа (квадраты) – соответствуют определенные объем грузопереработки (мощность), площадь, дислокация объекта и стоимость грузопереработки:

$$U_i \in \{Q_i; S_{xp}; (XY); S_i\}.$$

Методика выбора состава и конфигурации терминальной сети

Оптимальное проектирование ТС региона подчиняется в общем случае следующей целевой функции:

$$F_{\text{ТС}} = \sum_{n=1}^n N_{\text{ЛО}i},$$

$$F_{\text{ТС}} = \sum_i \sum_j (S_{\text{экспл}ij}; S_{\text{строит}ij}) \rightarrow \min,$$

где $N_{\text{ЛО}}$ – определенное (проектируемое) n количество ЛО i -го типа (по авторской классификации) в составе ТС, ед.; $S_{\text{экспл}ij}$ – эксплуатационные расходы на содержание ЛО i -го типа j -й мощности, у. е./год; $S_{\text{строит}ij}$ – инвестиции в строительство ЛО i -го типа j -й мощности.

Формулировка целевой функции $F_{\text{ТС}}$ читается так: «целевая функция формирования ТС, состоящей из n количества ЛО i -го типа j -й мощности, требует, чтобы затраты на строительство и эксплуатацию ЛО были минимальны». В свою очередь, каждый ЛО i -го типа (по авторской классификации) обладает значимыми при проектировании ТС параметрами:

$$W(\text{ЛО})_i = \{D, Q, S_{\text{пол}}, S_{\text{терр}}, Z\},$$

в которой D – координаты дислокации ЛО, км; Q – планируемый грузооборот, тыс. т/год или т/сут; $S_{\text{пол}}$ – площадь хранения полезная,

подд-мест, $S_{\text{терр}}$ – площадь занимаемой территории ЛО, кв. м; Z – количество необходимой погрузочно-разгрузочной техники и складского оборудования, ед.; при условиях, что: 1) общая результативность работы ТС складывается из $R_{\text{ТС}} = \sum R_{\text{ЛО}i}$ – результативности работы входящих в ее состав ЛО, при $R_{\text{ЛО}i} \geq 1$; 2) привлекаемый на железнодорожные ЛО грузопоток $Q_{\text{ТС}}$ должен быть неотрицателен и больше (либо равен), чем обслуживаемый автотранспортом: $Q_{\text{ат}} \leq Q_{\text{ТС}} \geq 0$; 3) работа ЛО должна приносить прибыль владельцу: $\sum \Pi_{\text{ЛО}i} > 0$.

Требуется так спроектировать ТС с одной стороны и так организовать перевозку грузов по ТС с другой, чтобы затраты как i -того владельца ТС (ЛО) – a , так и j -го клиента – b стремились к минимуму интегральной целевой функции INT :

$$INT = (\sum_i \sum_j S_{\text{сумм}}) \rightarrow \min.$$

Стоимость прохождения груза через ТС, включая стоимость перевозки по тарифу и выполняемых с грузом логистических операций, включая перевалку, грузопереработку на складе и повышение добавленной стоимости, – это логистическая стоимость процесса перевозок. Она определяется как

$$S_{\text{лог}} = \sum S_{\text{тар}k} + \sum S_{\text{ЛО}i,n} + S_{\text{тар}k} + \sum S_{\text{доп}j},$$

здесь $\sum S_{\text{тар}k}$ – сумма тарифов на перевозку груза k -ми видами транспорта по участкам цепи доставки груза, у. е.; $\sum S_{\text{ЛО}i,n}$ – сумма стоимости грузопереработки на количестве ЛО i -го типа, у. е.; $\sum S_{\text{доп}j}$ – суммарная стоимость дополнительного «околотранспортного» сервиса j , повышающего добавленную стоимость груза (товара), у. е. Проводить расчеты при проектировании ТС удобно по отдельным i -м секторам SEC с применением декомпозиции морфологии ТС.

Методика секторного анализа такова: 1) выбрать подсистему для секторного анализа;

2) ввести набор параметров для подсистем: $\{L; k; Z; G; S\}$ для участка и $\{i; D; Q; R; S; P\}$ для ЛО; 3) определить стоимостные показатели по участку; 4) рассмотреть альтернативные варианты участковой конфигурации ТС по виду транспорта, ассортименту услуг, использования ЛО другого типа и расположения, способа «подключения» участка в ТС; 5) назначить другую подсистему для секторного анализа; 6) повторить п. 1–5 до полного просмотра всех участков и их вариантных состояний; 7) поиск наилучшего варианта терминальной сети (НВТС) с использованием экономико-математических моделей с учетом требований целевых функций.

Проектирование ТС проводится путем декомпозиции по отдельным участкам, а затем интегрируется в НВТС как в итоговое решение – оптимальный вариант конфигурации ТС, т.е. такой вариант сочетания ЛО в составе ТС по их типу i , количеству N , размещению в ней D и мощности Q , который обеспечит реализацию экстремума целевой функции:

$$K(ТC_j) = (\sum S_{\text{тран } k} ; \sum S_{\text{компл ЛО } i}) \rightarrow \rightarrow \min \sum_{i, N, D, Q}^{n=1} S_{\text{кл } n},$$

где $S_{\text{кл } n}$ – суммарные затраты n -й стороны (владельца ТС или клиента ТС) при перевозке груза через ТС, у.е./год; $S_{\text{тран } k}$ – суммарные затраты клиента на перевозку груза по всем транспортным участкам ТС, обслуживаемым разными видами транспорта k , у.е./год; $S_{\text{компл ЛО } i}$ – суммарные затраты клиента на сопутствующий перевозке сервис и обслуживание груза, включая переработку груза на некотором количестве ЛО i -го типа, у.е./год.

Требуется отыскать такой альтернативный вариант состава ТС по типам ЛО, их мощности и размещения, при котором будут реализованы минимальные срок окупаемости $T_{\text{ок}}$ для владельца и срок нахождения груза и транспортного средства в ТС ($T_{\text{ТС}}$) для клиента:

$$\text{ALT}(TC, LO) = = \text{VAR}(LO_{iQ(D)1}, LO_{iQ(D)2}, \dots,$$

$$LO_{iQ(D)n} \in TC) \sum_{n=1}^n (S_{\text{инв}}) \rightarrow \rightarrow \min(T_{\text{ок}}),$$

$$\text{ALT}'(TC, LO) = = \text{VAR}(LO_{iQ(D)1}, LO_{iQ(D)2}, \dots, LO_{iQ(D)n} \in TC) \sum_{n=1}^n (S_{\text{сумм}}) \rightarrow \min(T_{\text{ТС}}).$$

В такой постановке задача становится трехуровневой и двухэтапной. На первом уровне выбираются тип и другие параметры ЛО, включаемых в состав ТС; на втором решается вопрос о варианте конфигурации ТС по количеству, размещению и мощности ЛО, входящих в ее состав; на третьем организуются перевозки через запроектированную ТС с позиций клиентоориентированности и логистики. Первый этап – это проектирование ЛО и ТС, а второй – организация перевозок через запроектированную ТС.

Таким образом, разработанная теория расчета ТС и ЛО представляет собой интегрированный вариант теории складских систем О.Б. Маликова, теории расчета грузовых фронтов, теории размещения и специализации грузовых станций в крупных узлах по принципу концентрации грузовой работы на опорных узловых элементах ТС. Интегрированная экономико-математическая модель, как усложненная модификация известных задач концентрации грузовой работы, специализации станций узла и т.п., направлена на решение группы задач: концентрации грузовой работы, специализации станций узла, опорной сети – идентификации типа ЛО, выбора вида транспорта по каждой транспортной связи, выбора количества ЛО, выбора дислокации ЛО, оптимизации конфигурации ТС, оптимизации внутренней параметрической структуры отдельных ЛО, рационального распределения грузовой работы между ЛО, в том числе определения зон тяготения (обслуживания) ЛО [12–15].

Заключение

Была предпринята попытка исследования морфологии ТС, в частности предложена методология формирования ТС по ряду целевых функций. Охарактеризована теория расчета ТС и ЛО, которая отличается интеграцией известных задач концентрации грузовой работы, специализации станций узла и др. Создана методика декомпозиции состава ТС. Проведены моделирование ТС и классификация их по морфологическим признакам. Разработана методика проектирования ТС как отыскания НВТС (двухуровневая и трехэтапная задача формирования ТСС).

Библиографический список

1. Ефименко Ю.И. Железнодорожные станции и узлы / Ю.И. Ефименко, В.И. Апатцев, Н.В. Правдин и др. ; под ред. В.И. Апатцева, Ю.И. Ефименко. – М. : ФБГОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2014. – 450 с.
2. Правдин Н.В. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) / Н.В. Правдин, С.П. Вакуленко, А.К. Головнич и др. ; под ред. Н.В. Правдина, С.П. Вакуленко. – М. : Маршрут, 2014. – 1086 с.
3. Маликов О.Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок : монография / О.Б. Маликов. – М. : ФБГОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2014. – 436 с.
4. Савченко И.Е. Железнодорожные станции и узлы / И.Е. Савченко, С.В. Земблинов, И.И. Страковский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1967. – 467 с.
5. Земблинов С.В. Основы построения транспортных узлов / С.В. Земблинов, В.А. Бураков, А.М. Обермейстер, А.А. Поляков, В.А. Персианов, К.К. Таль, В.П. Ходатаев ; под общ. ред. С.В. Земблинова. – М. : Транспорт, 1959. – 447 с.
6. Стыковые пункты транспортных узлов / под ред. К.Ю. Скалова, Г.С. Молярчук. – М. : Транспорт, 1977. – 184 с.

7. Прокофьева Т.А. Логистические центры в транспортной системе России : учеб. пособие / Т.А. Прокофьева, В.И. Сергеев. – М. : Изд. дом «Экономическая газета», 2012. – 522 с.

8. Балалаев А.С. Транспортно-грузовые системы железных дорог : учеб. пособие / А.С. Балалаев, И.А. Чернышова, А.Ю. Костенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 108 с.

9. Елисеев С.Ю. Система логистического управления взаимодействием с морскими и речными портами и другими видами транспорта / С.Ю. Елисеев. – М. : ВИНТИ РАН, 2005. – 96 с.

10. Дыбская В.В. Управление складированием в цепях поставок / В.В. Дыбская. – М. : Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.

11. Миротин Л.Б. Логистика, технология, проектирование складов, транспортных узлов и терминалов / Л.Б. Миротин, А.В. Бульба, В.А. Демин. – Ростов н/Д. : Феникс, 2009. – 408 с.

12. Покровская О.Д. Терминалистика : общие вопросы / О.Д. Покровская. – Казань : Изд-во «Бук», 2016. – 142 с.

13. Покровская О.Д. Логистическое руководство : математические основы терминалистики, маркировка, классификация и идентификация логистических объектов железнодорожного транспорта / О.Д. Покровская. – Казань : Изд-во «Бук», 2017. – 281 с.

14. Pokrovskaya O. D. Terminalistica as a new methodology for the study of transport and logistics systems of the regions / O. D. Pokrovskaya // Sustainable economic development of regions. Vol. 3 /ed. by L. Shlossman. – Vienna : “East West” Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2014. – 261 p. (see pp. 154–177).

15. Покровская О.Д. Классификация узлов и станций как компонентов транспортной логистики / О.Д. Покровская // Вестн. транспорта Поволжья. – 2016. – № 5 (59). – С. 77–86.

References

1. Yefimenko Y.I., Apatsev V.I., Pravdyn N. V. at all. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [Railway stations and junctions]. Eds: V.I. Apatsev, Y.I. Yefimenko. Moscow, FBGOU “Learning and teaching

railway educational center” Publ., 2014, 450 p. (In Russian)

2. Pravdyn N. V., Vakulenko S. P., Golovich A. K. at all. *Proektyrovanye infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnye i transportnye uzly)* [Designing of railway transport infrastructure (stations, railway junctions and traffic centres)]. Eds: N. V. Pravdyn, S. P. Vakulenko. Moscow, Marshrut Publ., 2014, 1086 p. (In Russian)

3. Malykov O. B. *Perevozky i skladyrovanye tovarov v tsepyakh postavok* [Shipping and warehousing of goods in supply chains]. Moscow, FBGOU “Learning and teaching railway educational center” Publ., 2014, 436 p. (In Russian)

4. Savchenko I. Y., Zemblynov S. V. & Strakovsky I. I. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [Railway stations and junctions]. 2nd iss., updated. Moscow, Transport Publ., 1967, 467 p. (In Russian)

5. Zemblynov S. V., Burakov V. A., Obermeister A. M., Polyakov A. A., Persyanov V. A., Tal K. K. & Khodatayev V. P. *Osnovy postroeniya transportnykh uzlov* [Basic foundation of traffic centres construction]. Ed. by S. V. Zemblynov. Moscow, Transport Publ., 1959, 447 p. (In Russian)

6. *Stykovye punkty transportnykh uzlov* [Division points of traffic centres]. Eds: K. Y. Skalov, G. S. Molyarchuk. Moscow, Transport Publ., 1977, 184 p. (In Russian)

7. Prokofyeva T. A. & Sergeev V. I. *Logisticheskiye tsentry v transportnoy sisteme Rossii* [Logistic centres in the transport system of Russia]. Moscow, Ekonomicheskaya gazeta Publ., 2012, 522 p. (In Russian)

8. Balalaev A. S., Chernyshova I. A. & Kostenko I. A. *Transportno-gruzovye systemy zheleznykh dorog* [Railway transport shipping systems]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2006, 108 p. (In Russian)

9. Yelyseev S. Y. *Systema logisticheskogo upravleniya vzaimodeystviyem s morskymy i rechnymy por-*

tamy i drugimy vydamy transporta [Logistic control system of cooperation with sea ports, river ports and other types of transport]. Moscow, VINITI RAS Publ., 2005, 96 p. (In Russian)

10. Dybskaya V. V. *Upravleniye skladyrovanyem v tsepyakh postavok* [Stock control in supply chains]. Moscow, Alpha-Press Publ., 2009, 720 p. (In Russian)

11. Myrotyn L. B., Bulba A. V. & Demyn V. A. *Logistika, tekhnologiya, proektyrovanye skladov, transportnykh uzlov i terminalov* [Logistics, engineering, warehouse, traffic centres and terminals construction]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2009, 408 p. (In Russian)

12. Pokrovskaya O. D. *Terminalistika: obshche vo-prosy* [Terminalistica: general questions]. Kazan, Buk Publ., 2016, 142 p. (In Russian)

13. Pokrovskaya O. D. *Logisticheskoye rukovodstvo: matematicheskiye osnovy terminalistiki, markirovka, klassifikatsiya i identifikatsiya logisticheskikh objektov zheleznodorozhnogo transporta* [Logistic guide: mathematic foundations of terminalistica marking, classification and identification of logistic objects of railway transport]. Kazan, Buk Publ., 2017, 281 p. (In Russian)

14. Pokrovskaya O. D. *Terminalistica as a new methodology for the study of transport and logistics systems of the regions*. Sustainable economic development of regions. Vol. 3. Ed. by L. Shlossman. Vienna, “East West” Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2014, 261 p. (pp. 154–177).

15. Pokrovskaya O. D. *Klassifikatsiya uzlov i stantsiy kak komponentov transportnoy logistiki* [Classification of centres and stations as the components of transport logistics]. *Vestnyk transporta Povolgya* [Vestnik transport of Povolzhja], 2016, no. 5 (59), pp. 77–86. (In Russian)

*ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент, insight1986@inbox.ru; МАЛИКОВ Олег Борисович – доктор техн. наук, профессор, stadnitskey@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ЗАЧЕШИГРИВА Марина Александровна – канд. техн. наук, доцент (Сибирский государственный университет путей сообщения)

УДК 531.46

А. Н. Савоськин, А. П. Васильев**ДИСЛОКАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСА И РЕЛЬСА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА И ПРИ БОКОВЫХ КОЛЕБАНИЯХ ЭКИПАЖЕЙ**

Дата поступления: 20.06.2016

Решение о публикации: 27.09.2016

Цель: Разработка модели взаимодействия колеса локомотива с рельсом, основанной на учете дискретного строения твердых деформируемых тел с использованием фундаментального понятия о дислокациях кристаллической решетки металлов. Дислокация представляет собой особый вид несовершенства кристаллической решетки, обусловленный отсутствием одного из атомов в каком-либо ее узле. **Методы:** Под действием приложенных нормальных и касательных сил эти дислокации могут перемещаться и выходить на поверхность кристалла или детали, если выполняется, например, условие начала текучести Мизеса, которое можно считать условием выхода дислокаций на поверхность. При этом сила сцепления трактуется как суммарная сила разрушения захватов между группами атомов колеса и рельса, а одновременно происходящий процесс скольжения колеса по рельсу – как процесс «схлопывания» дислокаций, вышедших на поверхность контакта, т. е. как трансляционное пластическое течение (сдвиг без деформации). Такой сдвиг происходит под действием нормального и тангенциального давлений от колеса на рельс, определяющих скорость скольжения точки контакта колеса по рельсу, направленную в сторону скорости движения (по направлению тангенциального давления). **Результаты:** Показано, что сила сцепления зависит от нормального и касательного давлений колеса на рельс, а также от ряда дополнительных факторов, таких как увеличение числа дислокаций с ростом скорости деформации зоны контакта и коэффициента разрушения окисной пленки, при этом разрушение имеющейся на поверхности контакта окисной пленки с нанесенными на нее загрязнениями создает условия для установления физического взаимодействия между атомами колеса и рельса. **Практическая значимость:** Показана удовлетворительная сходимость результатов расчетов боковых колебаний экипажа, полученных при использовании предлагаемой модели, с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: Взаимодействие колеса и рельса, боковые колебания, реализация вращающего момента, дислокация кристаллической решетки, интерметаллоидное соединение, сила сцепления как сила разрушения захватов, скорость скольжения как скорость «схлопывания» дислокаций.

***Anatoly N. Savos'kyn**, D. Sci., professor, elmechtrans@mail.ru; **Andrey P. Vasiliev**, Cand. Sci., associate professor, stud16@yandex.ru (Emperor Nicholas II Moscow State Transport University) (MGUPS (MIIT)).
DISLOCATION MODEL OF WHEEL AND RAIL INTERACTION WITH ROTATIONAL MOMENT
REALIZATION AND CARRIAGE TRANSVERSE OSCILLATIONS

Objective: To develop a model of locomotive wheel and rail interaction, based on the discrete structure of deformed solid bodies with the application of fundamental notion on lattice dislocation of metals. Dislocation is a special type of lattice imperfection, caused by the absence of one of the atoms in any of lattice sites. **Methods:** Under the influence of normal superimposed force and tangential force these dislocations may move and emerge on the crystal or component surface, if, for instance, Mises yield criterion is fulfilled, which can be considered as emergence of dislocations. At the same time adhesive force is treated as total force of entrapment destruction between the groups of wheel and rail atoms,

while simultaneous process of wheel skidding is treated as the “collapse” of dislocations, emerged on the surface of contact device, that is as translational yielding flow (a shift without deformation). Such a shift occurs under the influence of normal and tangential force from a wheel on a rail, determining the slip velocity of a wheel on a rail contact spot, pointed at velocity of travel direction (in the direction of tangential pressure). **Results:** It was shown that adhesive force depends on normal pressure and circumferential pressure on a rail, as well as on a number of complementary factors, such as the number of dislocations increase by the speed growth of deformation contact zone and damage ratio of oxide layer. It should be noted that the damage of oxide layer on the contact surface with contamination creates conditions for the establishing of physical interaction between atoms of a wheel and a rail. **Practical importance:** Satisfactory convergence of figures of transverse oscillations was shown, obtained by means of the suggested model, as well as the experimental data in question.

Keywords: A wheel and a rail interaction, transverse oscillations, rotational moment realization, lattice dislocation, intermetal compound, adhesive force as the force of entrapment, sliding velocity as the velocity of “collapse” dislocation.

В настоящее время наиболее распространенными моделями взаимодействия колеса и рельса являются модели, построенные на основе законов упругого их взаимодействия [1, 2], в которых силу взаимодействия называют *силой крипа*. В [3–7] задача качения деформируемых тел решена с использованием более сложных моделей, учитывающих упругие и неупругие связи. Но при этом не объясняются причины возникновения высоких скоростей скольжения, достигающих у локомотивов 10–15 км/ч при реализации предельных значений силы тяги. Поэтому для решения рассматриваемой задачи, по-видимому, актуальна разработка других, не использованных ранее моделей, которые основаны на теоретических положениях физики деформируемого твердого тела [8]. К таким моделям, позволяющим выполнить описание процессов взаимодействия колеса и рельса, относится предлагаемая нами модель, основанная на учете дискретного строения твердых деформируемых тел с использованием фундаментального понятия о дислокациях кристаллической решетки металлов [9–11]. В рамках этой теории дислокации представляют собой особый вид несовершенства кристаллической решетки; они возникают в процессе изготовления деталей и есть неотъемлемая часть кристаллической решетки металлов.

При появлении дислокаций происходит разрыв кристаллической решетки металла,

равный удвоенному ее шагу $2\Delta r$ (будем принимать $\Delta r \approx 2,2 \cdot 10^{-14}$ м [9]). Если под действием приложенных нагрузок в детали появляется сложное напряженное состояние с наличием касательных напряжений τ , то, когда суммарные напряжения в некоторых ее зонах начинают удовлетворять условию начала текучести, например Мизеса [12, 13] (при плоском напряженном состоянии):

$$\sigma_n^2 + 3\tau^2 > \sigma_{yp}^2, \quad (1)$$

дислокации начнут выходить на поверхность кристалла или детали.

Выход дислокации на поверхность сопровождается выделением во внешнюю среду энергии, которая по данным [9] равна 8 эВ. Вместе с тем энергия активации обменного процесса при объединении поверхностных квазисвободных атомов контактирующих тел составляет менее 1 эВ. Это означает, что при выходе дислокаций на поверхность создаются условия самопроизвольного установления физического взаимодействия между атомами колеса и рельса – *интерметаллоидного соединения (захвата)*, в котором участвует группа атомов.

Области захвата называют *активными центрами*, или *пятнами захвата*. В данном случае при воздействии нормальной и касательной сил произойдет объединение кристаллических структур двух тел в одну,

что называют *холодной сваркой*. Эти явления и вызывают два одновременно протекающих процесса: сцепления колеса и рельса и скольжения колеса по рельсу.

Рассмотрим принципы построения моделей таких одновременно происходящих процессов сцепления и скольжения колеса и рельса с использованием основных положений теории дислокации. В первом приближении будем считать, что при взаимодействии колеса и рельса движение дислокаций происходит под действием приведенной силы $F_{пр}$, вычисляемой по аналогии с условием (1) в предположении равенства напряжений во всех точках плоскости контакта:

$$F_{пр} = \sqrt{\Pi^2 + 3F_{\tau_3}^2}, \quad (2)$$

где F_{τ_3} – эквивалентная касательная сила, которая состоит из суммы наибольшей касательной силы F_{τ_1} (возникающей в пятне контакта от действия вертикальной силы давления колеса на рельс Π), гравитационных сил, обусловленных конусностью бандажа [14], и доли внешней касательной силы тяги F_{τ_2} , приложенной в пятне контакта от рельса к колесу локомотива.

Будем считать, что касательная сила F_{τ_1} складывается двумя слагаемыми. Первая определяется результатами решения контактной задачи теории упругости [15], из которой известно, что под действием силы Π максимум касательных напряжений τ располагается на глубине $0,480 < b < 0,785$, где b – меньшая полуось эллипса контакта. В соответствии с теорией упругого контакта Герца в табл. 4.1 [15] приведены значения τ_{max} в этой точке, изменяющиеся в пределах $0,300 \Pi < \tau_{max} < 0,325 \Pi$. В первом приближении примем, что $\tau_{max} = 0,312 \Pi$ и создается эквивалентной касательной силой F_{τ_1} , составляющей такую же долю от нормальной силы Π , т. е. $F_{\tau_1} = \zeta_{\tau_1} \Pi$, где $\zeta_{\tau_1} = 0,312$.

Второе слагаемое в F_{τ_1} является внешней силой в режиме движения экипажа на выбеге. Оно возникает из-за боковых колебаний, обу-

словленных конусностью бандажа, и определяется гравитационными силами $F_x^{л,п}$ и $F_y^{л,п}$ [14], образующимися в точках контакта левого и правого колес под действием силы Π :

$$F_{max\ x}^{л,п} = \Pi \sqrt{1 + 3[\zeta_{\tau_1} \mp \beta \varphi_{z0}]^2}, \quad (3)$$

$$F_{max\ y}^{л,п} = \Pi \sqrt{1 + 3\left[\zeta_{\tau_1} + \beta \mp \frac{i}{s} y_0\right]^2}. \quad (4)$$

В тяговом режиме движения к силам (3) и (4) добавляются проекции на координатные оси силы тяги $F_k(v_\Sigma)$, приложенной к колесу:

$$F_k(v_\Sigma) = \zeta_k(v_\Sigma) \Pi,$$

где $\zeta_k(v_\Sigma)$ – безразмерный коэффициент тяги; v_Σ – суммарная скорость перемещения точки контакта колеса относительно рельса $v_\Sigma = \omega r_6$, которая складывается из скоростей движения экипажа (центра колеса) v и скольжения точки контакта по рельсу $v_{ск}$, т. е. $v_\Sigma = v + v_{ск}$.

Тогда для режима тяги при наибольшем взаимодействии колес и рельсов выражение (2) примет вид

$$F_{max\ x}^{л,п} = \Pi \sqrt{1 + 3[\zeta_k(v_\Sigma) + \zeta_{\tau_1} \mp \beta \varphi_{z0}]^2}, \quad (5)$$

$$F_{max\ y}^{л,п} = \Pi \sqrt{1 + 3\left[\zeta_k(v_\Sigma) \varphi_{z0} + \zeta_{\tau_1} + \beta \mp \frac{i}{s} y_0\right]^2}. \quad (6)$$

Будем считать, что именно эти касательные силы $F_{max}^{л,п}(F_{max\ x}^{л,п}; F_{max\ y}^{л,п})$ (см. (5) и (6)) и являются приведенными силами, вызывающими движение дислокаций при взаимодействии колеса и рельса.

Допустим, как и в [16], что *сила взаимодействия между колесом и рельсом* $F_{кр}$ есть суммарная сила разрушения захватов в зоне контакта, т. е. зон, в которых установилось физическое взаимодействие между группами атомов колеса и рельса. В рамках этого допущения сила взаимодействия между колесом и рельсом $F_{кр}$ [16] равна

$$F_{крх,y}^{л,п} = 2,342 \cdot 10^6 \mu_y(v_\Sigma) \times \\ \times \Lambda_{p0}(\varepsilon) S_0 F_{прх,y}^{л,п}(v_\Sigma) \left[\frac{F_{прх,y}^{л,п}(v_\Sigma)}{S_0 \sigma_{вн}} \right]^{0,25}, \quad (7)$$

здесь μ_y – коэффициент, учитывающий увеличение числа дислокаций с ростом скорости деформации зоны контакта; $\Lambda_p = 1,15 \Lambda_{p0}(\varepsilon)$ – коэффициент разрушения поверхностной окисной пленки; S_0 – площадь контакта колеса и рельса, определяемая из решения контактной задачи Герца; ε – относительная скорость скольжения колеса по рельсу: $\varepsilon = v_{ск}/v_\Sigma$.

Допустим, что *скольжение* колеса по рельсу происходит вследствие разрушения интерметаллоидных соединений на пятне контакта. Будем его интерпретировать как процесс «схлопывания дислокаций», вышедших на поверхность контакта, – трансляционное (переносное) пластическое течение (сдвиг без деформации). Такие допущения позволяют определить относительную скорость скольжения колеса по рельсу ε

$$\varepsilon = 4,48 \cdot 10^{-6} a \mu_y(v_\Sigma) \times \\ \times \Lambda_{p0}(\varepsilon) F_{пр}(v_\Sigma) \left[\frac{F_{пр}(v_\Sigma)}{S_0 \sigma_{вн}} \right]^{0,25}, \quad (8)$$

где a – большая (поперечная) ось эллипса контакта.

Будем считать, что силы $F_{крх,y}^{л,п}$, определяемые по (7), являются коэффициентами продольного $k_x^{л,п}$ и поперечного $k_y^{л,п}$ крипов левого и правого колес. Тогда поперечные и продольные силы крипа можно рассчитать по известным выражениям

$$F_{кry}^{л,п} = k_y^{л,п} \varepsilon_y^{л,п}, \quad F_{крх}^{л,п} = k_x^{л,п} \varepsilon_x^{л,п}, \quad (9)$$

в которых $\varepsilon_y^{л,п} = \frac{v_{скy}^{л,п}}{v + v_{скy}^{л,п}}$, $\varepsilon_x^{л,п} = \frac{v_{скx}^{л,п}}{v + v_{скx}^{л,п}}$ – относительные поперечные и продольные скорости скольжения левого и правого колес, обусловленные извилистым движением ко-

лесной пары и определяемые по известным формулам.

На основе выражений (9) для сил крипа были выполнены расчеты свободных боковых колебаний элементов электровоза ВЛ10^у как нелинейной системы при скоростях движения 40, 60, 90, 175 и 190 км/ч. В качестве начальных условий задавался относ первой по ходу движения колесной пары $y_0 = 0,007$ м.

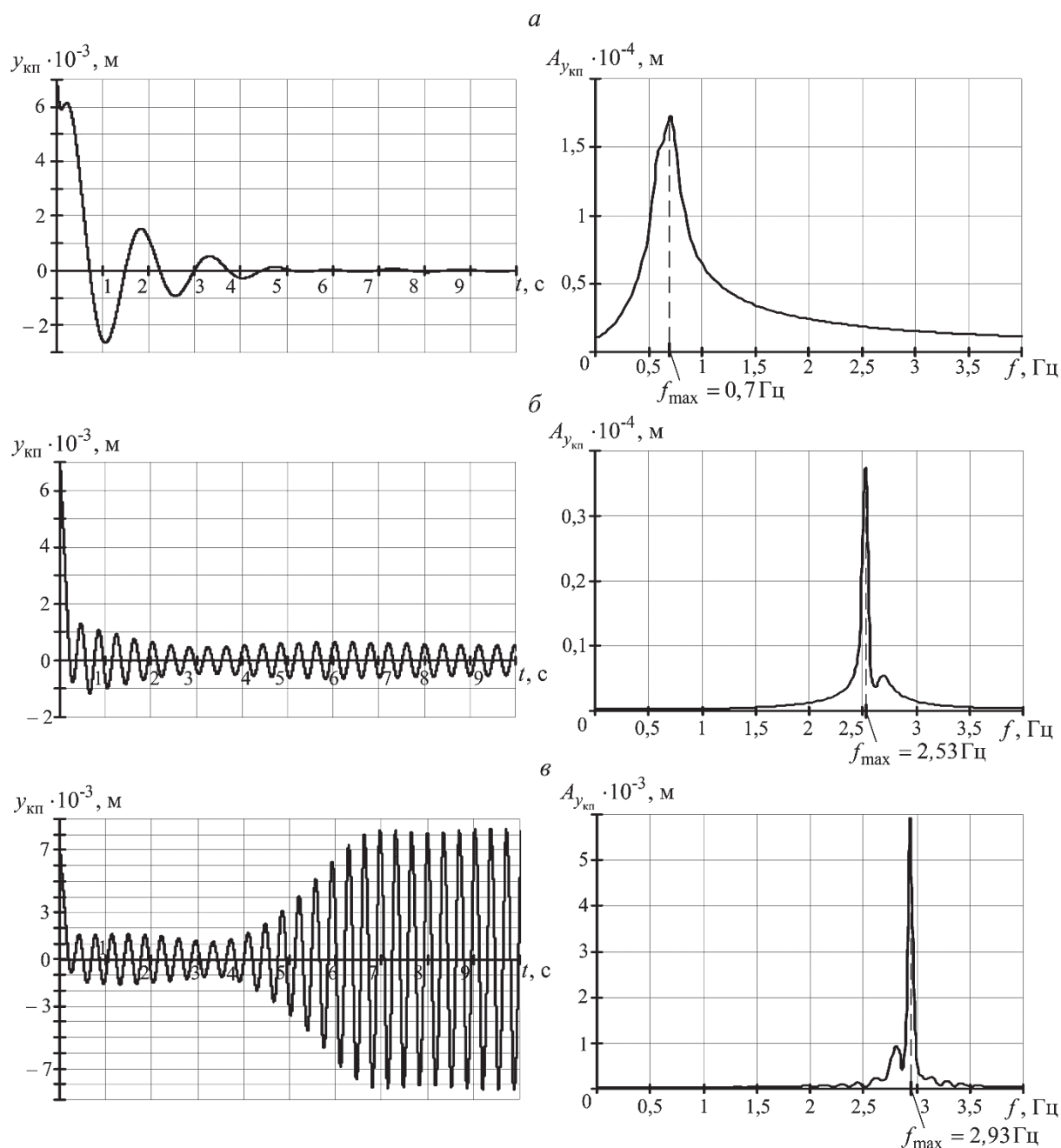
На рисунке, а–в приведены результаты расчета свободных боковых колебаний при скоростях движения 60, 175, 190 км/ч в виде реализаций процессов колебаний отбоя $y_{кп}(t)$ первой по ходу движения колесной пары, а также их амплитудных спектров $A_{y_{кп}}(f)$.

Видно, что свободные колебания отбоя колесной пары при скорости движения 60 км/ч носят затухающий характер с частотой 0,7 Гц. При скорости 175 км/ч колебания происходят с частотой 2,53 Гц и практически не затухают, а при скорости 190 км/ч движение становится неустойчивым, возникают автоколебания с амплитудой примерно 8,5 мм. Критическая скорость по условию устойчивости движения составляет $v_{кр} = 176$ км/ч, а конструкционная скорость $v_k \leq v_{кр} / \sqrt{3} \approx 102$ км/ч, что соответствует техническим характеристикам исследуемого электровоза ВЛ10^у.

Таким образом, по результатам исследования свободных колебаний можно сделать вывод о том, что описание сил взаимодействия колес и рельсов можно выполнять на основе дислокационной модели сцепления.

Заключение

Применяемые в настоящей работе выражения (7) и (8) позволяют рассчитать силы сцепления, как силы разрушения «захватов», возникающих на площадке контакта, а также скорости скольжения колеса по рельсу, как скорости «схлопывания дислокаций», на основе трансляционного пластического течения материала колеса и рельса на контактной площадке. Кроме того, из (7) следует, что сила



Реализации процессов колебаний отхода первой колесной пары и их амплитудные спектры при скоростях движения 60 (*a*), 175 (*б*) и 190 км/ч (*в*)

взаимодействия колеса и рельса является функцией двух аргументов: скорости движения v_{Σ} и относительной скорости скольжения ε , что давно используется при решении тяговых задач по установлению весовой нормы поезда и изучению процессов срыва и восстановления сцепления колес локомотивов с рельсами.

После исследования свободных колебаний можно сделать вывод о том, что описание сил взаимодействия колес и рельсов можно выполнять на основе дислокационной модели сцепления. В дальнейшем будет проведено более подробное сравнение результатов расчета вынужденных колебаний с данными испытаний.

Библиографический список

1. Carter F. W. On the action of locomotive driving wheel / F. W. Carter // *Proceedings of the Royal Society*. – Ser. A. – 1926. – Vol. 112. – P. 151–157.
2. Kalker J. J. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction : *Doct. Thesis* / J. J. Kalker. – Delft : Delft University, 1967. – 160 p.
3. Гольдштейн Р. В. Решение вариационными методами пространственных контактных задач качения с проскальзыванием и сцеплением / Р. В. Гольдштейн, А. Ф. Зазовский, А. А. Спектор, Р. П. Федоренко // *Успехи математики*. – 1982. – Т. 5, № 3/4. – С. 61–102.
4. Голубенко А. Л. Сцепление колеса с рельсом. – 2-е изд. доп. и перераб. / А. Л. Голубенко. – Луганск : Изд-во ВУГУ, 1999. – 476 с.
5. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – М. : Наука, 2001. – 478 с.
6. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1997. – 326 с.
7. Коган А. Я. Взаимодействие колеса и рельса при качении / А. Я. Коган // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. – 2008. – № 8. – С. 26–38.
8. Роботнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Роботнов. – М. : Наука, 1988. – 712 с.
9. Kittel Ch. *Introduction to solid state physics*. Second ed. / Ch. Kittel. – New York : John Wiley & Sons, Inc. ; London : Chapman & Hall, Ltd, 1956. – 617 p.
10. Averbach B. L. The effect of cold work in metals on powder pattern intensities / B. L. Averbach, B. E. Warren // *Appl. Phys.* – 1949. – Vol. 20. – P. 1066–1069.
11. Frank F. C. Multiplication processes for slow moving dislocations / F. C. Frank, W. N. Read // *Phys. Rev.* – 1950. – Vol. 79. – P. 722.
12. Mizis T. N. Adhesion of solids and the effect of surface films / T. N. Mizis, J. S. McFarlane // *Proceedings of the Royal Society*. – Ser. A. – 2002. – N 1969. – P. 224–243.
13. Гельман А. С. Основы сварки давлением / А. С. Гельман. – М. : Машиностроение, 1970. – 312 с.
14. Бурчак Г. П. Совершенствование методики исследования свободных боковых колебаний эки-

пажей / Г. П. Бурчак // *Фундаментальные проблемы динамики и прочности подвижного состава : юбил. сб. науч. тр.* – М. : МИИТ, 1997. – Вып. 912. – С. 3–12.

15. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон ; пер. с англ. В. Э. Наумова, А. А. Спектора ; под ред. Р. В. Гольдштейна. – М. : Мир, 1989. – 510 с.

16. Савоськин А. Н. Прогнозирование характеристик сцепления локомотивов с рельсами / А. Н. Савоськин, Н. Н. Ляпушкин, А. А. Чучин // *Тр. X Междунар. науч.-практ. конференции «Наука и технологии: шаг в будущее – 2014»*. – Прага : Publ. House “Education and science”, 2014. – С. 69–86.

References

1. Carter F. W. On the action of locomotive driving wheel. *Proceedings of the Royal Society*, 1926, ser. A, vol. 112, pp. 151–157.
2. Kalker J. J. *On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction*. *Doct. Thesis*. Delft, Delft University Publ., 1967, 160 p.
3. Goldshteyn R. V., Zazovsky A. F., Spektor A. A. & Fedorenko R. P. Resheniye varyatsionnykh metodamy prostranstvennykh kontaknykh zadach kacheniya s proskalzyvanyem i stseplenyem [Variational methods solving of Herzian three-dimensional problems of rolling with slip and adhesion]. *Uspekhy matematiki*, 1982, vol. 5, no. 3/4, pp. 61–102. (In Russian)
4. Golubenko A. L. *Stsepleniye koleasa s relsom [A wheel and a rail adhesion]*. 2nd ed. updated. Lugansk, VUGU Publ., 1999, 476 p. (In Russian)
5. Goryacheva I. G. *Mekhanika fryktsionnogo vzaimodeistviya [Frictional interaction mechanics]*. Moscow, Nauka Publ., 2001, 478 p. (In Russian)
6. Kogan A. Y. *Dynamika puty i yego vzaimodeistviye s podvyzhnym sostavom [Dynamics of railroads and its interaction with a railway vehicle]*. Moscow, Transport Publ., 1997, 326 p. (In Russian)
7. Kogan A. Y. *Vzaimodeistviye koleasa i relsa pry kachenii [Wheel and rail interaction in the process of rolling]*. *Treniye i smazka v mashynakh i mekhanizmach [Friction and lubrication of engines and mechanisms]*, 2008, no. 8, pp. 26–38. (In Russian)

8. Robotnov Y.N. *Mekhanika deformyruemyego tverdogo tela* [Deformable solid body mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 712 p. (In Russian)
9. Kittel Ch. *Introduction to solid-state physics*. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons Publ., Inc.; London, Chapman & Hall Publ., Ltd, 1956, 617 p.
10. Averbach B. L. & Warren B. E. The effect of cold work in metals on powder pattern intensities. *Appl. Phys.*, 1949, vol. 20, pp. 1066–1069.
11. Frank F. C. & Read W. N. Multiplication processes for slow moving dislocations. *Phys. Rev.*, 1950, vol. 79, pp. 722.
12. Mizis T. N. & McFarlane J. S. Adhesion of solids and the effect of surface films. *Proceedings of the Royal Society*, 1969, no. 202 A, pp. 224–243.
13. Gelman A. S. *Osnovy svarky davleniyem* [The foundation of pressure welding]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1970, 312 pp. (In Russian)
14. Burchak G. P. Sovershenstvovaniye metody issledovaniya svobodnykh bokovykh kolebaniy ekipazhey [The perfection of exploratory procedure of proper transverse oscillations]. *Fundamentalniye problemy dynamiki i prochnosti podvyzhnogo sostava* [Fundamental problems of dynamics and mechanical strength of a railway vehicle]. Jubileinyi sbornik nauchnykh trudov [Festschrift]. Moscow, MIIT Publ., 1997, issue 912, pp. 3–12. (In Russian)
15. Johnson K. *Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya* [Contact interaction mechanics]. Tr. from Eng. V. E. Naumov, A. A. Spektor. Ed. by R. V. Goldshtein. Moscow, Mir Publ., 1989, 510 p. (In Russian)
16. Savoskyn A. N., Lyapushkin N. N. & Chuchin A. A. Prognozyrovaniye kharakteristik stsepleniya lokomotivov s relsamy [Prediction of characteristics of locomotive adhesion with rails]. *Trudy X Mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauka i tekhnologii: shag v budushee-2014"* [Proceedings of Xth Intern. theoretical and practical conference "Science and technologies: a step into the future-2014"]. Prague, Education and science Publ., 2014, pp. 69–86. (In Russian)

*САВОСЬКИН Анатолий Николаевич – доктор техн. наук, профессор, elmechtrans@mail.ru; ВАСИЛЬЕВ Андрей Павлович – канд. техн. наук, доцент, stud16@yandex.ru (Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II (МГУПС (МИИТ))).

УДК 624.20

В. Н. Смирнов**КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ПРОДОЛЬНЫХ УСИЛИЙ В РЕЛЬСАХ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ НА МОСТАХ**

Дата поступления: 05.08.2016

Решение о публикации: 27.09.2016

Цель: Осветить некоторые технические решения, направленные на уменьшение усилий в рельсах бесстыкового пути на мостах. Указанные усилия возникают в сечениях рельсов при изменениях температуры наружного воздуха и продольных воздействиях подвижной временной нагрузки. Наиболее часто для этого используют уравнильные приборы в рельсовых нитях по длине моста. Однако, как показывает практика эксплуатации мостов, эти приборы требуют повышенного внимания при содержании пути, кроме того, они достаточно дороги. Предлагается ряд технических решений, позволяющих избежать установки уравнильных приборов или сократить их количество по длине мостового сооружения. **Методы:** Непрерывный бесстыковой путь может быть реализован как при балластном, так и при безбалластном мостовом полотне, при этом применяются несколько методов решения проблемы. При первом используется принцип «встречных деформаций», когда деформации пролетного строения и балок проезжей части направлены навстречу друг другу, вследствие чего усилия в рельсах не возникают. При втором методе предлагается устраивать в продольных балках проезжей части разрывы с обеспечением встречного направления деформаций элементов пролетного строения.. Еще одно направление – снижение уровня связанности между рельсами и подрельсовым основанием на участке пролетного строения со стороны подвижных опорных частей. **Результаты:** Предлагаемые решения приводят к возможности избежать устройства уравнильных приборов. **Практическая значимость:** Это повысит безопасность движения поездов на мостах с бесстыковым путем.

Ключевые слова: Мост, бесстыковой путь, уравнильные приборы, конструктивные решения, уменьшение усилий в рельсах.

Vladimir N. Smyrnov, D. Sci., professor, head of a chair, svn193921@rambler.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) DESIGN CONCEPTS ON LONGITUDINAL STRESS DECREASE IN RAILING OF LONG-WELDED RAILS ON BRIDGES

Objective: To cover a number of technical decisions, aimed at stress decrease in railing of long-welded rails on bridges. The stress in question occur in rail sections when outside temperature is changing and in the process of longitudinal effects of live super load. **Methods:** Equalizing gears are frequently used in track rails along the length of the bridge. However, as practice of bridge maintenance shows, these devices need special care when maintaining the track and, moreover, are quite expensive. Thus, a number of technical decisions is suggested, which make it possible to avoid equalizing gears' installation or reduce their quantity along the length of the bridge. Seamless long-welded rail may be realized both on ballast and on ballastless deck, in this case several methods of problem solving are applied. In the first case the principle of "oncoming deformations" is applied, when the deformations of a span and floor beams are directed towards each other and, as a result, stresses in railings do not occur. In the second case it is suggested to make breaks in floor beams of bridge way providing the oncoming deformation of span elements. One more case is the reduction of connection level between railings and underfloor bed in span zones on the side of free bearings. **Results:** It becomes possible to avoid the equalizing gears installation. **Practical importance:** the safety of train operation on bridges with long-welded rails.

Keywords: Bridge, long-welded rails, equalizing gears, design concepts, stress decrease.

Введение

Мостовое сооружение как основание для бесстыкового пути отличается от земляного полотна повышенной деформативностью [1], в связи с чем в рельсах бесстыкового пути на мосту возникают дополнительные продольные усилия. Их величина определяется несколькими факторами [2], среди которых особо следует выделить температурные осевые деформации пролетного строения, обуславливающие главную составляющую дополнительных напряжений в сечениях рельсов бесстыкового пути на мосту [3]. Иногда эти напряжения столь велики, что превышают допустимые, вследствие чего задача уменьшения продольных усилий в рельсах становится актуальной.

Состояние проблемы

Как показывают исследования работы мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях (ВСМ), продольные усилия в рельсах бесстыкового пути на мосту тем больше, чем длиннее пролет и мостовое сооружение, например эстакада, чем меньше жесткость опор вдоль оси пути, чем меньше жесткость связей между рельсом и подрельсовым основанием. В практике проектирования мостов на ВСМ применяются различные способы

уменьшения усилий в рельсах бесстыкового пути на мосту [4]. Среди них особенно популярно устройство уравнильных приборов в рельсах ввиду создания разрывов рельсовых нитей и снятия тем самым усилия в месте размещения прибора. Число уравнильных приборов по длине моста должно устанавливаться расчетом продольного взаимодействия моста и бесстыкового пути. Размещение уравнильных приборов является кардинальным решением, но, во-первых, появляется «слабое место» в пути вследствие разрыва рельсовой нити, во-вторых, устройство уравнильных приборов затратно, да к тому же требует повышенного контроля за их состоянием в период эксплуатации.

Приведем некоторые технические решения, разработанные на кафедре «Мосты» ПГУПС, позволяющие обеспечить непрерывность бесстыкового пути в случае, если продольные усилия в рельсах по расчету превышают допустимые, а устройство уравнильных приборов по каким-то причинам невозможно.

Технические решения, связанные с изменением конструкции пролетного строения

На рис. 1 представлено решение, позволяющее избежать возникновения продольных усилий в рельсах непрерывного бесстыкового

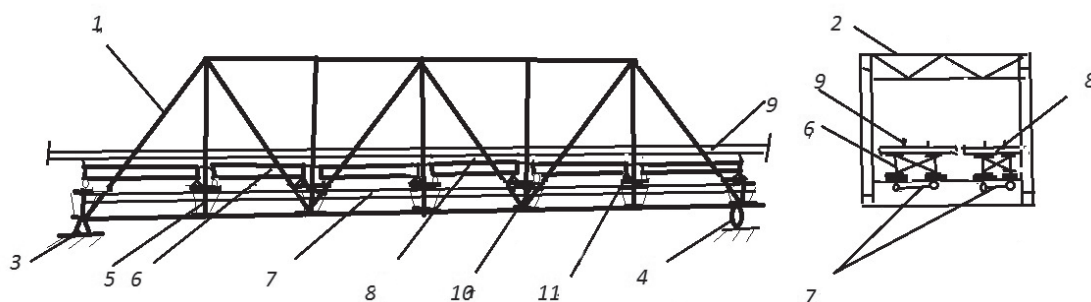


Рис. 1. Металлическое пролетное строение моста с бесстыковым путем:

1 – пролетное строение; 2 – поперечные связи; 3 – неподвижная опорная часть; 4 – подвижная опорная часть пролетного строения; 5 – поперечная балка пролетного строения; 6 – продольная балка проезжей части; 7 – жесткая связь между поперечными балками; 8 – мостовое полотно; 9 – рельс; 10 – подвижная опорная часть продольной балки; 11 – неподвижная опорная часть продольной балки

пути за счет обеспечения встречных температурных деформаций пролетного строения и продольных балок проезжей части путем размещения продольных балок над поперечными с опиранием их на опорные части таким образом, чтобы создавалась возможность встречных деформаций указанных конструкций.

Отличие такого решения от описанного в [5] заключается в устройстве горизонтальных трубчатых связей 7 вдоль оси пути между поперечными балками для того, чтобы избежать изгиба поперечных балок при торможении поездной нагрузки.

Если для реализации решения, показанного на рис. 1, требуются индивидуальные конструкции продольных балок, то на рис. 2 показано, как используются типовые железобетонные плитные пролетные строения при езде на балласте. Эффективность решения несколько ниже, чем в предыдущем случае, в связи с меньшим температурным воздействием на бетон, чем на металл из-за подушки балласта, снижающего теплообмен, но может быть применено при устройстве пути на балласте.

На рис. 3 приведено решение [6], обеспечивающее лучшую плавность проезда, чем в предыдущих случаях. Кроме того, упрощается опирание неразрезной продольной балки на поперечные.

Передача тормозных сил может осуществляться не на крайние (у подвижного конца пролетного строения) поперечные балки, что может вызвать их изгиб в поперечной плоскости, а на специальные гидравлические демпферы, допускающие температурные (медленные) деформации пролетного строения без передачи температурного воздействия, но воспринимающие тормозные силы. При этом усилия в рельсах не возникают.

В другом предложении (рис. 4) металлические неразрезные продольные балки уложены на продольные балки балочной клетки пролетного строения. Их опирание осуществляется через стальные катки или антифрикционные каретки, рассредоточенные по длине пролетного строения, что позволяет уменьшить их поперечные сечения по сравнению с предыдущим случаем. Продольные балки балочной клетки, примыкающие торцами к поперечным балкам, создают надежную одноярусную конструкцию проезжей части. При этом усилия в рельсах бесстыкового пути на мосту практически равны нулю, а тормозные силы четко передаются на устой с неподвижными опорными частями.

На рис. 5 представлена конструкция проезжей части пролетного строения с разрывами продольных балок [7] и устройством в

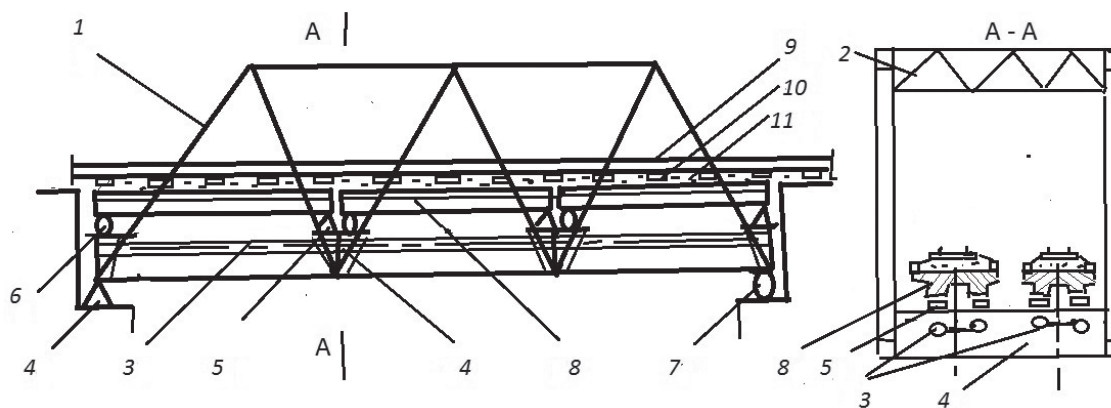


Рис. 2. Металлическое пролетное строение с железобетонными балками и ездой на балласте: 1 – пролетное строение; 2 – поперечные связи; 3 – жесткие продольные связи; 4 – поперечная балка пролетного строения; 5 – неподвижная опорная часть железобетонной балки проезжей части; 6 – подвижная опорная часть железобетонной балки; 7 – подвижная опорная часть пролетного строения; 8 – железобетонная продольная балка проезжей части; 9 – рельс; 10 – железобетонные шпалы; 11 – балласт

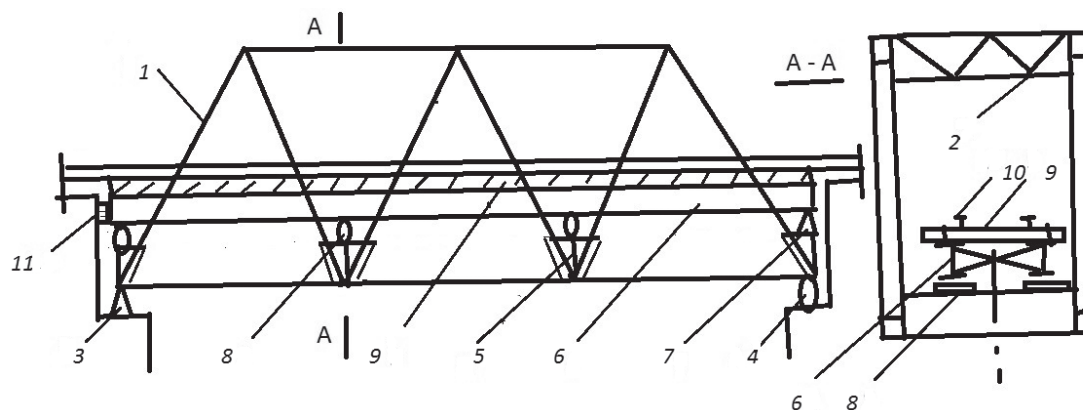


Рис. 3. Пролетное строение с неразрезными балками проезжей части:

1 – металлическое пролетное строение; 2 – поперечные связи; 3 – неподвижная опорная часть пролетного строения; 4 – то же, подвижная; 5 – поперечная балка проезжей части; 6 – металлическая неразрезная продольная балка проезжей части; 7 – неподвижная опорная часть продольной балки; 8 – поперечная балка проезжей части; 9 – мостовое полотно; 10 – рельс бесстыкового пути; 11 – гидравлический демпфер

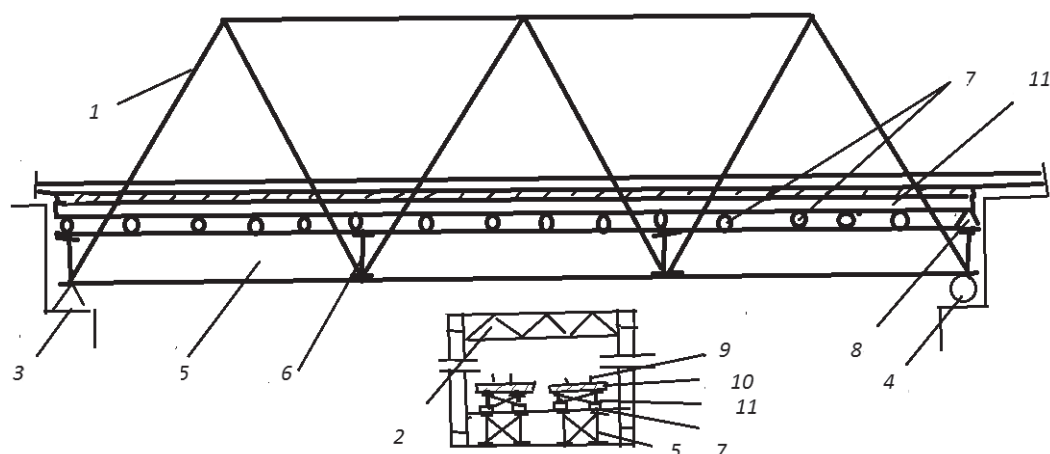


Рис. 4. Сквозное металлическое пролетное строение:

1 – ферма пролетного строения; 2 – поперечные связи; 3 – неподвижная опорная часть пролетного строения; 4 – то же, подвижная; 5 – продольная балка проезжей части; 6 – поперечная балка проезжей части; 7 – катки или антифрикционные каретки; 8 – неподвижная опорная часть неразрезной продольной балки проезжей части; 9 – рельс; 10 – мостовое полотно; 11 – неразрезная балка проезжей части

местах их разрывов продольно-подвижного опирания. Вследствие встречных деформаций пролетного строения и продольных балок проезжей части в рельсах бесстыкового пути температурные усилия не возникают. Однако следствием разрывов становится возможность изгиба поперечных балок проезжей части в

направлении вдоль оси пути при действии тормозных нагрузок. Чтобы избежать этого, в местах разрывов продольных балок предполагается устройство гидравлических демпферов, устроенных таким образом, что достигается возможность медленных деформаций продольных балок от изменения температуры

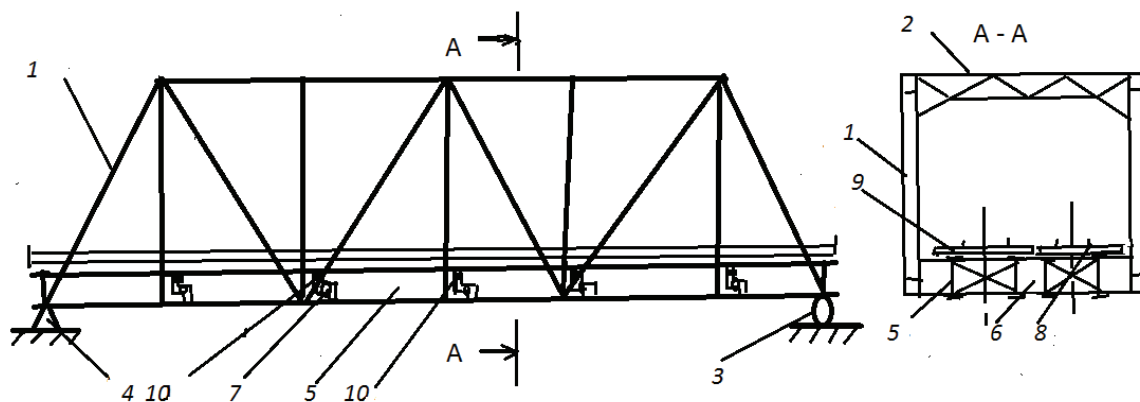


Рис. 5. Металлическое сквозное пролетное строение с разрывами продольных балок:
 1 – ферма пролетного строения; 2 – поперечные связи; 3 – подвижная опорная часть пролетного строения; 4 – то же, неподвижная; 5 – продольная балка; 6 – поперечная балка проезжей части; 7 – продольно-подвижное опирание продольной балки; 8 – рельс; 9 – мостовое полотно; 10 – гидравлический демпфер

и передачи достаточно кратковременно действующих тормозных сил. Медленные деформации позволяют разгрузить рельсы при изменениях температуры, а демпферы препятствуют деформациям поперечных балок при действии тормозных сил.

Технические решения по снижению усилий в рельсах, основанные на уменьшении сил сопротивления смещениям конца пролетного строения

Эпюры продольных усилий по концам моста и на подходах имеют максимумы, иногда, как показывают расчеты, достигающие больших значений. Во избежание этого в районе конца пролетного строения со стороны подвижных опорных частей целесообразно устранение связей между рельсом и подрельсовым основанием, тогда на участках, где связи отсутствуют, деформации пролетного строения усилий в рельсах не вызывают.

Величину погонного сопротивления [8] на участке 2 рис. 6 можно уменьшить устройством антифрикционного покрытия в паре с полированным стальным листом [9].

Для уменьшения усилий в рельсах бесстыкового пути в районе подвижного конца пролетного строения и подхода возможно

устройство антифрикционного покрытия [9] по верху продольных балок пролетного строения. На рис. 7 показано наличие двух участков: на участке 1 железобетонная плита безбалластного мостового полотна прикреплена к продольным балкам жестко, что помогает воспринимать тормозные силы и ограничивает величину раскрытия зазора в случае излома рельса при понижении температуры, на участке 2 – связь между плитой и балкой антифрикционная. Скольжение продольной балки относительно плиты на этом участке проходит без возникновения усилий в рельсах.

Желание применять сборные конструкции для железобетонной плиты безбалластного мостового полотна [11] может быть реализовано в решении, приведенном на рис. 8. Как известно, в случае безбалластного мостового полотна в виде железобетонных плит типа БМП в рельсах непрерывного бесстыкового пути возникают при изменении температуры большие усилия, обусловленные жесткими связями между плитой и металлическими балками. Чтобы уменьшить величину этих усилий, предложено решение в виде двухплитной сборной конструкции, когда плиты изготавливаются попарно, и для верхней плиты опалубкой служит нижняя [12], чем обеспечивается тесное сопряжение плит.

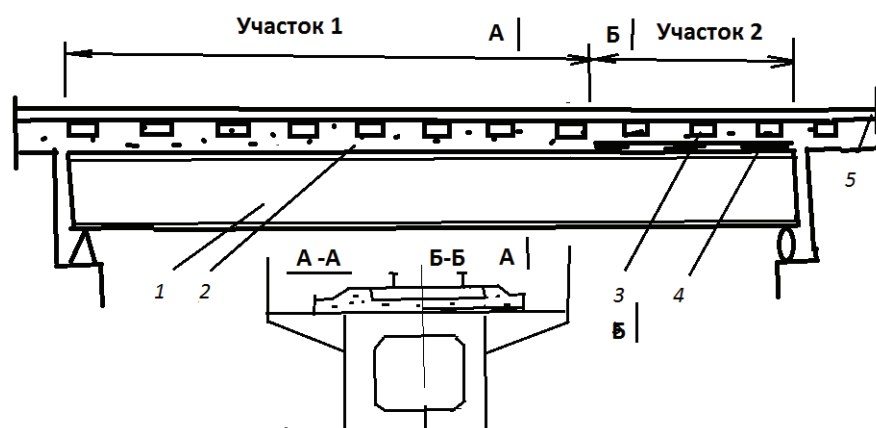


Рис. 6. Металлическое пролетное строение с ездой на балласте:

- 1 – сплошнотенчатое металлическое пролетное строение; 2 – балластный слой;
3 – железобетонные шпалы; 4 – антифрикционное покрытие под стальным листом;
5 – рельс бесстыкового пути

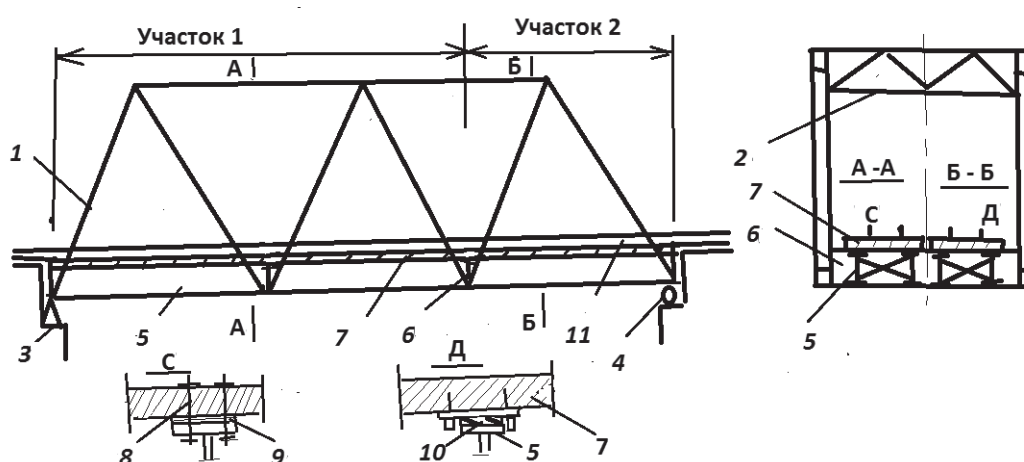


Рис. 7. Металлическое сквозное пролетное строение с безбалластным плитным мостовым полотном:

- 1 – ферма пролетного строения; 2 – поперечные связи; 3 – неподвижная опорная часть пролетного строения; 4 – то же, подвижная; 5 – продольная балка проезжей части; 6 – поперечная балка проезжей части; 7 – железобетонное мостовое полотно; 8 – высокопрочные шпильки; 9 – прокладка; 10 – антифрикционная подкладка; 11 – рельс

На части длины в районе неподвижных опорных частей (участок 1 на рис. 8) плиты объединяются жестко (или для улучшения динамических характеристик через упругую прокладку), а на участке 2 – со стороны подвижного конца пролетного строения – через антифрикционное покрытие, укладываемое на нижнюю плиту, на которой устраивается направляющий жёлоб для предохранения от

поперечного смещения верхних плит. При температурной деформации пролетного строения на участке 2 продольные усилия в рельсах бесстыкового пути не возникают.

Что касается рельсов на участке 1, то вследствие жесткого объединения верхней и нижней плит, обусловленного устройством упоров 8 и высокопрочных шпилек 6, в них усилия возникают.



Рис. 8. Пролетное строение с двухплитным мостовым полотном:

1 – неподвижная опорная часть; 2 – пролетное строение; 3 – рельс; 4 – верхняя железобетонная плита; 5 – нижняя железобетонная плита с продольным жёлобом; 6 – высокопрочная шпилька, соединяющая обе плиты; 7 – главная балка; 8 – упор в верхней плите; 9 – высокопрочная шпилька для крепления нижней плиты; 10 – подвижная опорная часть пролетного строения; 11 – антифрикционный слой по нижней плите

Заключение

Приведенными примерами не исчерпывается круг возможных технических решений, позволяющих понизить уровень напряженно-деформированного состояния рельсов бесстыкового пути на мостах при изменениях температуры окружающего воздуха [13–15]. Учитывая достаточно суровые климатические условия нашей страны, разработка предложений по устройству непрерывного бесстыкового пути представляется актуальной.

Библиографический список

1. СНиП 2.05.03–84 «Мосты и трубы». – М.: ГП ЦПП; Минстрой России, 1996. – 176 с.
2. Смирнов В. Н. Факторы, влияющие на усилия в рельсах бесстыкового пути на мостах высокоскоростных железнодорожных магистралей / В. Н. Смирнов, В. А. Бешлиу. Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 5. – С. 32–34.
3. Смирнов В. Н. Взаимодействие бесстыкового пути с мостовыми сооружениями на высокоскоростных магистралях: учеб. пособие / В. Н. Смирнов. –

М.: ФГБОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2015. – 96 с.

4. Смирнов В. Н., Уменьшение усилий в элементах системы «мост–бесстыковой путь» / В. Н. Смирнов, А. И. Пальцева // Путь и путевое хозяйство. – 2012. – № 8. – С. 28–31.
5. Козьмин Ю. Г. Пролетное строение металлического моста с бесстыковым путем: патент на изобретение № 2098544 от 13.12.1995 г. / Ю. Г. Козьмин, С. Р. Владимирский, А. Г. Доильницын, В. Н. Смирнов. – М., 1995.
6. Смирнов В. Н. Пролетное строение металлического моста с бесстыковым путем: патент на полезную модель № 120107 от 16.02.2012 г. / В. Н. Смирнов, А. И. Пальцева. – М., 2012.
7. Богданов Г. И. Проектирование мостов и труб. Металлические конструкции: учебник / Г. И. Богданов, С. Р. Владимирский, Ю. Г. Козьмин, В. В. Кондратов. – М.: Маршрут, 2005. – 460 с.
8. Прокопович В. С. Определение характеристик связей между рельсами бесстыкового пути и пролетными строениями моста / В. С. Прокопович // Тез. докл. науч.-практ. конференции «Вклад питомцев университета в развитие отечественного мостостроения». – СПб.: ПГУПС, 1999. – С. 47–49.
9. Смирнов В. Н. Железобетонное балочное пролетное строение железнодорожного моста: патент на

изобретение № 2119564 от 15.05.1997 г. / В. Н. Смирнов, О. Д. Тананайко. – М., 1997.

10. Смирнов В. Н. Металлическое пролетное строение моста с бесстыковым путем : патент на изобретение № 2120513 от 15.05.1997 г. / В. Н. Смирнов. – М., 1997.

11. Чижев С. В. Актуальность строительства мостов под ВСМ в условиях Узбекистана / С. В. Чижев, Э. Т. Яхшиев // Новые технологии в мостостроении : сб. тр. Междунар. науч.-технич. конференции / под ред. В. Н. Смирнова. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 97–100.

12. Мурагина А. О. Безбалластное мостовое полотно на высокоскоростных магистралях / А. О. Мурагина, Ю. О. Мурагина // Новые технологии в мостостроении : сб. тр. Междунар. науч.-технич. конференции / под ред. В. Н. Смирнова. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 91–93.

13. Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях : монография / под ред. В. Н. Смирнова. – СПб. : ПГУПС, 2015. – 274 с.

14. Смирнов В. Н. Проектирование мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, А. И. Пальцева // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 5. – С. 30–31.

15. Смирнов В. Н. Мостовые переходы на высокоскоростных магистралях (ВСМ) / В. Н. Смирнов // 125 лет в мостостроении : сб. тр. / под ред. В. Н. Смирнова. – СПб. : ПГУПС, 2008. – С. 103–112.

References

1. SNiP 2.05.03–84. *Mosty i truby* [Construction Norms and Regulations 2.05.03–84. Bridges and pipes]. Moscow, Federal State Unitary Enterprise Design products of mass application Center, Mynstroy Rossii [Ministry of construction, housing and communal services of the Russian Federation], 1996, 176 p. (In Russian)

2. Smyrnov V. N. & Beshliu V. A. Faktory, vliyayushie na usilya v relsakh besстыkovogo puty na mostakh vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralekh [Factors influencing the stress in railing of long-welded rails on bridges of high-speed main

lines]. *Industrial and civil engineering*, 2011, no. 5, pp. 32–34. (In Russian)

3. Smyrnov V. N. *Vzaimodeystviye besстыkovogo puty s mostovymy sooruzheniyamy na vysokoskorostnykh magistralyakh* [Long-welded rails and bridge constructions interaction on high-speed main lines]. Moscow, FGBOU “Learning and teaching educational centre of railway transport” Publ., 2015, 96 p. (In Russian)

4. Smyrnov V. N. & Paltseva A. I. Umensheniye usliy v elementakh systemy “most-besстыkovoy put” [Stress decrease in elements of “bridge-long-welded rails” system]. *Put i putevoye khozyajstvo* [Track and track facilities], 2012, no. 8, pp. 28–31. (In Russian)

5. Kozmyn Y. G., Doilnitsyn A. G., Vladymyrskiy S. R. & Smyrnov V. N. *Proletnoye stroyeniye metallichesкого mosta s besстыkovym putem. Patent na izobreteniyе № 2098544 ot 13.12.1995* [The span structure of a metal bridge with long-welded rails. Patent for invention N 2098544 from 13.12.1995]. Moscow, 1995. (In Russian)

6. Smyrnov V. N. & Paltseva A. I. *Proletnoye stroyeniye metallichesкого mosta s besстыkovym putem. Patent na poleznuyu model № 120107 ot 16.02.2012* [The span structure of a metal bridge with long-welded rails. Useful model patent N 120107 from 16.02.2012]. Moscow, 2012. (In Russian)

7. Bogdanov G. I., Vladimirsky S. R., Kozmyn Y. G. & Kondratov V. V. *Proyektyrovaniye mostov i trub. Metallicheskiye konstruksii* [Bridge and pipes design. Metal constructions]. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 460 p. (In Russian)

8. Prokopovich V. S. *Opredeleniye kharakteristik svyazey mezhdu relsamy besстыkovogo puty i proletnymi stroyeniyamy mosta* [Identification of interlinking characteristics of long-welded rails and bridge spans]. *Scientific conference abstracts “Alumni contribution in domestic bridge engineering”*. Saint Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., 1999, pp. 47–49. (In Russian)

9. Smyrnov V. N. & Tananayko O. D. *Zhelezobetonnoye balochnoye proletnoye stroyeniye zheleznodorozhnogo mosta. Patent na izobreteniyе № 2119564 ot 15.05.1997* [Ferroconcrete braced span of a railway bridge. Patent for invention N 2119564 from 15.05.1997]. Moscow, 1997. (In Russian)

10. Smyrnov V.N. *Metallycheskoye proletnoye stroyeniye mosta s besstykovym putem. Patent na izobreteniyе № 2120513 ot 15.05.1997* [Metal bridge span with long-welded rails. Patent for invention N 2120513 from 15.05.1997]. Moscow, 1997. (In Russian)
11. Chyzhov S.V. & Yakhshiyev E.T. Aktualnost stroitelstva mostov pod VSM v usloviyakh Uzbekistana [The topicality of bridge construction under high-speed main line in the conditions of Uzbekistan]. *Noviye tekhnologii v mostostroyenii. Sb. trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [New technologies in bridge engineering. Coll. Papers of International scientific and technical conference]. Ed. by V.N. Smirnov. Saint Petersburg, St. Petersburg State Transport University Publ., 2015, pp. 97–100. (In Russian)
12. Muragyna A.O. & Muragyna Y.O. Besballastnoye mostovoye polотно na vysokoskorostnykh magystralyakh [Ballastless deck on high-speed main lines]. *Noviye tekhnologii v mostostroyenii. Sbornyk trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [New technologies in bridge engineering. Coll. Papers of International scientific and technical conference]. Ed. by V.N. Smirnov. Saint Petersburg, St. Petersburg State Transport University Publ., 2015, pp. 91–93. (In Russian)
13. *Mosty na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magystralyakh* [Bridges on high-speed main line railroads]. Ed. by V.N. Smirnov. Saint Petersburg, St. Petersburg State Transport University Publ., 2015, 274 p. (In Russian)
14. Smyrnov V.N. & Paltseva A.I. Proyektirovaniye mostov na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magystralyakh [Bridge engineering on high-speed main line railroads]. *Industrial and civil engineering*, 2011, no. 5, pp. 30–31. (In Russian)
15. Smyrnov V.N. Mostoviye perekhody na vysokoskorostnykh magystralyakh (VSM) [Highway stream crossing on high-speed main lines]. *125 let v mostostroyenii. Sb. trudov* [125 years in bridge engineering. Coll. papers]. Ed. by V.N. Smirnov. Saint Petersburg, St. Petersburg State Transport University Publ., 2008, pp. 103–112. (In Russian)

СМИРНОВ Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, svn193921@rambler.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра 1).

УДК 629.4.01

Т. С. Титова, А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, М. В. Евстафьева**ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ПРИМЕНЕНИЕМ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ УДЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ***

Дата поступления: 14.02.2017

Решение о публикации: 13.03.2017

Цель: Определение критериев для оценки эффективности производства на железнодорожном транспорте. **Методы:** Для оценки энергетической эффективности производства использовать абсолютные показатели энергопотребления неудобно, так как они не дают возможности учесть объемы последнего. Поэтому на практике применяются так называемые удельные показатели, прежде всего энергоёмкость. Так как продукцией железнодорожного транспорта являются перевозки, то единицей для оценки должен был бы считаться тонно-километр нетто. Однако процесс перевозок достаточно сложный и состоит из большого количества составных частей и этапов, а различные виды перевозок – грузовые и пассажирские – сильно отличаются как по технологии, так и по виду используемого подвижного состава. Особенно выделяются в этом плане скоростные и высокоскоростные пассажирские перевозки, для которых применяется специализированный подвижной состав, имеющий значительные отличия от традиционного. **Результаты:** Для качественной оценки процесса перевозок, их подвидов и этапов, а также отдельных служб и предприятий железнодорожного транспорта традиционно используются отличные от энергоёмкости производственной деятельности единицы, специализированные для каждого конкретного случая. Главным критерием выбора единиц для оценки при этом считается определение единицы продукции той или иной службы и предприятия. **Практическая значимость:** К примеру, для локомотивной службы продукцией является перемещение не грузов, а вагонов с грузом. Поэтому наилучшим критерием для оценки в магистральном грузовом и пассажирском движении служит удельное энергопотребление на тонно-километр брутто. При выполнении маневровой работы проще оценить время работы маневрового локомотива, так как многочисленные перемещения вагонов при формировании поездов не всегда поддаются оценке и учету. Единицы измерения энергии также могут быть различными. При анализе работы тягового подвижного состава лучше применять конечную энергию, а для оценки нагрузки на окружающую среду – первичную. Если же в железнодорожной системе преимущественно применяется только один вид тяги, например тепловозная, в качестве единиц удобнее использовать объем или массу потребляемых энергоресурсов.

Ключевые слова: Железнодорожный транспорт, энергоэффективность, инновации, расход энергии, приведенный тонно-километр.

Tamila S. Tytova, D. Sci, professor, vice-rector for the research, titova@pgups.ru; ***Andrey M. Yevstafiyev**, Cand. Sci., associate professor, head of a chair, evstam@mail.ru; **Mikhail Y. Izvaryn**, Cand. Sci., associate professor, misha3568723@yandex.ru; **Marina V. Yevstafiyeva**, postgraduate student, marina88spb@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) **ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF RAIL ACTIVITY WITH THE SPECIFIC UNITS OF MEASUREMENT APPLICATION**

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

Objective: It is inconvenient to use absolute indices of energy consumption in order to estimate energy efficiency of production as they set aside the rate of production. **Methods:** Therefore, the so-called specific indices are used in practice, first of all energy capacity. As traffic is the product of railway transport, net ton-kilometer should have been taken for the unit of assessment. However, the process of transporting is quite complicated and consists of a number of parts and stages and different kinds of transportation – goods transportation and carriage of passengers – vary considerably both in technology and the choice of the type of a vehicle. Speed and high-speed carriage of passengers stand out as a specialized vehicle which is used in this type of transportation has significant differences with a traditional one. **Results:** Thus, traditionally the units different from the units of energy content of production activity are applied in order to obtain qualitative assessment of transportation process, the subtypes and stages, as well as certain services and railway companies. These units are specialized for each concrete case. It should be noted that the main criterion for the selection of assessment units is the identification of a production unit of one or another service and company. **Practical importance:** Thus, for instance, locomotive service production unit is not the transportation of goods, but the transportation of railway cars with goods. Therefore, the best criterion for the assessment in main-line goods service and passenger traffic is the rate of energy consumption on gross tonne-kilometer. In the process of shunting service realization it is easier to assess the time of switcher functioning, as the multiple shifting of cars in the process of train formation are usually unassessable and underdeterminable. The units of energy estimation can also be different. When analyzing a tractive vehicle functioning, it is preferable to use the final energy, whereas for the assessment of environmental load it is better to use primary energy. In case only one type of traction is used in the railway system, for instance, diesel traction, it is more convenient to use the volume or mass of consumed energy resources.

Keywords: Railway transport, energy efficiency, innovations, energy consumption, virtual ton-km.

Введение

Для оценки энергоэффективности различных видов деятельности человека используется ряд показателей. Основными из них являются энергоемкость (или удельный расход топливно-энергетического ресурса (ТЭР) на единицу продукции), представляющая собой отношение количества потребленных энерго-ресурсов к выполненной работе или произведенной продукции и обратный ему показатель энергоэффективности, часто применяемый за рубежом, характеризующий объем выполненной работы на единицу потребленного ТЭР [1–3]. При этом процесс оценки не исключает использование и абсолютных единиц [1, 4].

Оценка энергоэффективности

Так как для железнодорожного транспорта продукцией являются перевозки, то его энерго-

эффективности определяются по отношению к выполненному грузообороту (измеряется в тонно-километрах [ткм] нетто) или коммерческому (тарифному) грузообороту (тарифных или коммерческих, либо тонно-километрах нетто), но эти показатели отличаются незначительно. Энергоэффективность в пассажирском движении оценивается по отношению к пассажирообороту (пасс-км) [1, 2, 4–10]. Для того чтобы оценить энергоэффективность работы железной дороги в целом, как в пассажирском, так и в грузовом движении, используется показатель «Приведенный ткм». За рубежом он иногда называется «Единица измерения перевозочной деятельности», или «Транспортная единица» (transport unit) [2]. При этом приведение осуществляется простым суммированием пассажирооборота и коммерческого грузооборота.

Наибольшую часть энергопотребления при перевозках по железной дороге составляет расход энергоресурсов на тягу. В то же время приведенные выше показатели не позволяют

определить, насколько эффективно с точки зрения расходования энергоресурсов применяется тяговый подвижной состав, так как их величина зависит и от общих показателей (коэффициент загрузки вагонов, весовые нормы, населенность пассажирских поездов и т. д.). Поэтому в таких случаях используется не продукция железнодорожного транспорта в виде ткм нетто или пассажирооборота, а выполненная работа в виде ткм брутто как для грузового, так и для пассажирского движения.

В качестве измерителя потребления энергоресурсов принимается масса условного топлива (кг у. т., т у. т.), масса дизельного (натурного) топлива (кг д. т., т д. т.), либо его объем (литры, галлоны и пр.), расход электрической энергии (кВт·ч). За рубежом за «условное топливо», в отличие от РФ, принимается не угольный, а нефтяной эквивалент. В последнее время в мире наблюдается тенденция отказа от понятия «Потребление энергоресурсов» с заменой его на понятие «Потребление энергии». Кроме того, в статистических данных ООН, ЮНЕСКО, Международного союза железных дорог (МСЖД) и Международного энергетического агентства (МЭА) для оценки энергии все более часто используются единицы системы измерений СИ. В этом случае затраченная конечная и первичная энергии измеряются в джоулях или в производных от него единицах: килоджоулях (кДж), мегаджоулях (МДж), гигаджоулях (ГДж), тераджоулях (ТДж) и петаджоулях (ПДж). Как правило, данных производных величин достаточно для оценки энергопотребления железнодорожных систем стран мира. Джоуль и его производные легко переводятся в любые применяемые величины, по которым оценивается потребление энергоресурсов.

Энергоэффективность грузовых перевозок в США и Канаде

В США, где в качестве основной тяги на железных дорогах I класса применяется тепловозная тяга, энергоэффективность оценивает-

ся как коммерческий грузооборот (в тонно-милях), выполняемый на 1 галлоне топлива. Необходимо учитывать, что 1 галлон (жидкостный) США равен 3,785 л. Для оценки грузооборота в США берется сухопутная миля, равная 1,609 км, и так называемая «короткая» тонна, равная 0,9072, привычной для нас метрической тонны. Физический смысл этого понятия состоит в том, что оно представляет собой расстояние, на которое можно перевести 1 т груза, израсходовав 1 галлон топлива.

В Канаде применяется тот же принцип оценки энергоэффективности, что и в США. Разница состоит только в том, что для оценки используется канадский галлон, равный 4,546 л.

Так как в США и Канаде крайне мал объем перевозок на электротяге, доля электрифицированных линий снижалась из-за перевозки контейнеров в 2 яруса [11], а электровозы эксплуатируются только в пассажирском движении, в США в основных статистических изданиях не ведется учет потребления электроэнергии на тягу, так как компания-оператор дальних пассажирских перевозок AMTRAK не является железной дорогой I класса. В Канаде же энергозатраты на пассажирские перевозки электровозами учитываются путем обратного пересчета и приведения к натурному топливу.

Энергоэффективность грузовых перевозок в Европе

В Европе оценками энергоэффективности служат показатели как энергоемкости, так и энергоэффективности. Так как в Европе широко распространено пассажирское движение, то оценка проводится по различным видам движения. Если определяется энергоэффективность перевозок, то применяется показатель кг у. т./тарифный ткм для тепловозной тяги и кВт·ч/тарифный ткм для электрической. С целью оценки эффективности работы локомотивов в большей части железнодорожных компаний принято измерять удельное по-

ребление энергоресурсов на единицу работы (в кг удельного топлива/ 10^4 ткм брутто). Для оценки энергоэффективности пассажирской работы применяется показатель кг удельного топлива/пасс-км или кВт·ч/пасс-км [2, 12].

Россия и страны СНГ

В России и странах СНГ принято оценивать энергоэффективность работы локомотивов при помощи показателя «Удельный расход электроэнергии/топлива на тягу поездов», определяемого отношением грузооборота брутто и потребленными энергоресурсами. Единица измерения удельного расхода – кВт·ч/ 10^4 ткм брутто для электрической тяги или кг у. т./ 10^4 ткм брутто для тепловозной, отдельно для каждого вида движения. Такой же показатель используется и в странах СНГ [13]. В последние годы руководством ОАО «РЖД» принят ряд решений, приводящих единицы измерения к международной системе.

Энергоэффективность скоростного и высокоскоростного движения

Режим работы скоростного и высокоскоростного железнодорожного подвижного состава значительно отличается от традиционного. Движение с высокой скоростью, длительная работа тяговых двигателей с мощностью, близкой к максимальной, снижает потери энергии на подвижном составе, так как и тяговые двигатели, и преобразователи постоянно находятся в зоне высокого коэффициента полезного действия, а малое время в пути уменьшает абсолютное потребление энергии на собственные нужды. В то же время увеличение скорости до 250–300 км/ч и более вызывает значительный рост сопротивления движению, особенно его аэродинамической составляющей, и соответственно увеличение расхода энергии на его преодоление, а большой потребляемый ток приводит к значительным потерям в контактной сети (в данном

случае рассматривается только скоростное движение с электрической тягой) [14]. Для того чтобы адекватно оценить энергоэффективность той или иной серии подвижного состава, в мировой практике принято оценивать отношение потребляемой электроэнергии к одному пассажирскому месту, умноженному на километры пробега (место-км). Такой показатель позволяет более точно оценить реальную энергетическую эффективность скоростных электропоездов, так как нивелируется влияние реальной населенности поезда (по сравнению с пассажиро-километрами) и учитываются его положительные конструктивные особенности (по сравнению с тонно-километрами брутто).

При этом влияние реальной населенности на потребление электроэнергии* очень незначительно, так как практически все современные скоростные и высокоскоростные электропоезда имеют эффективную систему рекуперации и рост ее реального потребления из сети за счет придания дополнительной кинетической энергии при разгоне компенсируется возвратом при торможении [6]. В соответствии с терминологией МСЖД скоростным принято называть поезд с эксплуатационной скоростью от 160 км/ч, а высокоскоростным – 250 км/ч и выше. В Российской Федерации с 2009 г. эксплуатируются высокоскоростные электропоезда ЭВС1 и ЭВС2, а с 2013 г. – скоростные электропоезда ЭС1. Кроме того, относительно небольшой объем перевозок выполняется с использованием скоростных поездов с электровозной тягой: «Невским экспрессом», поездами «Стриж» и т. д. Развитие в стране скоростного и высокоскоростного движения позволило собрать статистические данные о потребленной электроэнергии и провести анализ энергоэффективности [1, 2, 5, 15, 16].

Для сопоставления оценок энергоэффективности различных скоростных и высокоскоростных электропоездов в данной статье

* Доля скоростных поездов на дизельной тяге крайне мала.

принимались как опубликованные данные, так и показатели, полученные в результате тяговых расчетов.

Ассоциация компаний по эксплуатации пассажирских поездов (Association of Train Operating Companies, АТОС), основанная в 1993 г. в Великобритании, в своей работе по заказу некоммерческой организации Greengauge 21 провела анализ энергопотребления высокоскоростных поездов разных типов и годов выпуска. Данные, полученные по информации компаний-производителей и эксплуатан-

тов (Virgin, Eurostar, Systra, Alstom), а также управления по безопасности и стандартизации на железных дорогах (Rail Safety & Standards, RSSB) приведены в таблице.

Из рис. 1, 2 видно, что энергопотребление поездов, выраженное в кВт·ч/место-км, уменьшается с увеличением года его постройки (т. е. у новых поездов оно ниже) и незначительно растет со снижением массы (без учета электропоезда ЭС1, так как он не высокоскоростной). При этом эксплуатирующиеся в России поезда ЭВС1 и ЭВС2 имеют одни из наилучших по-

Энергоэффективность высокоскоростных поездов

Тип поезда и год начала эксплуатации	TGV Reseau (1992)	Class 373 Eurostar (1993)	TGV Duplex (1997)	Shinkansen 700 Series (1998)	Class 390 Pendolino (2003)	AGV (2008)	ЭВС1 (ЭВС2) (2009)	ЭС1* (2011)
Страна эксплуатации	Франция	Великобритания–Франция	Франция	Япония	Великобритания	Франция	Россия	Россия
Скорость, км/ч	300	300	300	300	200	300	250	160
Вместимость, мест	377	750	545	1323	439	650	604	443
Длина, м	200	394	200	400	215	250	250	130
Составность, ваг.	10	20	10	16	9	14	10	5
Масса, т	386	723	384	634	460	510	656 (672)	267
Масса метра поезда, т	1,93	1,84	1,92	1,59	2,14	2,04	2,62 (2,68)	2,05
Масса поезда на пассажирское место, т	1,02	0,96	0,7	0,48	1,05	0,78	1,08 (1,11)	0,60
Удельное энергопотребление, кВт·ч/место-км	0,039	0,041	0,037	0,029	0,033	0,033	0,034	0,019
Удельное энергопотребление, кВт·ч/ткм брутто	381	425	525	563	315	420	319	321

* Не является высокоскоростным поездом.

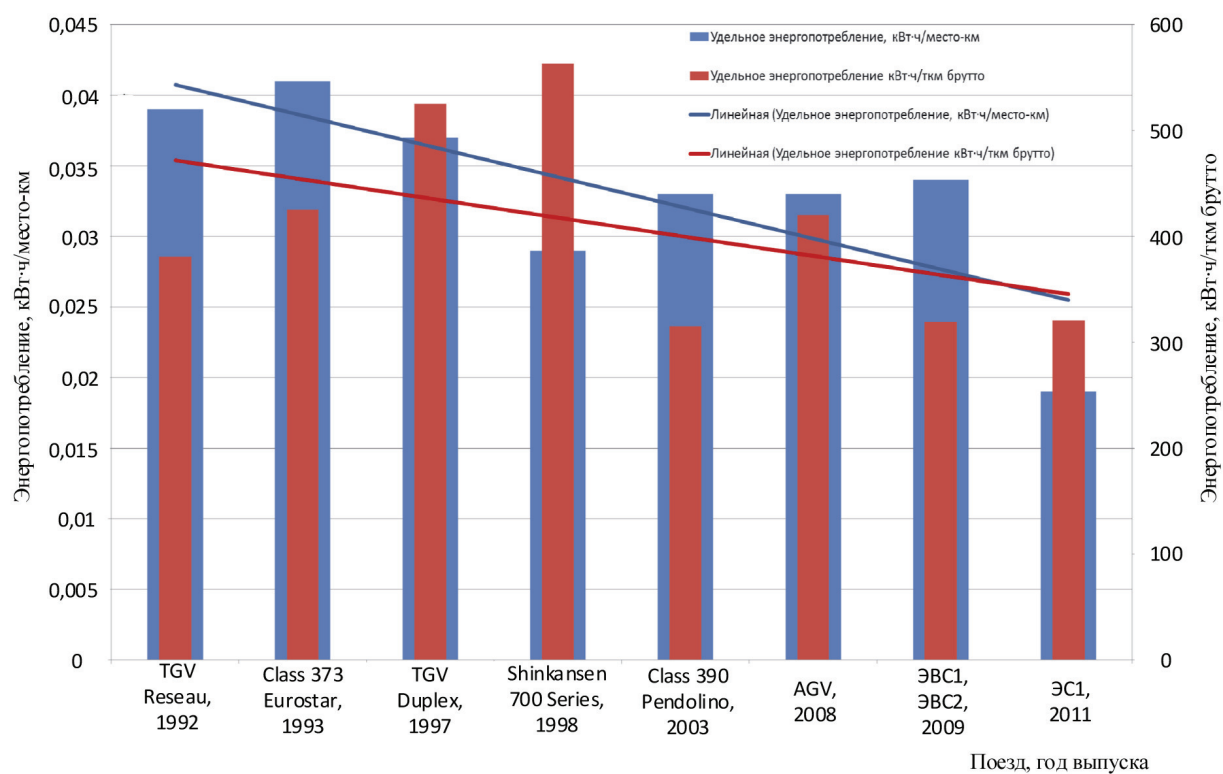


Рис. 1. Диаграмма удельной энергоемкости поездов в зависимости от года выпуска

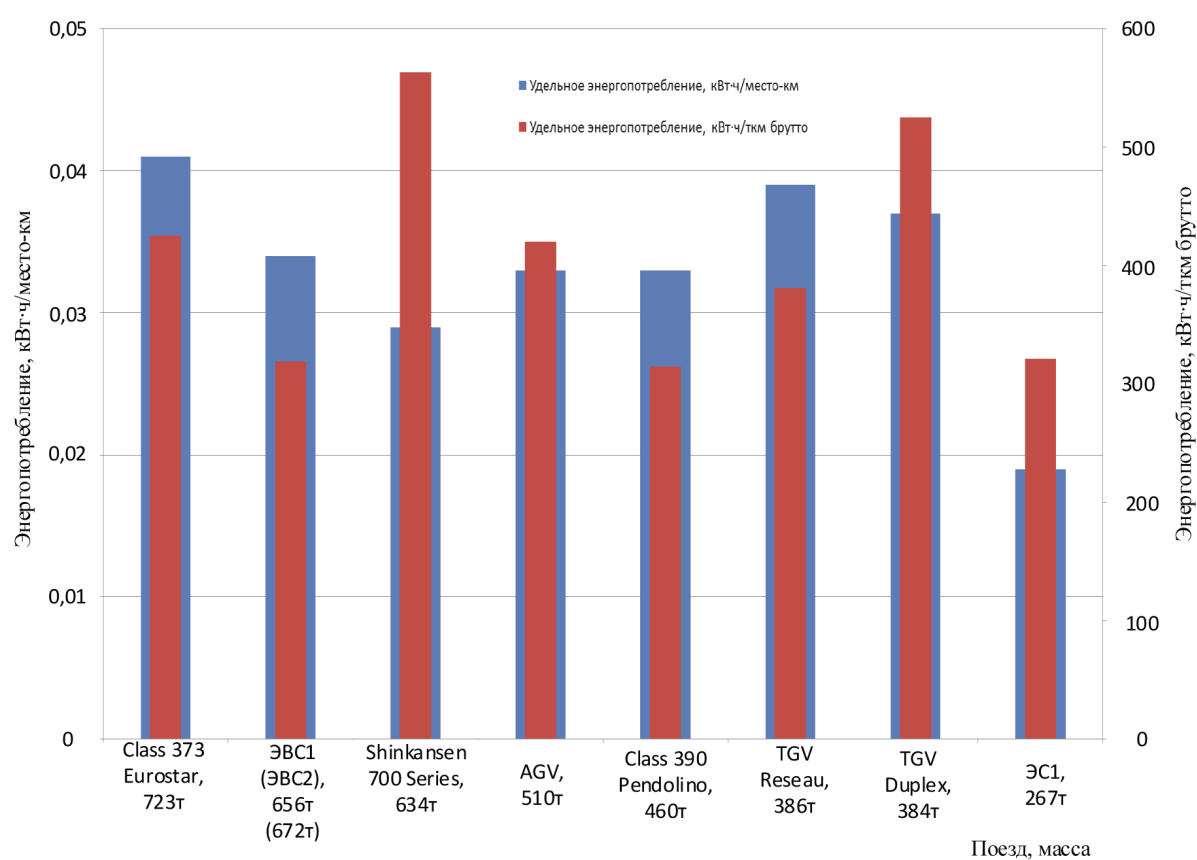


Рис. 2. Диаграмма удельной энергоемкости поездов в зависимости от массы состава

казателей энергопотребления, выраженное в кВт·ч/ткм брутто, но немного уступают по удельному расходу, приведенному к пассажирскому месту, в основном из-за меньшей вместимости по сравнению с аналогами.

Заключение

Использование специализированных единиц измерения энергоэффективности позволяет более точно оценить работу различных подразделений и служб железнодорожного транспорта. Их применение не отменяет общую оценку энергоемкости, но дает возможность для сравнения качества работы на разных железных дорогах РФ и в различных странах мира. Это позволит выбрать наиболее энергетически эффективные технологии и успешно применить их на практике.

Библиографический список

1. Сравнение воздействия на окружающую среду традиционного и высокоскоростного железнодорожного транспорта : отчет компании Network Rail (Великобритания). – 2010. – 60 с.
2. Железнодорожный справочник 2015. Энергопотребление и выбросы CO₂. – URL : <http://www.iea.org> (дата обращения: 20.12.2016).
3. ГОСТ Р ИСО 50001–2012 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению». – М. : Стандартинформ, 2013. – 28 с.
4. Косарев А. Б. Научное обеспечение роста энергоэффективности и экологической безопасности железнодорожного транспорта. Подходы и потенциал / А. Б. Косарев // Бюл. объедин. учен. совета ОАО «РЖД». – 2015. – № 5. – С. 1–15.
5. Потребление энергии и воздействие CO₂ от высокоскоростного железнодорожного транспорта : аналитический отчет ассоциации компаний-операторов поездов Великобритании (АТОС). – 2009. – 29 с.
6. Косарев А. Б. Методика расчета экономической эффективности применения рекуперативного

торможения и использования энергии рекуперации / А. Б. Косарев, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Транспорт Урала. – 2016. – № 3 (50). – С. 95–99.

7. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте : справ.-метод. изд. / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. И. Иванов, Л. А. Мугинштейн, Ю. Л. Король, Е. Н. Школьников, В. Т. Черемисин ; под ред. В. А. Гапановича. – М. : Интехэнергоиздат, Теплоэнергетик, 2014. – 304 с.

8. Гапанович В. А. Энергоэффективность – путь к снижению затрат и к экологической безопасности / В. А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 8. – С. 22–25.

9. Бакланов А. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте : учебник / А. А. Бакланов, В. Д. Авилов, В. В. Сероносов и др. – М. : МИСиС, 2012. – 619 с.

10. Проект OSIRIS : оценка энергопотребления подвижного состава // Железные дороги мира. – 2015. – № 12. – С. 45–48.

11. Перспективы второй интермодальной революции в США // Железные дороги мира. – 2015. – № 2. – С. 14–18.

12. Перспективы грузовых железнодорожных перевозок в Европе // Железные дороги мира. – 2015. – № 3. – С. 30–34.

13. Игин В. Н. Энергоэффективность локомотивов : планирование и прогнозирование / В. Н. Игин // Локомотив. – 2016. – № 4. – С. 10–13.

14. Экономический анализ повышения скорости на LGV // Железные дороги мира. – 2013. – № 12. – С. 17–21.

15. Школьников Е. Н. Коммерческий учет электрической энергии на электроподвижном составе / Е. Н. Школьников, В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 8. – С. 50–54.

16. Системный подход к эффективности энергопотребления // Железные дороги мира. – 2015. – № 9. – С. 33–36.

References

1. *Sravneniye vozdeistviya na okruzhajushuju sredu traditsionnogo i vysokoskorostnogo zheleznodoro-*

zhnogo transporta [The comparison of traditional and high-speed trains impact on environment]. Network Rail's report (Great Britain), 2010, 60 p. (In Russian)

2. *Zheleznodorozhniy spravochnyk 2015. Energo-potrebleniye i vybrosy CO₂* [Railway handbook 2015. Energy Consumption and CO₂ emissions]. International Energy Agency [Website]. Available at: <http://www.iea.org> (access: 20.12.2016). (In Russian)

3. *GOST R ISO 50001–2012. Systemy energeticheskogo menedzhmenta. Trebovaniya i rukovodstvo po primeneniyu* [State Standard R ISO 50001–2012. Energy management systems – Requirements with guidance for use. International standard]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 28 p. (In Russian)

4. Kosarev A. B. Nauchnoye obespecheniye rosta energoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti zheleznodorozhnogo transporta. Podkhody i potentsial [Scientific support of energy efficiency increase and the environmental safety of railway transport. Approaches and potential]. *JSC "Russian Railways" Joint Scientific Council Bull.*, 2015, no. 5, pp. 1–15. (In Russian)

5. *Potrebleniye energii i vozdeistviye CO₂ ot vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta* [The energy consumption and impact of CO₂ from high-speed railway]. Analyticheskiy otchet assotsiatsii kompaniy-operatorov poezdov Velykobrytanii (ATOS) [ATOS's analytic report], 2009, 29 p. (In Russian)

6. Kosarev A. B., Nikiforov M. M. & Wilghelm A. S. Metodyka rascheta ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya rekuperativnogo tormozheniya i ispolzovaniya energii rekuperatsii [Calculation method for economic efficiency of regenerative braking application and using of regenerative energy]. *Ural's Transport*, 2016, no. 3 (50), pp. 95–99. (In Russian)

7. Ghapanovich V. A., Avilov V. D., Ivanov B. I., Mughinshtein L. A., Korol Y. L., Shkolnikov E. N. & Cheremisin V. T. *Energoberezheniye na zheleznodorozhnom transporte* [Energy saving on railway transport]. Ed. by V. A. Ghapanovich. Moscow, Intekhen-

ergoizdat, Teploenergetik Publ., 2014, 304 p. (In Russian).

8. Ghapanovich V. A. Energoeffektivnost – put' k snyzheniyu zatrat i ekologicheskoy bezopasnosti [Energy efficiency – the way to the cost reducing and environmental safety]. *Railway transport*, 2014, no. 8, pp. 22–25. (In Russian)

9. Baklanov A. A., Avilov V. D., Seronov V. V. et al. *Energoberezheniye na zheleznodorozhnom transporte* [Energy saving on railway transport]. Moscow, MISiS Publ., 2012, 619 p. (In Russian)

10. Projekt OSIRIS: otsenka energopotrebleniya podvyzhnogo sostava [OSIRIS Project: energy consumption evaluation of the rolling stock]. *World Railway*, 2015, no. 12, pp. 45–48. (In Russian)

11. Perspektivy vtoroy intermodalnoy revolyutsii v Soyedinennykh Shtatakh Ameriky [Prospects for the second intermodal revolution in the USA]. *World Railway*, 2015, no. 2, pp. 14–18. (In Russian)

12. Perspektivy gruzovykh zheleznodorozhnykh perevozok v Yevrope [Prospects of rail freight in Europe]. *World Railway*, 2015, no. 3, pp. 30–34. (In Russian)

13. Igin V. N. Energoeffektivnost lokomotivov: planirovaniye i prognozirovaniye [Locomotive energy efficiency: planning and prediction]. *Locomotive*, 2016, no. 4, pp. 10–13. (In Russian)

14. Ekonomicheskii analys povysheniya skorosti na LGV [Economic analysis to improve the speed of LGV]. *World Railway*, 2013, no. 12, pp. 17–21. (In Russian)

15. Shkolnikov E. N., Cheremisin V. T. & Ushakov S. Y. Kommercheskiy uchet elektricheskoy energii na elektropodvyzhnom sostave [Commercial accounting of electrical energy on rolling stock]. *Railway transport*, 2016, no. 8, pp. 50–54. (In Russian)

16. Systemniy podkhod k effektivnosti energopotrebleniya [Efficiency of energy consumption system approach]. *World railway*, 2015, no. 9, pp. 33–36. (In Russian)

ТИТОВА Тамила Семеновна – доктор техн. наук, профессор, проректор по научной работе, titova@pgups.ru; *ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, evstam@mail.ru; ИЗВАРИН Михаил Юльевич – канд. техн. наук, доцент, misha3568723@yandex.ru; ЕВСТАФЬЕВА Марина Валерьевна – аспирант, marina88spb@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.4.0.18

А. В. Третьяков, А. А. Петров, К. В. Елисеев, М. В. Зимакова**ПРОВЕДЕНИЕ ХОДОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЙ
КОЛЕСНОЙ ПАРЫ**

Дата поступления: 20.06.2016

Решение о публикации: 27.09.2016

Цель: Проведение испытаний грузовых вагонов. **Методы:** В качестве исследовательской задачи была осуществлена попытка оценить степень внедрения тензометрической колесной пары в ходовые динамические испытания грузовых вагонов. На основе изучения этой проблемы был проведен обзор внедряемых в настоящее время тензометрических колесных пар, используемых при проведении данного вида испытаний в России и за рубежом. **Результаты:** На основе анализа выявлены недостатки внедряемого оборудования, которые возможно решить за счет применения современных измерительно-вычислительных комплексов с беспроводной передачей информации. Особое внимание уделено рассмотрению существующих методов проведения ходовых динамических испытаний и сравнительному анализу их с методом, основанным на использовании тензометрической колесной пары, установившем, что тензометрическая колесная пара является инструментом, позволяющим повысить точность регистрируемых величин, а также сократить издержки на подготовку испытаний. Основное содержание исследования составляет состав и схема организации измерительного канала при работе тензометрической колесной пары. Данное направление также дополняется рассмотрением актуальных тем, таким как схема расстановки тензорезисторов на диск колесной пары, в которой выделяются и описываются характерные особенности, отличающие такое размещение тензорезисторов от других, и конструкция стенда для тарировки тензометрической колесной пары. **Практическая значимость:** Обосновывается мысль о том, что необходимо сделать, для того чтобы повсеместно внедрить тензометрическую колесную пару с целью проведения ходовых динамических испытаний грузовых вагонов.

Ключевые слова: Вагон, испытания, испытания вагонов, ходовые динамические испытания вагонов, безопасность движения подвижного состава, тензометрия, тензометрическая колесная пара, стенд градуировки тензометрической колесной пары.

Alexander V. Tretyakov, D. Sci., professor, AVtretiakov@pgups.ru; ***Anton A. Petrov**, postgraduate student, gn.petrov.anton@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Kirill V. Yeliseev**, assistant, kir.eliseev@gmail.com (Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University); **Maria V. Zymakova**, Cand. Sci., associate professor, Zimakova7@rambler.ru (AO “NVTs “Vagony” – “Innovative center “Railroad cars””) **RUNNING DYNAMIC TRIALS OF FREIGHT WAGONS WITH STRAIN-GAUGE WHEEL PAIR APPLICATION**

Objective: To test freight wagons. **Methods:** An attempt was made to estimate the level of the adoption of strain-gauge wheel pairs in running dynamic trials of freight wagons. On the basis of studying this issue a survey of presently being implemented strain-gauge wheel pairs, which are applied in the process of freight wagons testing in Russia and abroad, was conducted. **Results:** On the basis of the conducted analysis some defects of implemented equipment were detected. The defects in question may be solved by means of modern measuring and computing systems with cable-free transmission. Special attention was dedicated to the existing methods of conducting running dynamic trials and the comparative analysis

of the latter with the method based on strain-gauge wheel pair application. By means of this method it was established that strain-gauge wheel pair allows to improve the accuracy of the registered quantities, as well as to reduce the costs of the test preparation. The main content of the study is the composition and the scheme of measuring channel arrangement in the process of strain-gauge wheel pair functioning. The school in question may also be complemented by studying the following topical issues: the array design of resistance strain gages on a wheel pair web, where characteristic features are singled out and described, which make the resistance strain gauge allocation differ from any other type of allocation, as well as stand construction for gauging a strain-gauge wheel pair. **Practical importance:** The idea of what should be done for a strain-gauge wheel pair overall embedment, for the purpose of running dynamic trials of freight cars, was validated.

Keywords: Wagon, tests, wagon testing, running dynamic trials of wagons, safety of a railway vehicle movement, strain gauging, strain-gauge wheel pair, strain-gauge wheel pair gaging stand.

Введение

В настоящее время творческий коллектив ученых ПГУПС и научных сотрудников АО «НВЦ “Вагоны”» совместно с работниками Тихвинского испытательного центра железнодорожного транспорта приступили к подготовке использования тензометрических колесных пар (ТКП) при проведении ходовых динамических испытаний грузовых вагонов. Целью данного вида испытаний является определение контролируемых показателей при различных скоростях и режимах движения на эксплуатационных магистральных железнодорожных путях [1].

Обзор тензометрических колесных пар

Резонным представляется задать вопрос, почему именно сейчас становится актуальным применение ТКП при проведении ходовых испытаний? Ведь идея использования ТКП не нова – еще в 1946 г. доктор технических наук, проф. М. Ф. Вериго предложил использовать диск колеса в качестве динамометра для измерения вертикальных и боковых сил, действующих со стороны железнодорожного пути на колесные пары испытуемого вагона. Однако практическое воплощение этой идеи было реализовано лишь в 1960-е годы – уче-

ные ВНИИЖТ смогли зарегистрировать силы, действующие на колесную пару по напряженному состоянию диска колеса [2].

ТКП, разработанная отделением вагонного хозяйства ВНИИЖТа, была собрана из типовых элементов: ось РУ1, цельнокатанные колеса диаметром 950 мм. Для увеличения точности измерения усилий, а в большей степени вертикальных, в дисках колесной пары было просверлено по восемь сквозных прорезей, образующих четыре спицы, на каждом диске находилось около 100 тензорезисторов. В оси для проводов, идущих от измерительных схем к концевым токосъемным устройствам, также были просверлены отверстия (рис. 1).

Данная конструкция ТКП обеспечивала точные замеры вертикальных и боковых сил: при размещении измерительных схем на спицах разного диаметра ТКП выполняла по два замера за оборот колеса, а при размещении на четырех спицах – четыре [3]. В 2009 г. к решению этого вопроса подключен ВНИКИ и были изготовлены тензометрические колесные пары, системы телеметрической передачи информации с колесных пар на борт, оборудован средствами сбора и передачи информации вагон-цистерна (помимо характеристик движения будут регистрироваться и параметры продольных сил на автосцепке) [4].

Аналогичные работы проводились и за рубежом. Впервые ТКП появились в Японии для вагонов, эксплуатирующихся на скоростной линии Токио – Осака [5]. ТКП была изготов-

лена из двух спицевых колес, на спицах размещались тензорезисторы, которые выполняли по два замера вертикальных и боковых сил за каждый оборот колеса. Подобная конструкция встречалась в Англии, где она обеспечивала по два или четыре измерения за оборот колеса [3]. Также ТКП применялась на железных дорогах в Германии, принцип ее работы основывался на регистрации изгибных напряжений в шести сечениях оси, что обеспечивало непрерывное измерение боковых и продольных сил [6]. В США были разработаны ТКП, которые позволяли измерять силы вблизи контакта колеса и рельса, что повышало точность регистрации данных [7]. По настоящее время на сети железных дорог США эксплуатируется высокоскоростной исследовательский вагон-лаборатория (рис. 2, 3) «Т-16», в составе которого применена ТКП [8].

Недостатки и преимущества применения ТКП

Ответ на вопрос о недостатках и преимуществах применения ТКП прост – несовершенство существующих на то время средств съема и передачи информации с ТКП. Сейчас же этот вопрос весьма близок к своему разрешению: существуют действующие системы, обеспечивающие беспроводной интерфейс

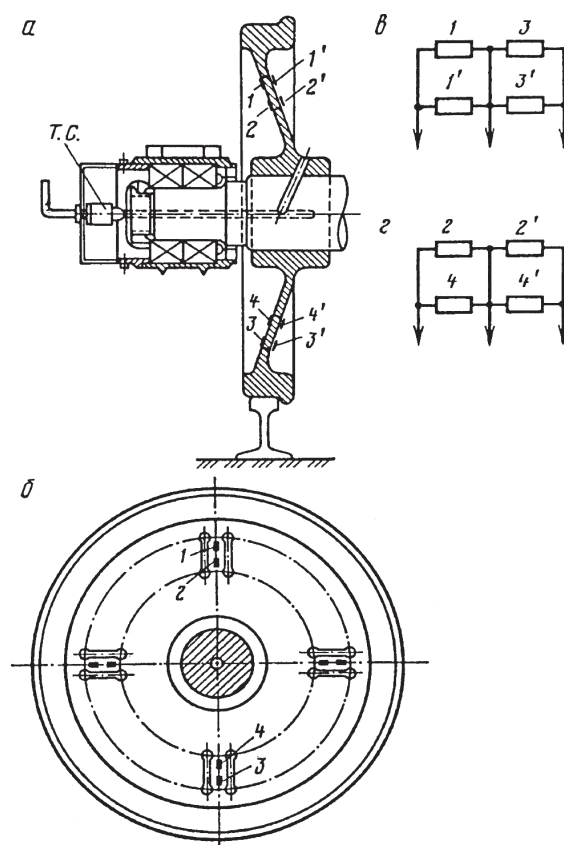


Рис. 1. Тензометрическая колесная пара отделения вагонного хозяйства ВНИИЖТа:
а – общий вид колесной пары сбоку с размещением тензорезисторов 1, 2, 3, 4, 1', 2', 3', 4'; б – вид колеса с прорезями в диске; в – схема включения тензорезисторов для регистрации вертикальных сил; г – схема включения тензорезисторов для регистрации боковых сил



Рис. 2. Высокоскоростной исследовательский вагон



Рис. 3. Оборудованные приборами колеса для измерения сил контакта колеса/рельса вагона Т-16

связи датчиков на диске и стационарного обрабатывающего комплекса, находящегося в вагон-лаборатории. Например, на базе научно-производственного предприятия «Мера» создана ротационная измерительно-вычислительная система «МИС-1100» (рис. 4), позволяющая усиливать, преобразовывать и бесконтактно, с помощью сигнала типа «Wi-Fi», передавать сигналы с датчиков, расположенных на диске колеса, на регистрирующий прибор. Использование системы цифрового кодирования передаваемого сигнала дает возможность передавать измеренные данные по радиоканалу помехозащищенным методом [9].



Рис. 4. Система ротационная измерительно-вычислительная МИС-1100

Существующие методы регистрации усилий в системе «колесо–рельс»

Следующий возникающий вопрос – в чем заключается преимущество применения ТКП для регистрации и оценки действующих сил по сравнению с действующими в настоящее время методами регистрации этих сил? Для ответа на него кратко опишем существующие средства и способы регистрации усилий в системе «колесо–рельс». Сейчас для регистрации вертикальных и боковых сил, действующих со стороны железнодорожного пути на колесную пару при ходовых динамических испытаниях, используют первичные и масштабные вторичные преобразователи физических величин. В число первичных преобразователей входят: тензорезисторы, прогибомер, акселерометры, датчик угла поворота, а вторичных: тензометрические усилители, специальные комплексы аппаратуры для регистрации перемещений, вибраций и ускорений [10].

В качестве примера рассмотрим проводимые в апреле 2016 г. ходовые динамические испытания инновационного вагона постройки Тихвинского вагоностроительного завода. Они осуществлялись сотрудниками отдела ходовых испытаний испытательного центра АО «НВЦ “Вагоны”» при участии автора этой статьи.

Общий вид испытуемого вагона в сцепе с вагон-лабораторией представлен на рис. 5.

Проведение ходовых динамических испытаний проходит в два этапа: подготовительный и непосредственно сам процесс испытания вагона. На этапе подготовки происходят подъемка вагона на домкратах и последующая выкатка тележек с обеих сторон вагона. С тележек снимаются колесные пары, оставляя боковые рамы и надрессорную балку. На литые детали тележки по схеме, утвержденной в программе и методике проведения испытаний, наклеиваются на предварительно зачищенные области тензорезисторы, собранные в мостовые схемы, далее проводится тарировка этих схем.

Подготовительный этап – один из самых ответственных и трудоемких. На практике он занимает (вместе с тарировкой) не менее трех дней, так как помимо всего прочего включает и нанесение защитных покрытий с последующей их просушкой в течение от 12 до 24 ч.

На каждую тележку вагона устанавливаются прогибомер и датчик угла поворота, а на хребтовую балку – два акселерометра в горизонтальной и вертикальной плоскостях (рис. 6).

Информация, полученная с помощью тензорезисторов, наклеенных на боковых рамах и надрессорных балках тележек, в дальнейшем используется для обработки результатов ходовых динамических испытаний – коэффициента запаса устойчивости от схода и опрокидывания вагона и сравнение их с нормативными значениями [11].

Определение коэффициентов запаса устойчивости осуществляется в настоящее время по известным формулам, приведенным в действующих «Нормах расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 (несамоходных)» [11]. Сразу же следует отметить, что эти формулы отражают косвенный метод регистрации и измерения усилий,

и в дальнейшем при применении ТКП они будут заменены.



Рис. 5. Испытуемый крытый вагон в сцепе с вагон-лабораторией АО «НВЦ “Вагоны”»

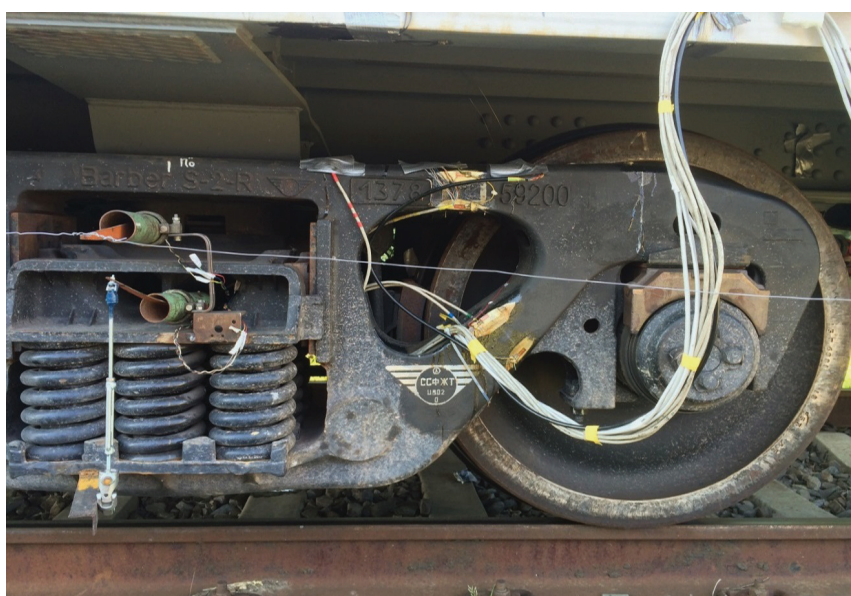


Рис. 6. Пример установки прогибомера, датчика угла поворота и частичной наклейки тензорезисторов

Недостатки методов

Поскольку снятие информации с помощью косвенного метода происходит с литых деталей тележки, а не с диска колеса, использование ТКП является прямым методом измерения, а значит более точным. Его преимущества заключаются в меньшей трудоемкости процесса ввиду возможности отказа от ряда операций: выкатка тележек из-под вагона, снятие колесных пар, зачистка областей для наклейки тензорезисторов, наклейка тензорезисторов и их тарировка. Также данный метод отличается меньшей материалоемкостью, так как пропадет постоянная необходимость наклейки датчиков, использование проводов для формирования тензометрических мостовых схем и нанесения защитных покрытий. Таким образом, применение ТКП при ходовых динамических испытаниях ускорит процесс их проведения, сократит затраты на подготовку и увеличит точность регистрируемых величин. Согласно [12], оценка ходовых, прочностных и по воздействию на путь качеств вагонов за счет повышения точности экспериментальной

оценки сил, действующих от колесных пар на раму тележки вагона, точнее на 40–70%.

Состав и принцип работы ТКП

Сигнал с датчиков, расположенных на диске колеса, поступает на измерительный модуль, находящийся в измерительно-вычислительном комплексе, работу модулей контролирует крейт-контроллер, далее сигналы изменяются аналогово-цифровым преобразователем, накапливаются в буфере контроллера и передаются по Wi-Fi сигналу на станцию сбора и обработки полученных данных для дальнейшего изучения (рис. 7, 8).

Схема размещения тензорезисторов на диск колеса

В процессе создания ТКП одним из важнейших вопросов является схема размещения тензорезисторов на диске колеса. В этой области К. В. Елисеевым, ассистентом кафедры «Компьютерные технологии в машиностроении» Санкт-Петербургского государствен-

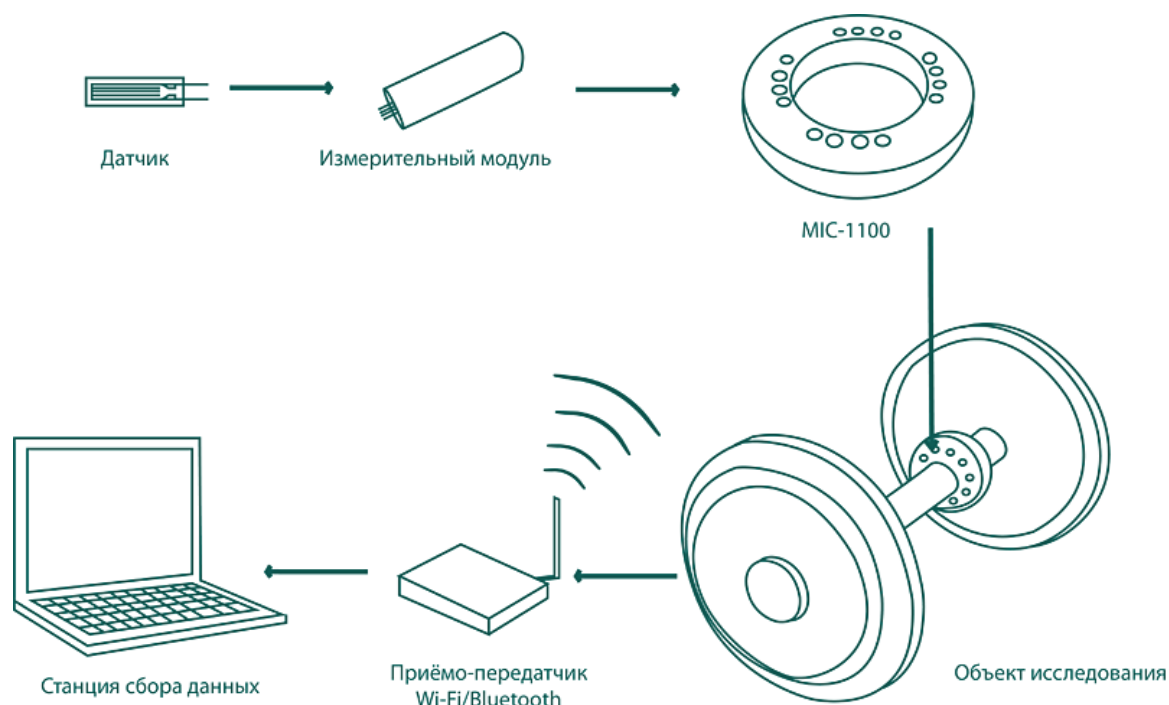


Рис. 7. Схема организации измерительного канала MIC-1100

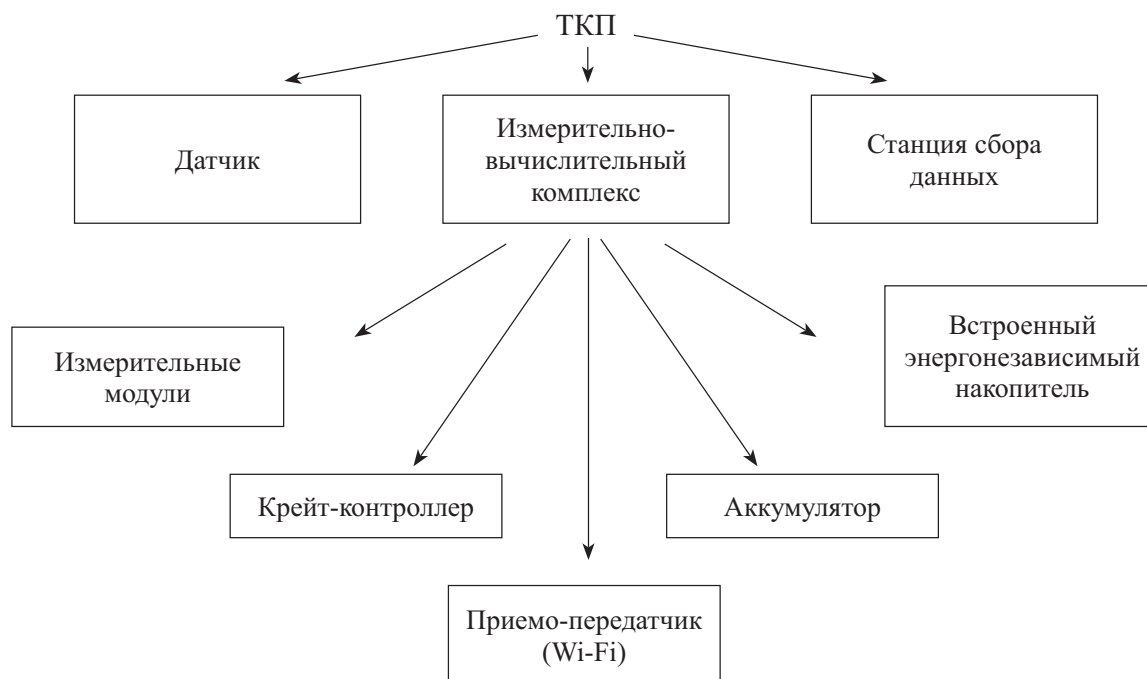


Рис. 8. Состав ТКП

ного политехнического университета была проведена исследовательская работа, в ходе которой была предложена новая схема расстановки тензорезисторов, представляющая собой две окружности, на каждой из которых размещается по 16 датчиков с шагом $22,5^\circ$ и учитывающая (рис. 9) [13]:

- 1) зоны наибольшей чувствительности к изменениям сил;
- 2) возможность восстановления распределения деформаций вдоль окружности;

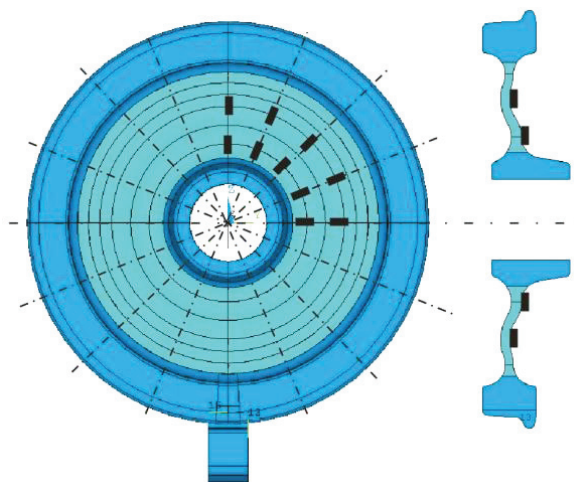
- 3) возможность определения угла поворота колеса.

Стенд для градуировки ТКП

Тарировка ТКП проходит на специализированном стенде, состоящем из трех видов гидравлических цилиндров, прилагающих к ней три вида нагрузок: вертикальные, распорные и поперечные (рис. 10, 11) [14, 15].



Рис. 9. Схема расстановки тензорезисторов на диске колеса



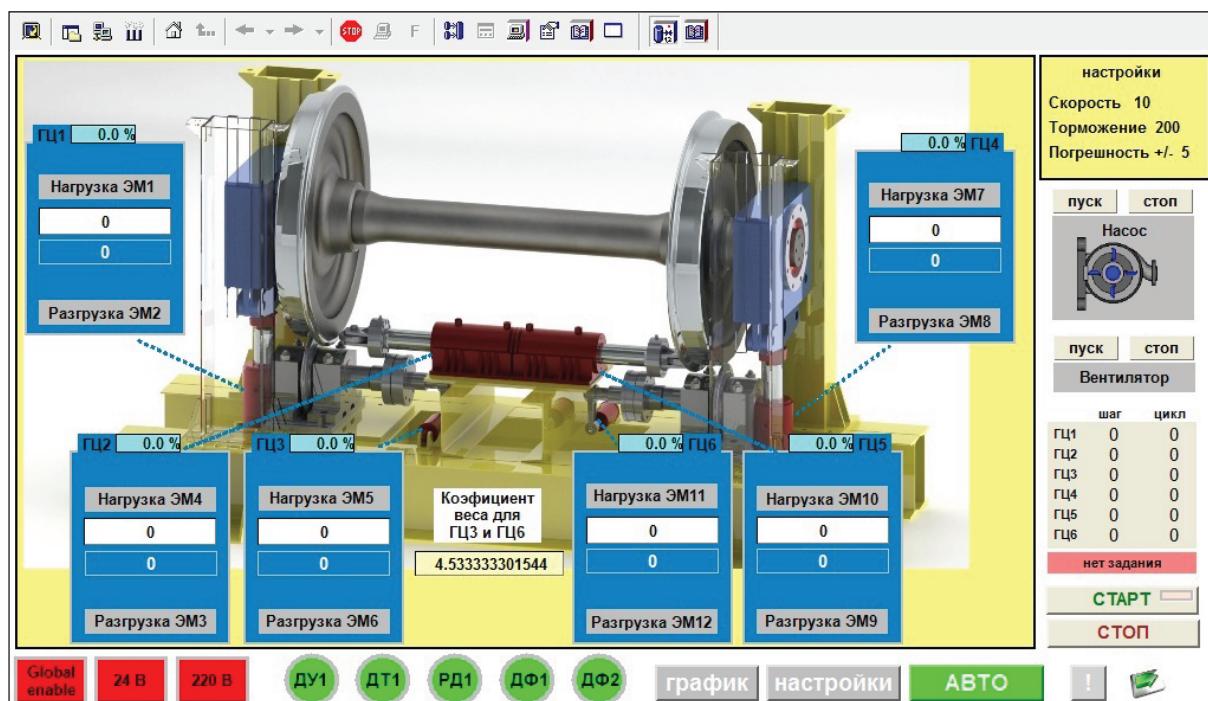


Рис. 10. Пример главного экрана аппаратно-программного комплекса проведения тарировки ТКП

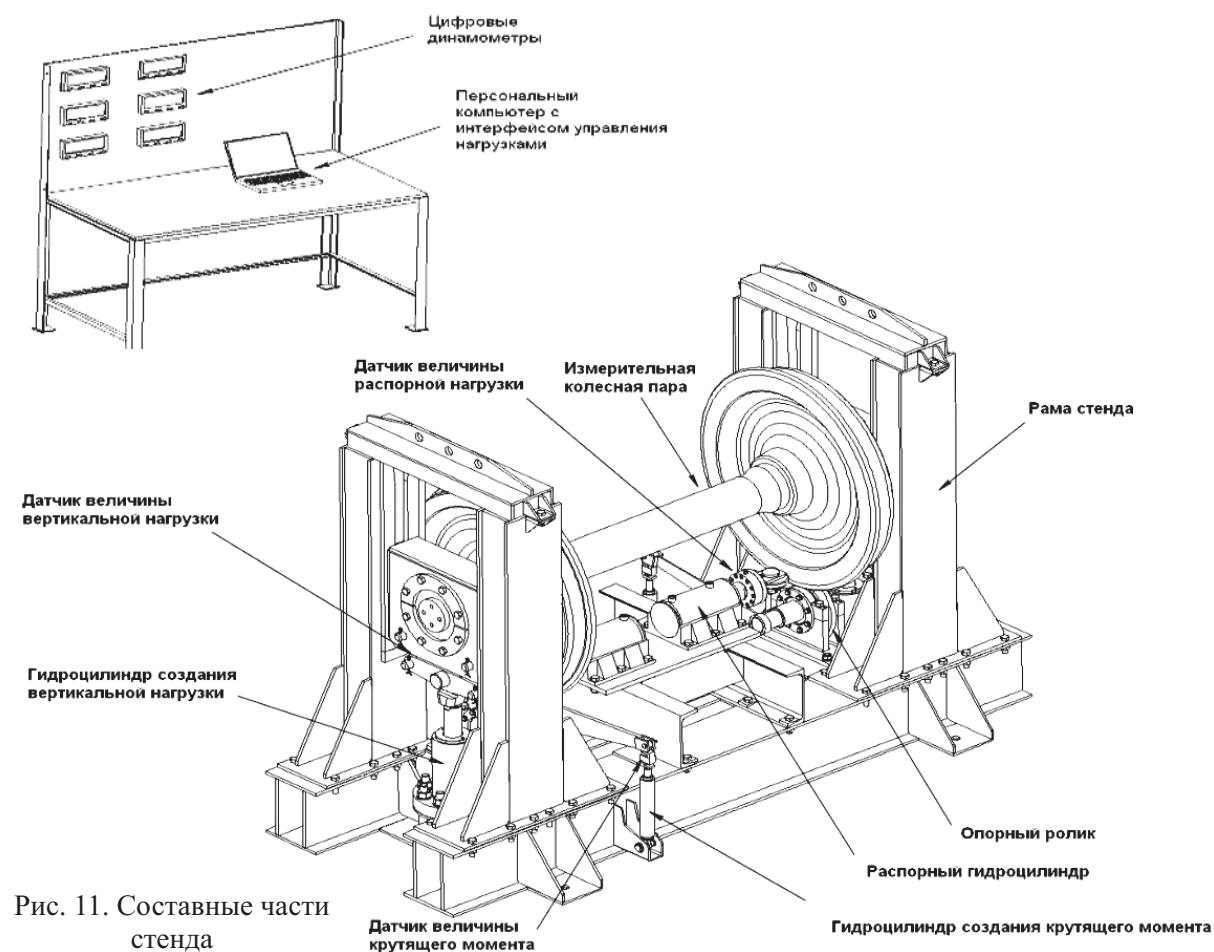


Рис. 11. Составные части стэнда

Заключение

Был проведен обзор существующих тензометрических колесных пар в России и за рубежом. Рассмотрен и описан метод проведения ходовых динамических испытаний, используемых в настоящее время.

Чтобы ускорить процесс проведения ходовых динамических испытаний, дающий возможность сократить издержки на их подготовку, а также повысить точность регистрируемых величин, было предложено внедрить ТКП.

На данном этапе ТКП находится в процессе сборки в Тихвинском испытательном центре железнодорожной техники. Для ее применения в ходовых динамических испытаниях необходимо произвести следующие действия:

- 1) разработать программы и методику определения динамических характеристик испытуемых вагонов на основе применения ТКП;
- 2) создать программное обеспечение для работы с ТКП;
- 3) организовать сравнительные ходовые динамические испытания вагона по существующей методике и методике с применением ТКП;
- 4) оценить точность использования каждой из этих методик;
- 5) проанализировать трудоемкость выполнения ходовых динамических испытаний с применением ТКП и без его участия.

Библиографический список

1. ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам». – М. : ВНИИЖТ, 2014.
2. Анисимов П. С. Испытания вагонов / П. С. Анисимов. – М. : Маршрут, 2004. – 197 с.
3. Кудрявцев Н. Н. Области применения тензометрических колесных пар / Н. Н. Кудрявцев, В. Н. Белоусов, В. М. Сасковец // Вестн. ВНИИЖТа. – 1997. – С. 26–31.
4. Бидуля А. Л. Перспективные технологии – на службу отрасли / А. Л. Бидуля // Евразия Вести. – 2010. – № 8. – С. 12–13.
5. Konichi S. Measurement of loads on wheelset / S. Konichi // The Japan Society of Mechanical Engineers. – 1967. – Vol. 8, N 3. – P. 26–29.
6. Determination of wheel/rail forces by means of measuring wheelsets on Deutsche Bundesbahn (DB) // Междунар. конференция «Взаимодействие колеса – рельс». Кембридж, штат Массачусетс, США, 1981, январь. – С. 19–20.
7. Higgins R. L. High accuracy load measuring wheelset / R. L. Higgins, D. E. Otter, R. W. Martin // Pueblo, USA : American railroads association. Test transport Centre, 1992. – P. 86–89.
8. T-16: FRA's High Speed Research Car // Research & Results. – 2001. – P. 45–51.
9. MIC-1100 (Система ротационная измерительно-вычислительная). Руководство по эксплуатации. БЛИЖ.401250.1044.001 РЭ. – Мытищи : НПП «Мера», 2012. – С. 4–7.
10. РД 24.050.37.95 «Вагоны грузовые и пассажирские – Методы испытания на прочность и ходовые качества». – М. : ГосНИИВ, 1995.
11. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 (несамоходных). – М. : ГосНИИВ–ВНИИЖТ, 1996.
12. Белянкин А. В. Повышение точности экспериментальной оценки рамных сил и коэффициентов динамики грузовых вагонов / А. В. Белянкин, В. П. Богданов, С. В. Дмитриев, Д. Е. Кумпак // Материалы XI Междунар. конференции «Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты». – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 110–113.
13. Елисеев К. В. Современные методы определения сил в контакте колесной пары и рельсов / К. В. Елисеев // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2014. – № 4. – С. 867–876.
14. Елисеев К. В. Стенд градуировки измерительных колесных пар / К. В. Елисеев, А. А. Мигров, А. М. Орлова // Transport Problems. – Silesian : Silesian University of Technology Faculty of Transport, 2012. – P. 474–479.
15. Мигров А. А. Конструкция стенда для калибровки тензометрических колесных пар / А. А. Мигров, А. В. Дождиков, М. Н. Козлов, Д. А. Потахов, А. Н. Косоротов. – СПб. : ПГУПС, 2011. – 323 с.

References

1. GOST 33211–2014. *State Standard 33211–2014 “Vagony gruzoviye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskym kachestvam”* [“Freight wagons. Mechanical resistance and dynamic qualities requirements”]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2014. (In Russian)
2. Anysymov P. S. *Ispytaniya vagonov* [Wagons testing]. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 197 p. (In Russian)
3. Kudryavtsev N. N., Belousov V. N. & Saskovets V. M. Oblasty prymereniya tenzometrycheskikh kolesnykh par [Application field of strain-gauge wheel pairs]. *Vestnik VNIIZhT* [VNIIZhT Bulletin], 1997, pp. 26–31. (In Russian)
4. Bydulya A. L. Perspektivnye tekhnologii – na sluzhbu otrasly [Perspective technologies at the field’s service]. *Eurasia News*. 2010, no. 8, pp. 12–13. (In Russian)
5. Konichi S. Measurement of loads on wheelset. *The Japan Society of Mechanical Engineers*, 1967, vol. 8, no. 3, pp. 26–29.
6. Determination of wheel/rail forces by means of measuring wheelsets on Deutsche Bundesbahn (DB). *Mezhdunarodnaya konferentsiya “Vzaimodeistviye kolesa-rels”* [The “Wheel-rail interaction” International conference]. Cambridge, the Commonwealth of Massachusetts, USA, 1981, January, pp. 19–20.
7. Higgins R. L., Otter D. E., Martin R. W. *High accuracy load measuring wheelset*. Pueblo, USA, American railroads association. Test transport Centre Publ., 1992, pp. 86–89.
8. T-16: FRA’s High Speed Research Car. *Research & Results*, 2001, pp. 45–51.
9. MIC-1100. *Systema rotatsionnaya izmerytelno-vychislitel’naya* [Measuring and computing rotary system]. *Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Application guide]. BLIZh. 401250.1044.001 RE. Mytishchi, NPP “Mera” Scientific [Production Enterprise “Mera” Publ.], 2012, pp. 4–7. (In Russian)
10. RD 24.050.37.95. *“Vagony gruzoviye i passazhyrskiy Metody ispytaniya na prochnost i khodovyye kachestva”* [“Freight wagons and coaches – Strength testing methods and running characteristics”]. Moscow, GosNIIV Publ., 1995. (In Russian)
11. *Normy rascheta i proektyrovaniya vagonov zheleznikh dorog MPS koley 1520 (nesamokhodnykh)* [The norms for calculation and railroad cars construction with 1520 mm gauge (non-self-propelled)]. Moscow, GosNIIV–VNIIZhT Publ., 1996. (In Russian)
12. Belyankin A. V., Bogdanov V. P., Dmitriyev S. V. & Kumplyak D. Y. Povysheniye tochnosti eksperimentalnoy otsenki ramnykh syl i koeffitsiyentov dynamiki gruzovykh vagonov [Experimental estimation accuracy improvement of stock rail strength and dynamic factors of freight cars]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Podvyyznoy sostav XXI veka: idey, trebovaniya, proekty”* [The Intern. Conf. “XXIst century rolling stock: ideas, requirements, projects”. Coll. Papers]. Saint Petersburg, 2016, pp. 110–113. (In Russian)
13. Yelisyev K. V. Sovremennyye metody opredeleniya syl v kontakte kolesnoy pary i relsov [Modern methods of strength estimation of a wheel pair and rails contact]. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye* [Modern mechanical engineering. Science and education], 2014, no. 4, pp. 867–876. (In Russian)
14. Yelisyev K. V., Mygrov A. A. & Orlova A. M. Stend graduirovki izmerytelnykh kolesnykh par [Gaging stand for measurement wheel pairs]. *Transport Problems*. Selesian, Silesian University of Technology, Faculty of Transport Publ., 2012, pp. 474–479. (In Russian)
15. Mygrov A. A., Dozhdykov A. V., Kozlov M. N., Potakhov D. A. & Kosorotov A. N. *Konstruktsiya stenda dlya kalibrovki tenzometrycheskikh kolesnykh par* [Stand construction for tensometric wheel pair calibration]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2011, 323 p. (In Russian)

ТРЕТЬЯКОВ Александр Владимирович – доктор техн. наук, профессор, AVtretiakov@pgups.ru; *ПЕТРОВ Антон Анатольевич – аспирант, gn.petrov.anton@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ЕЛИСЕЕВ Кирилл Валентинович – ассистент, kir.eliseev@gmail.com (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого); ЗИМАКОВА Мария Викторовна – канд. техн. наук, доцент, Zimakova7@rambler.ru (АО «НВЦ “Вагоны”»).



УДК 004.056.53

А. О. Кравцов, А. А. Привалов

**МЕТОДИКА ВЫБОРА ПРИОРИТЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ,
ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ
ОРГАНИЗОВАННЫМ НАРУШИТЕЛЕМ ТАРГЕТИРОВАННЫХ АТАК**

Дата поступления: 21.12.2016

Решение о публикации: 13.03.2017

Цель: Описана методика оценки выбора приоритетных элементов информационно-телекоммуникационной системы (ИТКС) на базе технологии MPLS-TP и выбора наиболее вероятных кибервоздействий на ИТКС, в условиях применения организованным нарушителем таргетированных атак. Методика разработана на основе метода анализа иерархий (МАИ) и является систематической процедурой для иерархического представления элементов ИТКС, что позволяет провести комплексный анализ угроз, с высокой долей вероятности назвать вид атаки, которой воспользуется нарушитель. **Методы:** В основу решения поставленной задачи положен МАИ. Он разработан Т. Саати для анализа сложных систем и синтеза их решения с учетом всей имеющейся качественной и количественной информации о состоянии системы, факторах, возможных альтернативных решениях. МАИ есть систематическая процедура для иерархического представления элементов и декомпозиции проблемы на все более простые составные части. Обработка последовательности суждений лица, принимающего решения (ЛПР), происходит с помощью матриц парных сравнений. В результате определяется относительная значимость альтернатив по каждому из критериев, находящихся в иерархии. Относительная значимость выражается численно в виде вектора приоритетов. Полученные частные оценки альтернатив по каждому из критериев взвешиваются с помощью вектора весов приоритетов критериев, т. е. с учетом важности каждого из критериев. Суммарная оценка взвешенных по каждому из критериев оценок альтернатив и является конечным результатом. **Результаты:** Разработана методика, позволяющая выбрать приоритетные элементы ИТКС, провести анализ существующих угроз (а в случае появления новых включить их в систему оценки). **Практическая значимость:** Основываясь на результатах методики, представляется возможным переход к созданию эффективной модели воздействия нарушителя.

Ключевые слова: Таргетированные атаки, сети нового поколения, MPLS-TP, кибервоздействие на объектовые ИТКС, моделирование кибервоздействий.

***Anton O. Kravtsov**, postgraduate student, kravcovanton@mail.ru; **Andrey A. Pryvalov**, D. Sci., professor, apryvalov@inbox.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE SELECTION METHOD OF PRIORITY ELEMENTS IN INFORMATIONAL TELECOMMUNICATION SYSTEM FUNCTIONING IN THE CONDITIONS OF TARGETED ATTACKS APPLIED BY ORGANIZED VIOLATOR

Objective: To represent the assessment method of selecting priority elements on the basis of MPLS-TP technology and the selection of the most probable cyber impacts on ITS in the conditions of targeted

attacks applied by organized violator. The method developed on the basis of the method of hierarchies' analysis (MHA) is a systematic procedure for hierarchy representation of ITS elements, which makes it possible to perform a complex analysis of threats and there is a high probability of naming the type of attack which will be used by a violator. **Methods:** MHA was chosen as the basic method for the solution of the objective. It was developed by T. Saaty for the analysis of complex systems and synthesis of their solution considering the entire qualitative and quantitative information about the systems' state, factors, possible alternative solutions. MHA is a systematic procedure for hierarchy representation of elements and decomposition of a problem on simpler components. Processing of a person making decisions sequence is done by means of matrixes of pair comparisons. As a result, relative value of alternatives for each criterion in the hierarchy is specified. Relative value is represented numerically in a form of a priority vector. The obtained partial estimates of alternatives for each criterion are weighed by scale vector of criteria priorities, that is the importance of each criterion is considered. Overall estimate of alternatives weighed for each of the assessment criteria is the end result. **Results:** The developed method makes it possible to select priority elements of ITS, carry the analysis of existing threats (or include new threats in the system, in case they occur). **Practical importance:** The results of the method in question make it possible to create a new effective model of influence on a violator.

Keywords: Targeted attacks, new generation networks, MPLS-TP, cyber impact on targeted ITS, cyber impact modeling.

Введение

В перспективной модели развития ОАО «РЖД» до 2030 г. [1] ставится задача перехода к сетям нового поколения (Next Generation Network, NGN [2–6]), что приводит к появлению новых возможностей для организации информационных воздействий (ИВ) и усложнению ИТ-инфраструктуры в целом. ИТКС является ядром автоматизированной системы управления перевозочным процессом ОАО «РЖД». Выход ее из строя может привести к срыву процесса управления движением поездов (задержка управления перевозочным процессом, перерывы в движении поездов, финансовым потерям и т. п.) [7].

Кроме того, качественно возрастает потенциал нарушителя, обусловленный появлением таргетированных атак. Таргетированная атака (ТА) (от англ. *target* – цель) – это непрерывный процесс несанкционированной активности в инфраструктуре объектов ИТКС, удаленно управляемый вручную, в реальном времени, за счет подготовки и проведения сложных атак, учитывающих особенности целевой системы. Стоит отметить, что ТА является именно процессом, в котором воздействия осуществ-

ляются организованным (высококвалифицированным, имеющим в составе современные технические средства, материально не ограниченным) нарушителем [8].

Постановка задачи

Для успешной реализации ТА необходимо определить наиболее значимые элементы сетевой инфраструктуры NGN, воздействия на которые обеспечат достижение цели атаки. То есть нарушитель ставит задачу выявить уязвимые элементы сети и выбрать из известного перечня применяемых воздействий наиболее эффективные.

Решение

В основу решения поставленной задачи положен МАИ [9]. Он позволяет составить многоуровневую иерархию процесса действия нарушителя, расчленив общую задачу по различным уровням иерархии на составляющие, сравнить составляющие с помощью шкалы относительной важности объектов (элементов

иерархии), объединить полученные результаты, что дает возможность оценить вклад элемента любого уровня в достижение цели.

Цель иерархии – выявление наиболее уязвимых элементов и потенциальных угроз кибервоздействия на ИТКС с точки зрения обеспечения их функциональной пригодности (рис. 1).

В качестве факторов (критериев), по которым оцениваются наиболее уязвимые элементы сети управления, приняты сетевые элементы. Акторами являются компьютерные атаки, реализуемые на ИТКС. Известные виды компьютерных атак приведены в [10].

Для относительной оценки значимости факторов составим матрицу парных сравнений, задавая следующий вопрос: воздействуя на какой элемент ИТКС, будет достигнута цель?

Ранжирование элементов, анализируемых с помощью матриц парных сравнений (та-

блица), производится на основе вычисления собственных векторов матриц, и нормализации результатов к единице.

К наиболее простым методам приближенного вычисления собственных векторов относится нахождение среднего геометрического строк

$$СЗ = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}}.$$

Итоговой величиной является вектор локальных приоритетов

$$ВП = \lambda_{i_{отн}} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i}.$$

Покажем это на примере вектора парных сравнений для критериев:

Собственное значение

$$\sqrt[5]{1 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 4} = 2,169$$

$$\sqrt[5]{1/4 \cdot 1 \cdot 1/2 \cdot 1/3 \cdot 3} = 0,660$$

$$\sqrt[5]{1/3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1/3 \cdot 2} = 0,850$$

$$\sqrt[5]{1 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 3} = 1,933$$

$$\sqrt[5]{1/4 \cdot 1/3 \cdot 1/2 \cdot 1/3 \cdot 1} = 0,425$$

$$\lambda_{\max} = 2,833 \cdot 0,357 + 10,333 \cdot 0,109 + 8 \cdot 0,141 + 3 \cdot 0,320 + 13 \cdot 0,070 = 5,150.$$

Вектор приоритетов

$$2,169/6,037 = 0,359$$

$$0,660/6,037 = 0,109$$

$$0,850/6,037 = 0,141$$

$$1,933/6,037 = 0,320$$

$$0,425/7,392 = 0,070$$

Аналогичным образом вычисляются векторы приоритетов для матриц парных сравнений альтернатив по каждому из критериев.

В методе парных сравнений достаточно задать одну строку, определяющую соотношение между элементами, которые должны со-

Матрица парных сравнений факторов

Цель	М	К	С	МСЭ	ПВЭМ	$\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}}$	Вектор приоритетов
М	1	4	3	1	4	2,169	0,395
К	1/4	1	1/2	1/3	3	0,660	0,109
С	1/3	2	1	1/3	2	0,850	0,141
МСЭ	1	3	3	1	3	1,933	0,320
ПЭВМ	1/4	1/3	1/2	1/3	1	0,425	0,070
Σ	2,833	10,333	8	3	13	6,037	$\lambda_{\max} = 5,150$

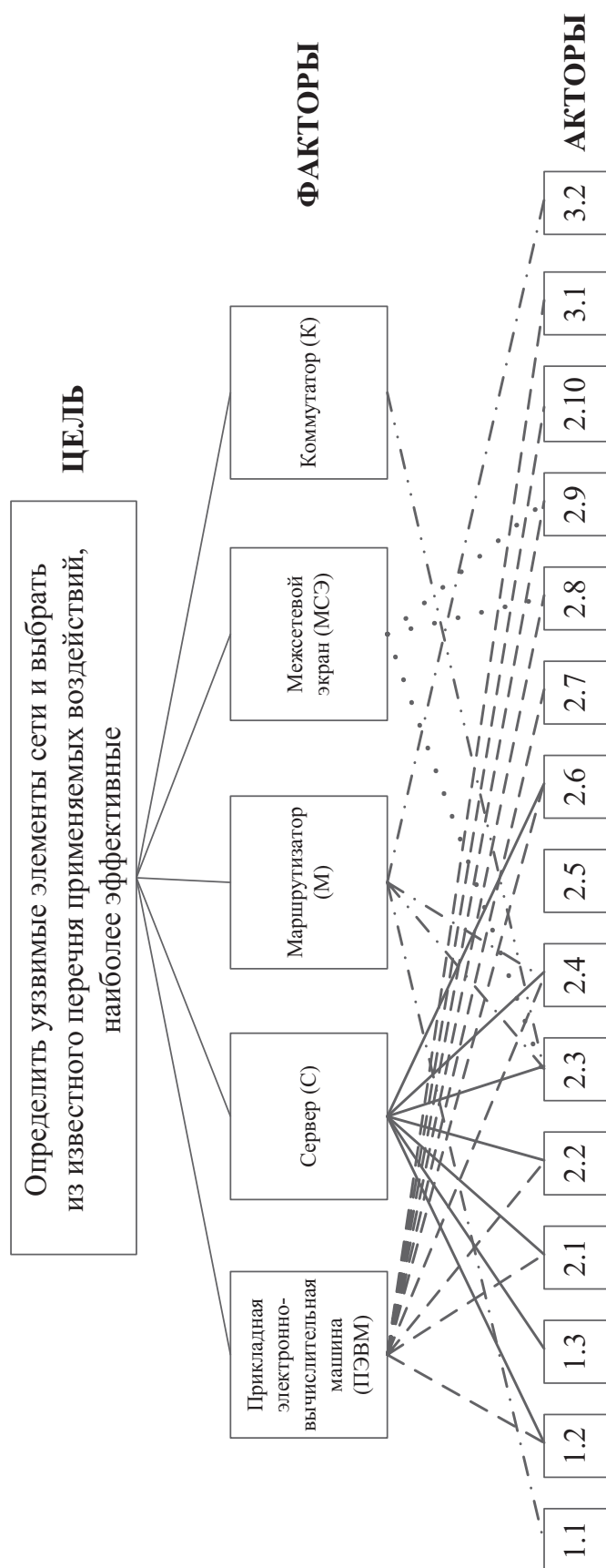


Рис. 1. Иерархия ИТКС

храняться во всех остальных строках. На практике такая согласованность нарушается из-за невозможности выразить человеческие ощущения (предпочтение) точной формулой. Большая часть оценок согласуется путем равенства $a_{ij} = 1/a_{ji}$.

Степень нарушения согласованности оценок определяется путем сравнения полученных оценок с теми, которые имели бы в результате случайного выбора результата парных сравнений из ряда 1/9, 1/7, 1/5, 1/3, 1, 3, 5, 7, 9. Для этого сначала вычисляется $\lambda_{\max}$ – максимальное собственное значение матрицы путем суммирования произведений сумм столбцов на вектор приоритетов. Примеры вычисления $\lambda_{\max}$ приведены по ходу вычисления векторов

приоритетов для матрицы парных сравнений критериев. Значение $\lambda_{\max}$ при хорошем согласовании примерно равно порядку (размерности) матрицы. Индекс согласованности (ИС) определяется по формуле

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},$$

где n – число сравниваемых элементов.

Если разделить ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы того же порядка n , то получим отношение согласованности (ОС), которое при хорошей согласованности должно быть меньше 10 %, при удовлетворительной – не более 20 %:

Размер матрицы.....	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значения при случайной согласованности.....	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Для обратно симметричной матрицы ($a_{ij} = 1/a_{ji}$) всегда $\lambda_{\max} \geq n$.

ИС = 0,019, ОС = 0,015, что является приемлемым результатом.

Результат решения матрицы можно записать в виде нормализованного вектор-столбца, выражающего весовые значения в рамках общей цели:

$$\{M, > C, > ПЭВМ, > K, > МСЭ\} \rightarrow (0,359; 0,109; 0,141; 0,320; 0,070).$$

Следующим шагом является построение матриц парных сравнений степени опасности компьютерных атак (КА), перечень которых приведен в таблице относительно подэлементов факторов. Данная процедура проводится аналогично предыдущему, поэтому приведем только результаты.

Диаграмму, которая показывает влияние КА на конкретный узел и вклад каждой атаки в достижение цели, иллюстрирует рис. 2. Видно, что наиболее подверженным элементом марш-

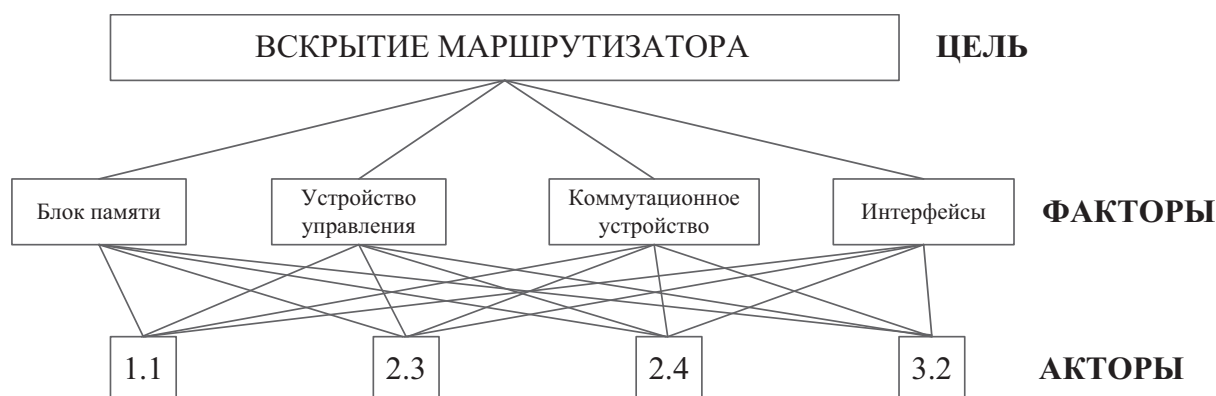


Рис. 2. Иерархия маршрутизатора

рутизатора является блок памяти. Результаты расчетов влияния акторов на факторы иерархии представлены в виде диаграмм, где по оси ординат дана вероятность вскрытия того или иного элемента, а по оси абсцисс – вид компьютерной атаки и степень влияния ее на подэлемент (рис. 3).

Далее аналогичным способом производятся расчеты для каждого подэлемента сети, поэтому приведем только иерархии и результаты решения в виде диаграмм (рис. 4–11).

Заключение

МАИ позволяет эксперту разложить проблему на уровни иерархии таким образом, что на каждом из них ставятся вопросы, на которые необходимо давать ответы на уровне здравого смысла. Математический аппарат МАИ основан на теории матриц, что позволяет логически упорядочить эти суждения и дать им количественную оценку – вектор локальных приоритетов [11].

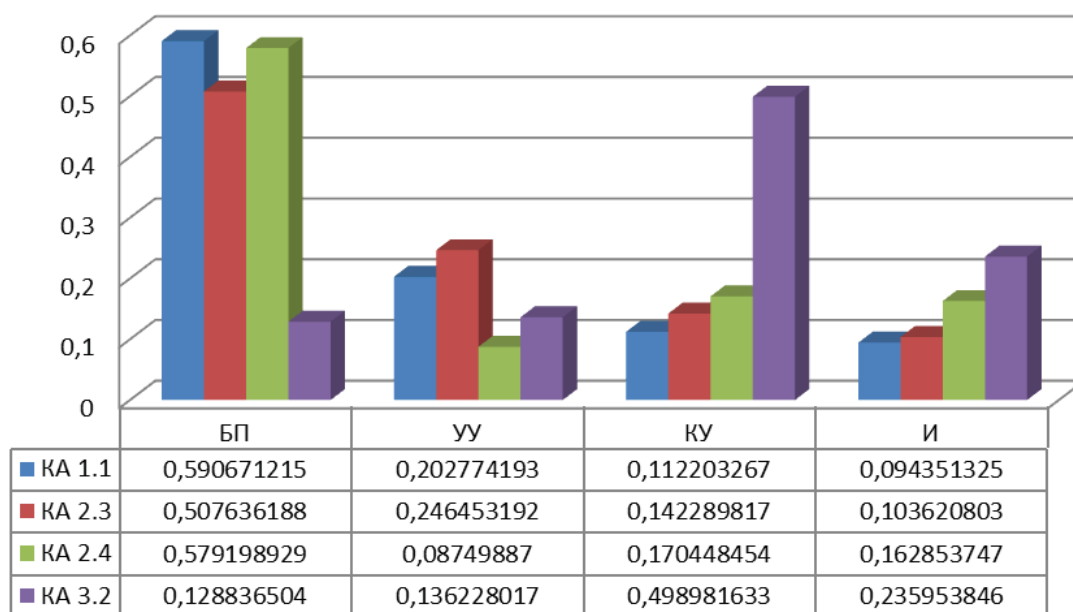


Рис. 3. Воздействия кибератак на подэлементы маршрутизатора

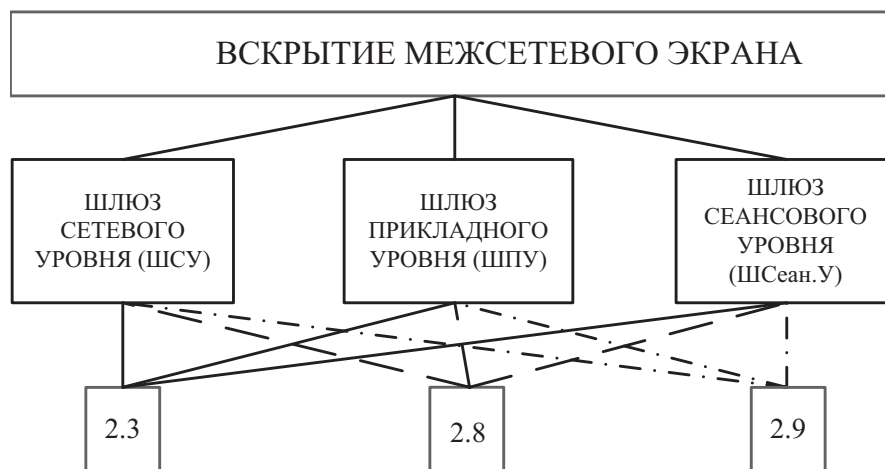


Рис. 4. Иерархия МСЭ

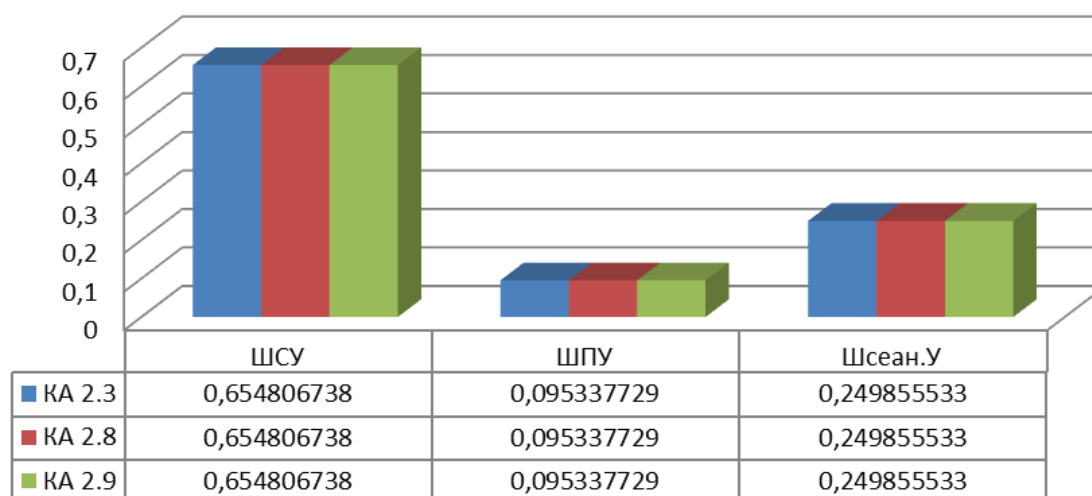


Рис. 5. Воздействия кибератак на подэлементы МСЭ

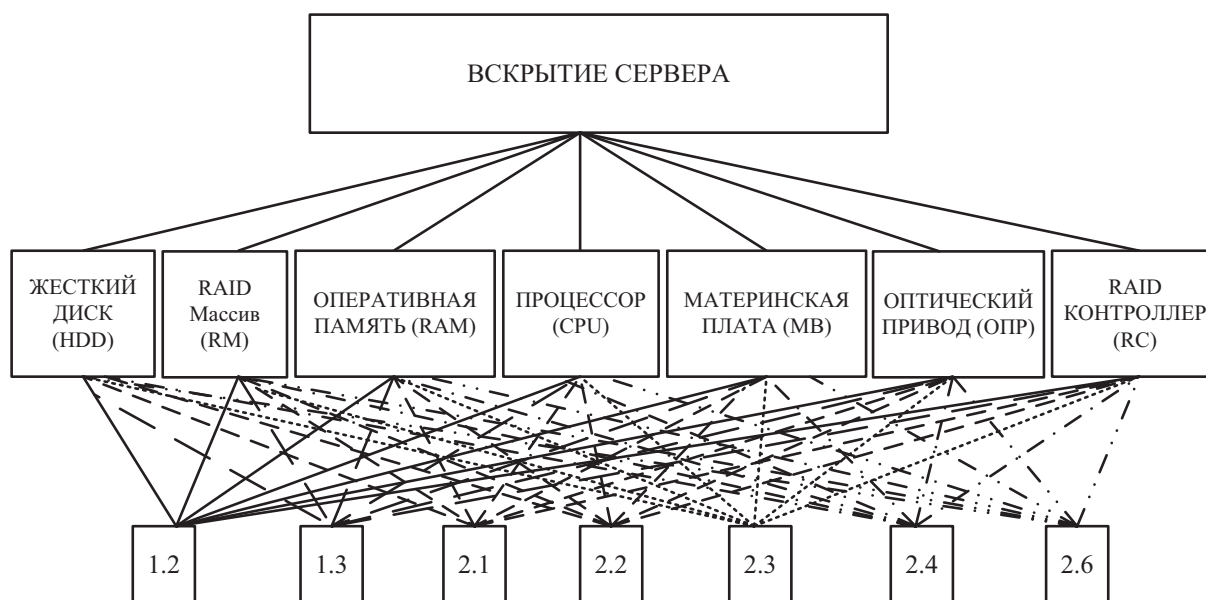


Рис. 6. Иерархия сервера

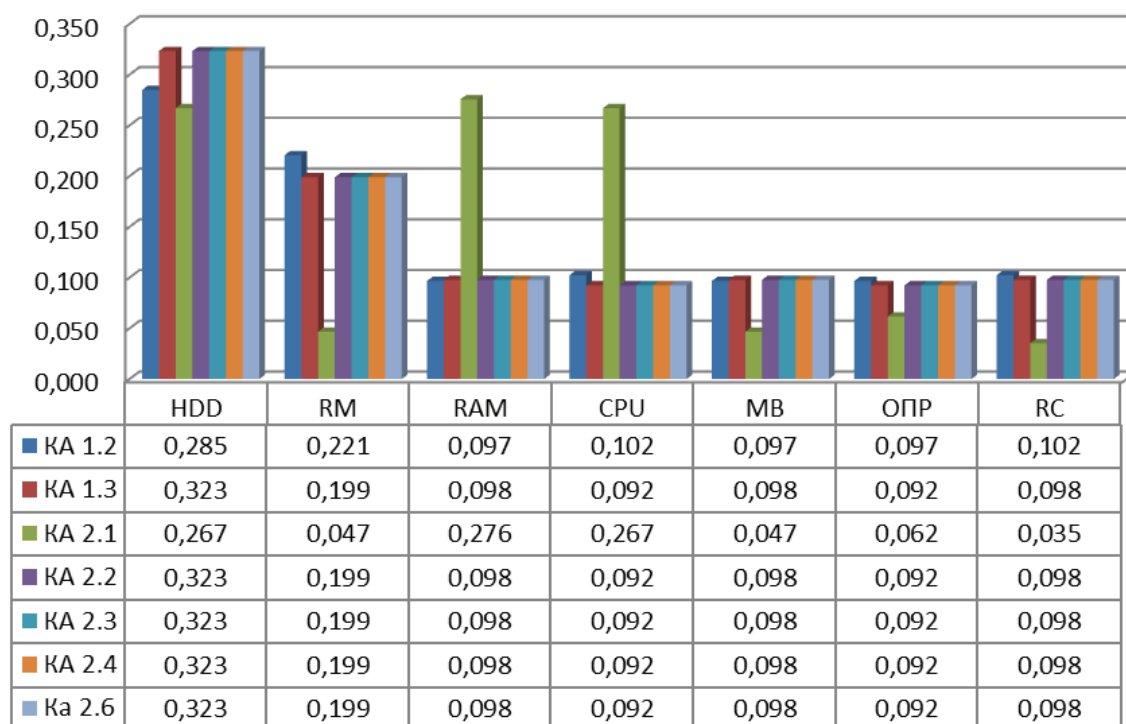


Рис. 7. Воздействие кибератак на подэлементы сервера

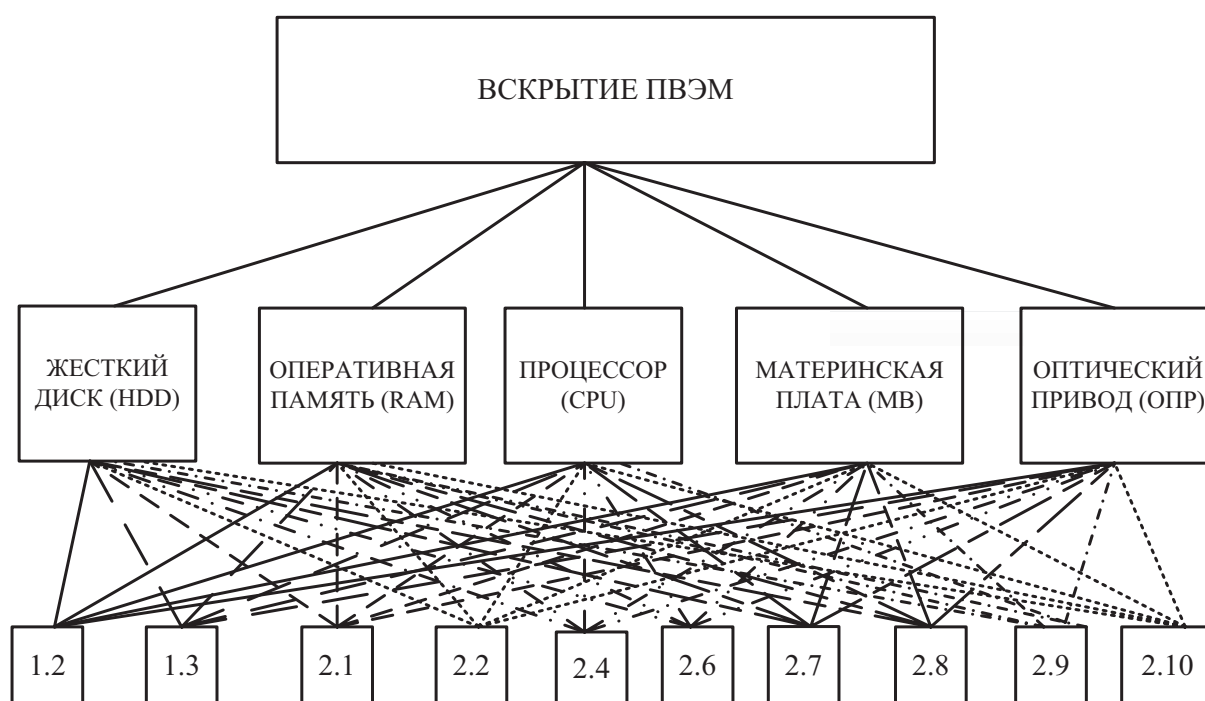


Рис. 8. Иерархия ПВЭМ

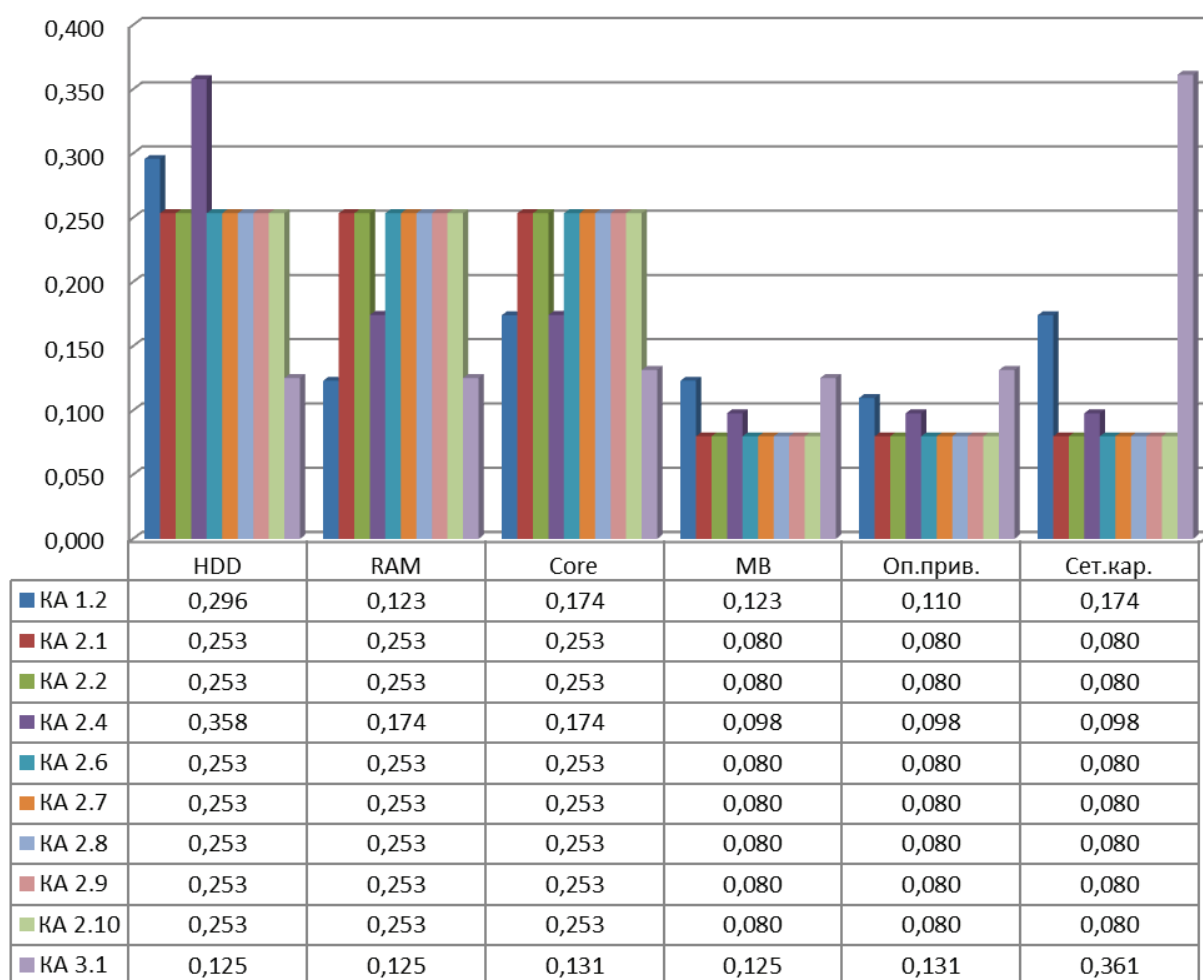


Рис. 9. Воздействие кибератак на подэлементы ПЭВМ

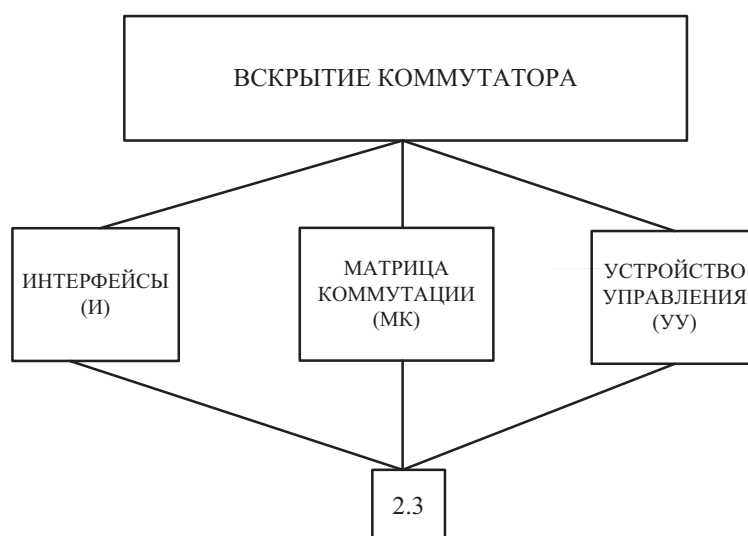


Рис. 10. Иерархия коммутатора

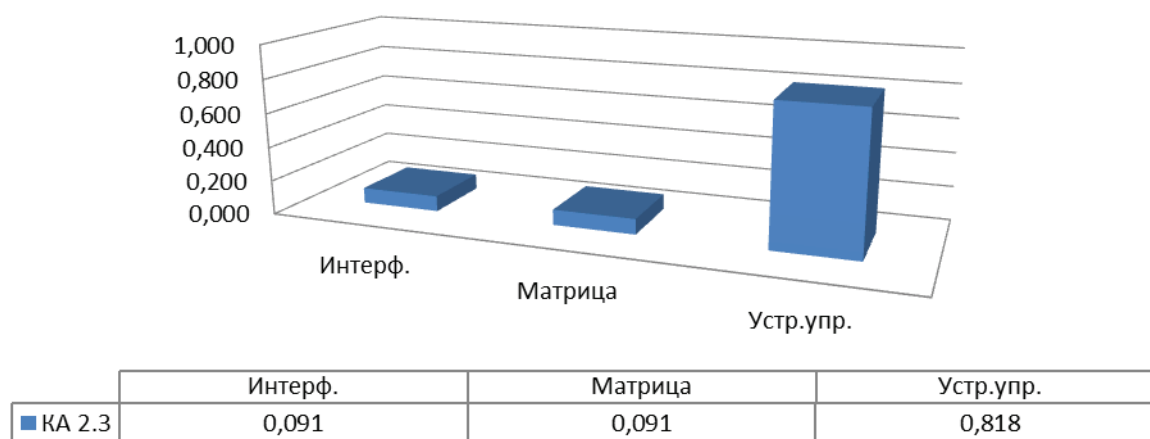


Рис. 11. Воздействие кибератак на подэлементы коммутатора

В данной методике проведен анализ сетевой инфраструктуры ИТКС по отношению воздействия на нее кибератак. Создание данной методики дает возможность проводить анализ иерархий сетевых структур систем связи, перейти к анализу конкретного узла или элемента сети, т.е. осуществлять иерархический синтез.

Анализируя векторы локальных приоритетов факторов, можно сделать вывод о том, что в сетях, реализующих технологию MPLS-TP, наибольшую важность, с точки зрения организованного нарушителя, представляет маршрутизатор. Вторым критическим элементом является сервер. Остальные элементы сети имеют равную вероятность воздействия. Учитывая полученный результат, можно распределять ресурс защиты на конкретные сетевые элементы, что, в свою очередь, позволяет не только уменьшить потребление ресурса сети, но и увеличить вероятность прогнозирования действий злоумышленника [12, 13].

Полученные результаты дают возможность определить элементы сети, наиболее подверженные воздействию нарушителя в ходе таргетированной атаки, выявить приоритетные методы воздействия (тип кибервоздействия) на тот или иной элемент (подэлемент) сетевой инфраструктуры. Кроме того, результаты делают возможным переход к построению эффективной модели кибервоздействия организованного нарушителя. В свою очередь,

создание эффективной модели кибервоздействия организованного нарушителя позволяет перейти к разработке программных и аппаратных средств, которые будут соответствовать требованиям, предъявляемым к ИТКС ОАО «РЖД» [14–17].

Библиографический список

1. Сайт РЖД. – URL : <http://doc.rzd.ru/doc/public/ru> (дата обращения: 06.02.2017).
2. ITU-T Rec.Y.100 (06/98). General overview of the Global Information Infrastructure standards development. – URL : https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?..T-REC-Y.100... (дата обращения : 06.02.2017).
3. Концептуальные положения по построению мультисервисных сетей на ВСС России. – Документ Министерства РФ по связи и информатизации. – М., 2001.
4. Кучерявый А.Е. Сети связи следующего поколения / А.Е. Кучерявый. – М. : ФГУП ЦНИИС, 2006. – 278 с.
5. Recommendation ITU-T Y.101. Global Information Infrastructure terminology: Terms and definitions.
6. Recommendation ITU-T Y.110. Global Information Infrastructure principles and framework architecture. – URL : <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y/en> (дата обращения: 18.02.2017).
6. Recommendation ITU-T Y.100. General overview of the Global Information Infrastructure standards development. – URL : www.itu.int/rec/T-REC-Y.100 (дата обращения : 18.02.2017).

7. Приказ ФСТЭК России от 14 марта 2014 г. № 31. – URL : www.fstec.ru (дата обращения : 12.01.2017).
8. Комплексные таргетированные угрозы: не просто вредоносные программы. – URL : http://media.kaspersky.com/documents/business/brfwn/ru/Advanced-persistent-threats-not-your-average-malware_Kaspersky-Endpoint-Control-white-paper-ru.pdf. (дата обращения : 08.02.2017).
9. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М. : Радио и связь, 1993. – 280 с.
10. Приказ ФСТЭК России от 18 февраля 2013 г. № 21. – URL : www.fstec.ru (дата обращения : 08.02.2017).
11. Комаров М. П. Современные методы принятия решений / М. П. Комаров. – СПб. : ВМА, 1999. – 157 с.
12. Лобов С. А. Принятие решений при организации связи и планировании развития системы связи / С. А. Лобов. – СПб. : ВМА, 2005. – 309 с.
13. Кравцов А. О. Сетевые защитные механизмы технологии MPLS-TP / А. О. Кравцов. – URL : <http://brni.info/view/issue-15.html#0> (дата обращения: 20.01.2017).
14. RFC 5654 MPLS-TP Requirements. – URL : <https://tools.ietf.org/html/rfc5654> (дата обращения : 20.02.2017).
15. Баранов А. П. Проблемы обеспечения информационной безопасности в информационно-телекоммуникационной системе специального назначения и пути их решения. – URL : <http://emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf/BPA/12ccdaa5fd89de1fc32575bd003e2eb1> (дата обращения: 15.02.2017).
16. Руководящий документ. Гостехкомиссия России, 2003 год. – URL : www.fstec.ru (дата обращения: 20.01.2017).
17. Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ. – URL : www.consultant.ru/documents/cons_doc@LAW_61898 (дата обращения: 20.01.2017).
2. ITU-T Rec. Y.100(06/98). *General overview of the Global Information Infrastructure standards development*. Available at: [https://www.int.int/rec/dologin-pub.asp.T-Rec.-100/\(accessed: 06.02.2017\)](https://www.int.int/rec/dologin-pub.asp.T-Rec.-100/(accessed: 06.02.2017)). (In Russian)
3. *Kontseptualniye polozheniya po pstroyeniyu multiservisnykh setey na VSS Rosii* [System regulations on multiservice networking in the Interconnected Communication network of Russia]. Dokument ministerstva RF po svyazy i informatizatsii [The Ministry of telecom and mass communications of the RF act], 2001. Moscow, 2001. (In Russian)
4. Kucheryaviy A. Y. *Sety svyazy sleduyushogo pokoleniya* [Next generation communication networks]. Moscow, Federal State Unitary Enterprise Central Science Research Telecommunication Institute Publ., 2006, 278 p. (In Russian)
5. *Recommendation ITU-T Y.101. Global Information Infrastructure terminology: Terms and definitions. Recommendation ITU-T Y.110. Global Information Infrastructure principles and framework architecture*. Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.101> (accessed: 18.02.2017).
6. *Recommendation ITU-T Y.100. General overview of the Global Information Infrastructure standards development*. Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.101> (accessed: 18.02.2017).
7. *Prykaz FSTEK Rossii ot 14 marta 2014 g.* [The Russian Federation Federal Service for Technical and Export Control order from March], 14th, 2014. Available at: www.fstec.ru (accessed: 12.01.2017). (In Russian)
8. *Kompleksniye targetyrovanniye ugrozy: ne prosto vredonosniye programmy* [Complex targeted threats: not just malicious software]. Available at: http://media.kaspersky.com/documents/business/brfwn/ru/Advanced-persistent-threats-not-your-average-malware_Kaspersky-Endpoint-Control-white-paper-ru.pdf. (accessed: 08.02.2017). (In Russian)
9. Saati T. *Prynyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy* [Decision making. The method of hierarchies' analysis]. Tr. from eng. R. G. Vachnadze. Moscow, Radio and telecommunication Publ., 1993, 280 p. (In Russian)
10. *Prykaz FSTEK Rossii ot 18 fevralya 2013 g.* [The Russian Federation Federal Service for Technical and Export Control order from February], 18th, 2013, no. 21. Available at: www.fstec.ru (accessed: 08.02.2017). (In Russian)

References

1. *Sait RZhD* [Russian Railways website]. Available at: <http://doc.rzd.ru/doc/public/ru> (accessed: 06.02.2017). (In Russian)

11. Komarov M. P. *Sovremennyye metody prinyatiya resheniy* [Modern methods of decision making]. Saint Petersburg, VMA (Naval Academy) Publ., 1999, 157 p. (In Russian)
12. Lobov S. A. *Prynyatiye resheniy pry organizatsii svyazy i planirovaniy razvitiya systemy svyazy VMF* [Making decisions in the process of organizing and development planning of navy communications system]. Saint Petersburg, VMA (Naval Academy) Publ., 2005, 309 p. (In Russian)
13. Kravtsov A. O. Setevyye zashytnyye mekhanizmy tekhnologii MPLS-TP [Network MPLS-TP technology safeguarding mechanisms]. *Bulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of scientific research results*, 2015, issue 2 (15). Available at: <http://brni.info/view/issue-15.html#/0> (accessed: 20.01.2017). (In Russian)
14. RFC 5654 MPLS-TP Requirements. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc5654> (accessed: 20.02.2017). (In Russian)
15. Baranov A. P. *Problemy obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti v informatsionnoy bezopasnosti v informatsionno-telekommunikatsionnoy systeme spetsialnogo naznacheniya i puty ikh resheniya* [The problems of information security in qualified informational telecommunications system and solutions]. Available at: <http://emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf/BPA/12ccdaa5fd89de1fc32575bd003e2eb1> (accessed: 15.02.2017). (In Russian)
16. *Rukovodyashiy dokument. Gostekhkomiissiya Rossii* [Management directive. Russian State technical committee], 2003. Available at: www.fstec.ru (accessed: 20.01.2017). (In Russian)
17. *Federalniy zakon "Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i zashyte informatsii" ot 27 iyulya 2006* [Federal law "On information, information technologies and information security" from July, 27th, 2006], no. 149-ΦЗ. Available at: www.consultant.ru/documents/cons_doc@LAW_61798 (accessed: 20.01.2017). (In Russian)

*КРАВЦОВ Антон Олегович – аспирант, kravcovanton@mail.ru; ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич – доктор военных наук, профессор, arivalov@inbox.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 658.78(075)

О. Б. Маликов**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСОВ И ЕМКОСТИ СКЛАДОВ В ЦЕПЯХ ПОСТАВОК**

Дата поступления: 18.04.2016

Решение о публикации: 13.03.2017

Цель: Описывается новый метод определения складских запасов и емкости складов в цепях поставок, который разработан на кафедре «Логистика и коммерческая работа» ПГУПС. **Методы:** Метод исключает ошибки в определении запасов, которые происходят при использовании существующих методов расчетов, не учитывающих, что грузопотоки в цепях поставок – величины переменные. Потому запасы грузов на складах – тоже величины переменные, так как они зависят от неравномерных грузопотоков прибытия и отправления грузов. **Результаты:** Предлагаемый метод расчета запасов дает возможность обоснованно определять емкости складов, которые являются величинами постоянными и должны вмещать переменные величины запасов. При проектировании складов необходимо выбрать постоянные величины их размеров и определенные способы складирования. **Практическая значимость:** Предлагаемый метод расчета запасов позволяет устранить это противоречие при проектировании складов в цепях поставок. Поэтому он имеет большое значение для достоверного и обоснованного проектирования складов.

Ключевые слова: Склад, грузопоток, прибытие, отправление, запасы, емкость, вероятность, неравномерность, цепь поставок.

Oleg B. Malykov, D. Sci., professor, stadnitskey@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE ASSESSMENT OF STOCK RESOURCES AND STORAGE CAPACITY IN SUPPLY CHAINS

Objective: The article states the new assessment method of stock resources and storage capacity in supply chains which was developed at “Logistics and marketing” Department of the Petersburg State Transport University. **Methods:** The given method eliminates the mistakes of stock resources assessment, which occur in the process of modern assessment methods application, as they do not allow for the fact that freight flow in supply chains are variable quantities. Therefore, goods in stock are variables as well, as they depend on irregular freight flow of goods arrival and departure. **Results:** The suggested assessment method of stock resources allows to justify storage capacity which is a constant and it should contain the variable quantities of stock. When designing storage facilities it is essential to choose constants of the storage space and certain methods of stock holding. **Practical importance:** The suggested assessment method of stock resources contributes to elimination of this discrepancy when designing storage facilities in supply chains. Thus, this method is of great importance for accurate and rationalized storage facilities design.

Keywords: Storage facility, freight flow, arrival, departure, stock, storage capacity, probability, irregularity, supply chain.

Введение

Склад в своей работе взаимодействует с двумя вероятностными грузопотоками: прибытия грузов и отправления грузов. В результа-

те этого в складе возникает третий случайный процесс изменения запасов грузов, параметры которого неизвестны. Емкость склада (количество грузов, одновременно помещающееся в складе), как технического сооружения, – это

величина постоянная при определенных размерах склада и выбранном способе складирования грузов. Таким образом, перед проектировщиком стоит противоречивая задача: на какую емкость проектировать склад и какой для этого склада выбирать определенный способ складирования грузов.

Существующие способы расчетов

Используют несколько способов технологических расчетов, позволяющих в той или иной мере преодолеть указанное противоречие между случайным колебанием запасов и необходимостью выбора определенных размеров склада: аналитический способ расчета по средним величинам; расчет с использованием математического ожидания величины запасов; расчет с применением доверительной вероятности запасов; имитационное моделирование запасов на компьютере [1–10].

Наиболее простой способ расчетов, обычно применяющийся на практике при проектировании складов, – это аналитический расчет по средним величинам грузопотоков и запасов хранения.

При этом сначала определяют средний суточный грузопоток:

$$Q_c = Q_{\Gamma}/T,$$

где Q_{Γ} – годовой грузопоток (годовая перерабатывающая способность склада), т/год; T – число суток работы склада в году, сутки/год.

Затем запасы хранения и требуемая емкость склада определяются с использованием среднего срока хранения грузов τ_x , в сутках:

$$E = I(Q_c, \tau_x) = Q_c \tau_x.$$

В цепях поставок имеются многие склады разных типа и назначения, для которых по опыту проектирования и эксплуатации существуют определенные нормативные сроки хранения τ_x . При административно-команд-

ном режиме управления экономикой эти сроки хранения были утверждены Правительством и применялись в проектах как нормативные величины.

Например, для складов материально-технического снабжения промышленных предприятий – 20–25 суток, для производственных технологических складов промышленных предприятий – от 4–6 часов до 1 суток, для складов промышленных предприятий – 3–5 суток, для оптовых торговых складов – 30–40 суток, для складов розничной торговли – 5–10 суток, для складов экспедиторских компаний – 5–15 суток, для перевалочных складов на магистральном транспорте – 2–7 суток, для складов сезонных товаров – до 180 суток.

Преимущество аналитического метода расчета по средним величинам состоит в его простоте и доступности для работника любой квалификации, а недостаток – в отсутствии учета в этом методе неравномерностей и случайного колебания грузопотоков, что характерно для производственных, транспортных и экономических систем. Поэтому его нельзя считать достаточно достоверным.

Для метода расчета запасов и емкости складов по математическому ожиданию запасов надо иметь в качестве исходных данных вероятностные распределения запасов

$$I = \begin{bmatrix} I_1, & I_2, & \dots, & I_n \\ P(I_1), & P(I_2), & \dots, & P(I_n) \end{bmatrix},$$

где $I_1, I_2, \dots, I_n$ – возможные величины запасов грузов на складе; $P(I_1), P(I_2), \dots, P(I_n)$ – соответствующие их вероятности.

При этом должно выполняться нормировочное условие

$$\sum P(I_i) = 1,00,$$

которое гарантирует, что учтены все возможные величины запасов грузов на этом складе (полная группа случайных событий).

Емкость склада принимается равной математическому ожиданию случайной величины запасов грузов:

$$E = M[I] = \sum I_i \cdot \sum P(I_i).$$

Недостаток этого метода расчета емкости склада состоит в том, что бывает довольно сложно построить исходное распределение вероятностей складских запасов, так как запасы могут колебаться каждый день и количество элементов в статистической выборке может достигать многих десятков.

При определении запасов грузов и емкости склада с применением доверительной вероятности в качестве исходных данных задаются вероятностное распределение складских за-

пасов, так же как в предыдущем случае, и доверительная вероятность определения емкости склада, обозначаемая греческой буквой «ро» – ρ , так что запасы грузов и емкость склада определяются неточно и однозначно, а только с этой заданной вероятностью, которая принимается равной 0,95–0,97. Таким образом, допускается, что в 3...5% случаев запас хранения $I(t)$ может превысить емкость склада E .

При использовании этого метода строится интегральная функция распределения складских запасов:

Вероятность запасов:	$P(I_1),$	$P_2(I_2),$	$\dots,$	$P(I_{i-1}),$	$P(I_i),$	$P(I_{i+1}),$	$\dots,$	$P(I_m)$
Накопленная вероятность:	$F(I_1),$	$F(I_2),$	$\dots,$	$F(I_{i-1}),$	$F(I_i),$	$P(I_{i+1}),$	$\dots,$	$F(I_m) = 1,00$

Интегральная функция распределения запасов в нижней строке определяется так:

$$F(I_i) = F(I_{i-1}) + P(I_i).$$

В интегральной функции распределения вероятностей запасов определяется интервал, в который попадает заданная доверительная вероятность ρ :

$$E = I_i | \rho \in (F(I_i); F(I_{i+1}))|.$$

В этом интервале величина запаса I_i (а следовательно, и искомая емкость склада E) определяется методом линейной интерполяции:

$$E = I(I \leq \rho) = \frac{\rho - P(I_i)}{P(I_{i+1}) - P(I_{i-1})} \cdot (I_{i+1} - I_{i-1}) + I_{i-1}.$$

Недостатком этого метода определения емкости склада является отсутствие связи запасов хранения и емкости склада с закономерностями грузопотоков прибытия и отправления грузов, так как здесь мы сразу оперируем запасами и не имеем возможности проанализировать, как они связаны с вероятностными

значениями грузопотоков прибытия и отправления грузов со склада.

При моделировании складских запасов на ЭВМ с целью определения емкости склада в качестве исходных данных задают закономерности изменения грузопотоков прибытия и отправления грузов и число циклов моделирования. Закономерности грузопотоков прибытия и отправления грузов могут быть заданы в виде формул вероятностных распределений грузопотоков или в табличном виде. В компьютере должен быть заложен файл с алгоритмом определения случайных чисел, равномерно распределенных в интервале $[0, 1]$. Число циклов моделирования в зависимости от типа склада может быть задано 90 (один квартал), 180 (полгода) или 365 (целый год).

Компьютер может выдавать в качестве результата вероятностное распределение запасов, емкость склада с заданной доверительной вероятностью и др. Недостатками компьютерного распределения запасов, при всех его достоинствах (автоматизация и быстрота вычислений, возможность рассмотрения разных вариантов), являются необходимость разработки компьютерной программы и отсутствие возможности анализа работы вычислитель-

ного алгоритма, так как ЭВМ выдает только конечный результат.

Предлагаемый метод расчета запаса хранения

Разработанный новый метод расчета запасов грузов и емкости склада с учетом любых вероятных колебаний суточных грузопотоков прибытия и отправления грузов со склада может быть легко осуществлен вручную, по простейшей программе в Excel или по обычной компьютерной программе [11–15].

Задача состоит в том, чтобы, зная закономерности случайных колебаний грузопотоков прибытия и отправления грузов со склада, определить однозначно величину запасов, на которую должна рассчитываться емкость склада R (в поддонах или тоннах). Этим методом может быть определен запас хранения как математическое ожидание изменяющихся запасов грузов или с некоторой заданной доверительной вероятностью p .

В качестве исходных данных задаются вероятностные распределения грузопотоков:

- прибытия грузов в склад, поддоны/сутки:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} q_1, & q_2, & \dots, & q_n \\ \alpha(q_1), & \alpha(q_2), \dots, & \alpha(q_n) \end{bmatrix};$$

- выдачи грузов со склада, поддоны/сутки:

$$Q_2 = \begin{bmatrix} s_1, & s_2, & \dots, & s_m \\ \beta(s_1), & \beta(s_2), \dots, & \beta(s_m) \end{bmatrix},$$

где $q_1, q_2, \dots, q_n$ – случайные значения суточного прибытия грузов, поддоны/сутки; $\alpha(q_1), \alpha(q_2), \dots, \alpha(q_n)$ – соответствующие вероятности появления этих случайных величин суточного прибытия; $s_1, s_2, \dots, s_m$ – случайные значения суточного отправления грузов, поддоны/сутки; $\beta(s_1), \beta(s_2), \dots, \beta(s_m)$ – соответствующие вероятности появления этих случайных величин суточного отправления грузов; n и m – число интервалов соответственно величин суточного прибытия и отправления грузов.

Число этих интервалов обычно принимается в пределах 6–12. Должно выполняться нормировочное условие – сумма вероятностей каждого вида грузопотоков должна быть равна 1,00:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i = 1,00 \quad \text{и} \quad \sum_{j=1}^{j=m} \beta_j = 1,00,$$

так как случайные события прибытия и отправления грузов со склада должны составлять полные группы событий.

Доверительная вероятность задается в пределах $p = 0,95–0,97$.

Страховой запас грузов в складе определяется как разность максимальной выдачи груза за сутки и минимального прибытия грузов:

$$I_0 = \max(s_j, j = 1, 2, \dots, m) - \min(q_i, i = 1, 2, \dots, n).$$

Предлагаемый метод расчета состоит в том, что рассматривают все возможные сочетания прибытия и отправления грузов со склада и по каждому сочетанию определяют запас хранения грузов и вероятность этого запаса.

Величину запаса хранения для каждого k -го сочетания суточных грузопотоков прибытия и отправления грузов определяют так (в поддонах):

$$I_k = I_0 + q_k - s_k,$$

где I_0 – страховой запас груза, поддоны; q_k – суточный грузопоток прибытия в k -е сутки; s_k – суточный грузопоток отправления в k -е сутки.

Вероятность запаса хранения грузов в k -е сутки определяется по формуле теории вероятностей как вероятность двух независимых случайных событий, которая равна произведению вероятностей этих событий:

$$P_k = \alpha(q_k) \cdot \beta(s_k).$$

Искомый запас хранения грузов на складе определяется как математическое ожидание всех возможных сочетаний суточных грузопотоков прибытия и отправления грузов, число которых равно nm .

Снова должно быть проверено нормировочное условие

$$\sum P_k = 1,00,$$

которое показывает, что были рассмотрены все nm возможных сочетаний грузопотоков прибытия и отправления грузов со склада.

Прибытие	q_i	100	300	800	900	1000
	α_i	0	0,2	0,5	0,2	0,1
Отправление	s_j	200	300	400	500	1000
	β_j	0,1	0,4	0,3	0,2	0

Определяем страховой запас:

$$I_0 = 1000 - 100 = 900 \text{ поддонов.}$$

Далее расчеты запаса хранения удобно выполнять в форме таблицы.

Составляем общую таблицу распределения запасов хранения I и их вероятностей P_i (так как по отдельным сочетаниям запасы могут совпадать, их вероятности суммируем):

$I:$	0	500	600	700	800	900	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1700
$P_i:$	0	0	0	0,04	0,06	0,08	0,02	0,10	0,19	0,28	0,16	0,06	0,01

Проверяем нормировочное условие: $\sum P_i = 1,00$.

Суммируя вероятности запасов хранения нарастающим итогом слева-направо, составляем интегральную функцию распределения запасов $\Phi(I)$ хранения в следующем виде:

$I:$	0–600	700	800	900	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1700
$\Phi(I):$	0	0,04	0,10	0,18	0,20	0,30	0,49	0,77	0,93	0,99	1,00

Доверительная вероятность $\rho = 0,95$ попадает в интервал $0,95 \in [0,93; 0,99]$.

Значит, запас хранения грузов I должен находиться в интервале от 1500 до 1600 поддонов. В этом интервале запас хранения и требуемую емкость склада вычисляем по формуле линейной интерполяции, в поддонах:

Продолжив расчеты, можно еще уточнить величину запаса хранения грузов с заданной доверительной вероятностью.

Пример определения запаса хранения

Метод решения задачи показан на примере, в котором $n = m = 5$, доверительная вероятность $\rho = 0,95$.

Примем следующие исходные данные для этого примера по вероятностным распределениям грузопотоков прибытия и отправления:

$$\begin{aligned} R = I(I \leq \rho) &= \\ &= \frac{0,95 - 0,93}{0,99 - 0,93} \cdot (1600 - 1500) + \\ &\quad + 1500 = 1533. \end{aligned}$$

Можно еще вычислить для анализа и коэффициент колебания запасов грузов (ККЗ):

Расчеты запаса хранения

Сочетания грузопотоков, поддоны/сутки		Запасы грузов I_i , поддоны	Вероятности запасов P_i	Произведение $I_i \cdot P_i$
Прибытие	Отправление			
100	200	$900 + 100 - 200 = 800$	$0 \cdot 0,1 = 0$	0
	300	$900 + 100 - 300 = 700$	$0 \cdot 0,4 = 0$	0
	400	$900 + 100 - 400 = 600$	$0 \cdot 0,3 = 0$	0
	500	$900 + 100 - 500 = 500$	$0 \cdot 0,2 = 0$	0
	1000	$900 + 100 - 1000 = 0$	$0 \cdot 0 = 0$	0
300	200	$900 + 300 - 200 = 1000$	$0,2 \cdot 0,1 = 0,02$	20
	300	$900 + 300 - 300 = 900$	$0,2 \cdot 0,4 = 0,08$	72
	400	$900 + 300 - 400 = 800$	$0,2 \cdot 0,3 = 0,06$	48
	500	$900 + 300 - 500 = 700$	$0,2 \cdot 0,2 = 0,04$	28
	1000	$900 + 300 - 1000 = 200$	$0,2 \cdot 0 = 0$	0
800	200	$900 + 800 - 200 = 1500$	$0,5 \cdot 0,1 = 0,05$	75
	300	$900 + 800 - 300 = 1400$	$0,5 \cdot 0,4 = 0,20$	280
	400	$900 + 800 - 400 = 1300$	$0,5 \cdot 0,3 = 0,15$	195
	500	$900 + 800 - 500 = 1200$	$0,5 \cdot 0,2 = 0,10$	120
	1000	$900 + 800 - 1000 = 700$	$0,5 \cdot 0 = 0$	0
900	200	$900 + 900 - 200 = 1600$	$0,2 \cdot 0,1 = 0,02$	32
	300	$900 + 900 - 300 = 1500$	$0,2 \cdot 0,4 = 0,08$	120
	400	$900 + 900 - 400 = 1400$	$0,2 \cdot 0,3 = 0,06$	84
	500	$900 + 900 - 500 = 1300$	$0,2 \cdot 0,2 = 0,04$	52
	1000	$900 + 900 - 1000 = 800$	$0,2 \cdot 0 = 0$	0
1000	200	$900 + 1000 - 200 = 1700$	$0,1 \cdot 0,1 = 0,01$	17
	300	$900 + 1000 - 300 = 1600$	$0,1 \cdot 0,4 = 0,04$	64
	400	$900 + 1000 - 400 = 1500$	$0,1 \cdot 0,3 = 0,03$	45
	500	$900 + 1000 - 500 = 1400$	$0,1 \cdot 0,2 = 0,02$	28
	1000	$900 + 1000 - 1000 = 900$	$0,1 \cdot 0 = 0$	0
С у м м а:		—	1,00	1280

$$KK3 = \frac{R}{\sum I_i \cdot P_i} = \frac{1533}{1280} = 1,20.$$

Заключение

Предлагаемый метод определения запасов хранения грузов на складе позволяет вычис-

лить запас хранения грузов при любых случайных колебаниях суточных грузопотоков прибытия и отправления грузов более точно, чем обычно применяемый при проектировании цепи поставок метод расчета исходя из среднего срока хранения грузов.

Этот метод обеспечивает большую достоверность расчетов, так как учитывает нерав-

номерность грузопотоков, которая характерна и всегда бывает в реальных условиях работы транспорта, складов и промышленных предприятий, поставляющих товары в торговые сети.

Кроме этого, он открывает широкие возможности для анализа колебания грузопотоков и связанных с ними запасов, так как в вычислительной таблице виден весь ход расчетов, и таким образом позволяет не только более точно определить емкость склада, но и эффективнее управлять запасами товаров на различных складах в цепях поставок.

Библиографический список

1. Балалаев А. С. Транспортно-грузовые системы железных дорог : учеб. пособие / А. С. Балалаев, И. А. Чернышова, А. Ю. Костенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 108 с.
2. Журавлев Н. П. Транспортно-грузовые системы : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Н. П. Журавлев, О. Б. Маликов. – М. : ФБГОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2005. – 438 с.
3. Смехов А. А. Управление грузовой и коммерческой работой на железнодорожном транспорте / А. А. Смехов, В. В. Повороженко, А. Т. Дерибас и др. ; под ред. А. А. Смехова. – М. : Транспорт, 1990. – 351 с.
4. Елисеев С. Ю. Система логистического управления взаимодействием с морскими и речными портами и другими видами транспорта : монография / С. Ю. Елисеев. – М. : ВИНТИ РАН, 2005. – 96 с.
5. Дыбская В. В. Управление складированием в цепях поставок / В. В. Дыбская. – М. : Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.
6. Прокофьева Т. А. Логистические центры в транспортной системе России : учеб. пособие / Т. А. Прокофьева, В. И. Сергеев. – М. : Изд. дом «Экономическая газета», 2012. – 522 с.
7. Миротин Л. Б. Логистика, технология, проектирование складов, транспортных узлов и терминалов / Л. Б. Миротин, А. В. Бульба, В. А. Демин. – Ростов н/Д. : Феникс, 2009. – 408 с.

8. Основы логистики / под ред. В. В. Щербакова. – СПб. : Питер, 2009. – 432 с.

9. Сергеев В. И. Менеджмент в бизнес-логистике / В. И. Сергеев. – М. : Изд. дом «ФИЛИН», 1997. – 772 с.

10. Стыковые пункты транспортных узлов / под ред. К. Ю. Скалова, Г. С. Молярчук. – М. : Транспорт, 1977. – 184 с.

11. Маликов О. Б. Склады гибких автоматических производств / О. Б. Маликов. – Л. : Машиностроение, 1986. – 187 с.

12. Маликов О. Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок / О. Б. Маликов. – М. : ФБГОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2014. – 536 с.

13. Маликов О. Б. Склады и грузовые терминалы / О. Б. Маликов. – СПб. : Бизнес-пресса, 2005. – 648 с.

14. Маликов О. Б. Складская и транспортная логистика в цепях поставок / О. Б. Маликов. – СПб. : Питер, 2015. – 400 с.

15. Маликов О. Б. Деловая логистика / О. Б. Маликов. – СПб. : Политехника, 2003. – 240 с.

References

1. Balalayev A. S., Chernyshova I. A. & Kostenko A. Y. *Transportno-gruzoviye systemy zheleznikh dorog* [Cargo-carrying railroad systems]. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University Publ., 2006, 108 p. (In Russian)
2. Zhuravlev N. P. & Malykov O. B. *Transportno-gruzoviye systemy* [Cargo-carrying systems]. Moscow, FBGOU "Learning and teaching educational centre of railway transport" Publ., 2005, 438 p. (In Russian)
3. Smekhov A. A., Povorozhenko V. V., Deribas A. T. at all. *Upravleniye gruzovoy i kommercheskoy rabotoy na zheleznodorozhnom transporte* [Freight operation and commercial work management on railway transport]. Ed. by A. A. Smekhov. Moscow, Transport Publ., 1990, 351 p. (In Russian)
4. Yeliseev S. Y. *Systema logisticheskogo upravleniya vzaimodeystviyem s morskimi i rechnymi portami i drugimi vidami transporta* [Logistic control system of sea and river ports and other types of transport cooperation]. Moscow, All-Russian Institute of

Scientific and Technical Information Russian Academy of Sciences Publ., 2005, 96 p. (In Russian)

5. Dybskaya V. V. *Upravleniye skladyrovaniyem v tsepyakh postavok* [Store management in chain supplies]. Moscow, Alpha-Press Publ., 2009, 720 p. (In Russian)

6. Prokofiyeva T. A. & Sergeyev V. I. *Logisticheskiye tsentry v transportnoy systeme Rossii* [Logistic centres in the transport system of Russia]. Moscow, Economic newspaper Publ., 2012, 522 p. (In Russian)

7. Myrotyn L. B., Bulba A. V. & Demin V. A. *Logistika, tekhnologiya, proektyrovaniye skladov, transportnykh uzlov i terminalov* [Logistics, engineering, construction of stores, traffic centres and terminals]. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2009, 408 p. (In Russian)

8. *Osnovy logistiki* [Logistics basics]. Ed. by V. V. Sherbakova. Saint Petersburg, Peter Publ., 2009, 432 p. (In Russian)

9. Sergeyev V. I. *Menedzhment v bysnes-logistike* [Management in business-logistics]. Moscow, FILIN Publ., 1997, 772 p. (In Russian)

10. *Stykoviye punkty transportnykh uzlov* [Division points of traffic centres]. Eds: K. Y. Skalova, G. S. Molyarchuk. Moscow, Transport Publ., 1977, 184 p. (In Russian)

11. Malykov O. B. *Sklady gybkykh avtomaticheskyykh proizvodstv* [Flexible automatic production stores]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986, 187 p. (In Russian)

12. Malykov O. B. *Perevozky i skladyrovaniye tovarov v tsepyakh postavok* [Freight traffic and storing of goods in supply chains]. Moscow, FBGOU "Learning and teaching educational centre of railway transport" Publ., 2014, 536 p. (In Russian)

13. Malykov O. B. *Sklady i gruzoviye termynaly* [Stores and freight terminals]. Saint Petersburg, Business-press Publ., 2005, 648 p. (In Russian)

14. Malykov O. B. *Skladskaya i transportnaya logistika v tsepyakh postavok* [Warehousing and transport logistics in supply chains]. Saint Petersburg, Peter Publ., 2015, 400 p. (In Russian)

15. Malykov O. B. *Delovaya logistika* [Business logistics]. Saint Petersburg, Polytekhnika Publ., 2003, 240 p. (In Russian)

МАЛИКОВ Олег Борисович – доктор техн. наук, профессор, stadnitskey@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.04

К. Ю. Полинкевич

ИТЕРАЦИОННЫЙ СПОСОБ РАСЧЕТА ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ НА ПРОЧНОСТЬ

Дата поступления: 11.12.2016

Решение о публикации: 13.03.2017

Цель: Описание методики расчета на кручение тонкостенных балок открытого профиля, основанной на итерационном способе последовательного удовлетворения условиям равновесия и совместности деформаций. **Методы:** Рассмотрена задача кручения тонкостенного стержня открытого профиля на примере швеллера. Определен центр кручения для стержня открытого профиля. Получено дифференциальное уравнение угла закручивания оси стержня. Установлены граничные условия с целью нахождения постоянных интегрирования. Приведены гипотезы, позволяющие поставить задачу на первом цикле. **Результаты:** На численном примере обсуждаются результаты на первом и втором циклах, объясняется возможность перехода к третьему и последующим циклам. Рассчитаны функции продольных и поперечных деформаций, а также деформаций сдвига для каждой пластинки тонкостенного стержня. Аналогично определены нормальные и касательные напряжения. Найдена функция перемещений. **Практическая значимость:** Показано, что решение задачи стесненного кручения тонкостенного стержня открытого профиля с использованием метода итераций хорошо согласуется с известными решениями, полученными В.З. Власовым. В нем отсутствуют понятия секториальных геометрических характеристик, не используется понятие бимоента. На первом цикле получено решение для каждого элемента стержня, как для обычного стержня в сопротивлении материалов, – нормальные напряжения распределяются линейно, касательные – по квадратной параболе. Это решение принимается за основу следующих циклов итераций, что в дальнейшем позволяет усложнять алгоритм, рассматривать слоистые и анизотропные материалы конструкций. Также метод итераций дает возможность учитывать деформации сдвигов. В зависимости от количества циклов можно оценить напряженно-деформированное состояние в виде полиномов более высокой степени, что приводит к большей точности решения.

Ключевые слова: Теория упругости, кручение, стержень открытого профиля, метод итераций, напряжения, деформации.

Konstantyn Y. Polynkevych, postgraduate student, 10237@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) ITERATIVE CALCULATION PRINCIPLE OF OPEN PROFILE THIN-WALLED BARS STRENGTH

Objective: The description of calculation method of open profile thin-walled beams twisting, based on iterative method of consecutive satisfaction of equilibrium conditions and deformation consistency. **Methods:** The task of open profile thin-walled beam twisting was considered on the example of a channel bar. The center of open profile beam twist was identified. Differential equation of center line of a bar twist angle was obtained. Boundaries were established for the purpose of establishing integration constants. Hypotheses, which made it possible to set the task in the first cycle, were put forward. **Results:** The results of the first and second cycle were displayed by means of a numerical example, the possibility of stepping on to the third and following cycles. The functions of lateral and axial deformations, as well as shearing strain functions were calculated for each plate of a thin-walled beam. Shearing and direct stress were established by analogy. Displacement function was found. **Practical importance:** It was shown that the task of open profile thin-walled beam bending torsion with the application of iterative

method correlates accurately with V. Z. Vlasov's well-known solutions. There are no notions of sectorized geometric characteristics and the bimoment notion. In the first cycle the solution is obtained for each beam element in a similarly way with a bar in the strength of materials – direct stress is spread in a linear way, while shearing stress is spread along quadratic parabola. This solution is taken as a principle of the following iterative cycles, which makes it possible to complicate the algorithm in the sequel and consider laminated and anisotropic materials for structures. Likewise, iterative method makes it possible to take account of shear deformation. Depending on the quantity of cycles, deflected mode can be estimated in the form of polynomials of a higher degree, which leads to a higher accuracy of solution.

Keywords: Theory of elasticity, twisting, open profile beam, iterative, stress, deformation methods.

Введение

Рассмотрена задача кручения тонкостенного стержня открытого профиля на примере швеллера. Определено напряженно-деформированное состояние (НДС) балки методом итераций. Основанный на последовательном удовлетворении условиям равновесия и совместности деформаций, он рассматривался ранее в [1, 2].

В. З. Власов предложил общую теорию расчета незамкнутых тонкостенных стержней, включающую вопросы их прочности, устойчивости и колебаний [3], А. А. Уманский – теорию расчета замкнутых тонкостенных профилей [4], В. И. Сливкер – обобщенную техническую теорию стержней [5].

Вопросы расчета статически неопределимых конструкций, состоящих из тонкостенных стержней, были рассмотрены Б. Н. Горбуновым, А. И. Стрельбицкой [6], Д. В. Бычковым [7], Н. И. Карякиным [8], Г. Ю. Джанелидзе, Я. Г. Пановко [9].

Для численного примера примем следующие исходные данные: консольный стержень имеет длину L , стенку высотой H , одинаковые полки шириной B , толщину листа t . Выполнен из материала с модулем упругости E , коэффициентом Пуассона μ . На свободном конце швеллер загружен крутящим моментом $M_{кр}$.

Определение центра кручения

Перемещения поперечного сечения при кручении можно описать через координаты

центра кручения $X_p(x, y)$; $Y_p(x, y)$ и угол закручивания поперечных сечений относительно этого центра $\varphi(z)$.

Для решения задачи принимаем следующие гипотезы (по теории Власова):

- 1) неизменяемости контура;
- 2) отсутствия сдвигов (применяется только на первом цикле);
- 3) плоских сечений (используется только на первом цикле).

Поперечное сечение швеллера будем рассматривать, как три отдельных пластины, жестко соединенных между собой по двум общим граням.

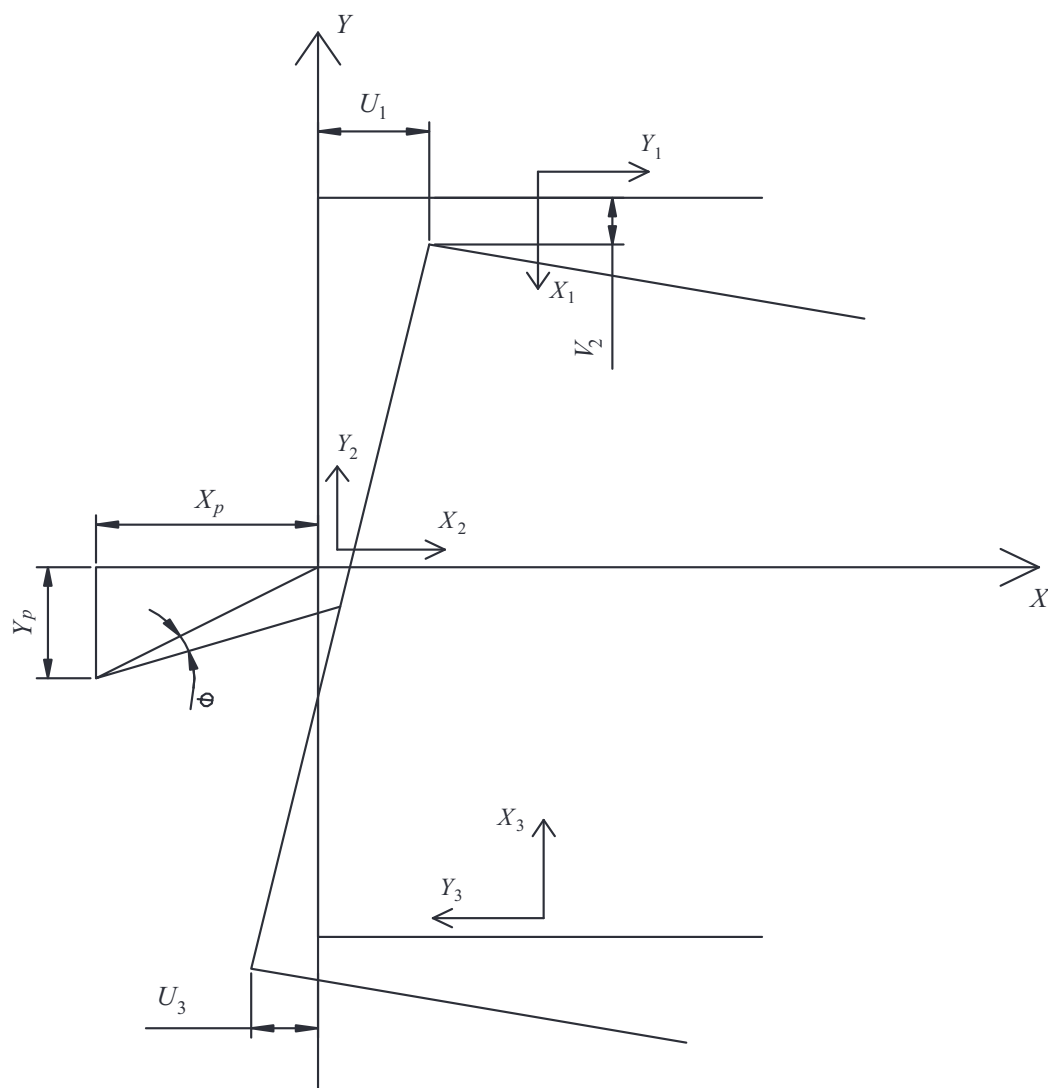
На рисунке приняты следующие обозначения: X, Y – глобальные оси балки; $X_1, Y_1, X_2, Y_2, X_3, Y_3$ – локальные оси пластин, пронумерованных 1, 2, 3 соответственно; X_p, Y_p – координаты центра кручения; φ – угол поворота поперечного сечения вокруг центра кручения; U_1, V_2, U_3 – поступательные перемещения элементов поперечного сечения.

Из геометрических соображений выразим эти поступательные перемещения через координаты центра кручения (X_p, Y_p) и функцию угла закручивания $\varphi(Z)$ (Z – продольная ось балки):

$$U_1 = \left(\frac{H}{2} - Y_p \right) \cdot \varphi(Z),$$

$$V_2 = X_p \cdot \varphi(Z),$$

$$U_3 = \left(\frac{H}{2} + Y_p \right) \cdot \varphi(Z).$$



Поперечное сечение рассматриваемой балки

Далее будем рассматривать каждую пластинку отдельно, характеризуя их свойства в локальной системе координат.

Деформацию каждого элемента можно описать следующими линейными функциями:

$$\varepsilon_{z1} = a_1 + b_1 \cdot Y_1,$$

$$\varepsilon_{z2} = a_2 + b_2 \cdot Y_2,$$

$$\varepsilon_{z3} = a_3 + b_3 \cdot Y_3,$$

где a_i – значение продольной деформации в начале координат; b_i – тангенс угла наклона функции к местной оси Y_i .

В итоге при наличии n пластинок получаем (в данном случае 3) $2n$ неизвестных описывающих функции деформаций и 3 неизвестных для описания перемещения поперечного сечения. Всего задача содержит $2n + 3$ неизвестных.

Учитывая, что любые три элемента сопрягаются по двум граням, получаем $n - 1$ уравнение совместности деформаций.

От уравнений деформаций легко перейти к уравнениям напряжений (закон Гука)

$$\sigma_{z1} = E(a_1 + b_1 \cdot Y_1),$$

$$\sigma_{z2} = E(a_2 + b_2 \cdot Y_2), \quad (1)$$

$$\sigma_{z3} = E(a_3 + b_3 \cdot Y_3).$$

Из связи напряжений и деформаций (1) находим величины изгибающих моментов в своей плоскости в каждом отдельном элементе:

$$M_1 = t \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_{z1} \cdot Y dY = \frac{t \cdot B^3 \cdot E \cdot b_1}{12} = EI_1 b_1,$$

$$M_2 = t \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \sigma_{z2} \cdot Y dY = \frac{t \cdot H^3 \cdot E \cdot b_2}{12} = EI_2 b_2,$$

$$M_3 = t \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_{z3} \cdot Y dY = \frac{t \cdot B^3 \cdot E \cdot b_3}{12} = EI_3 b_3.$$

Связь между значениями моментов и перемещений вида $\frac{M}{EI} = -V''(x, z)$ дает нам еще n уравнений, из которых находятся следующие величины:

$$b_1 = \frac{\frac{d^2 \varphi(Z)}{dZ^2} \cdot (H - 2Y_p)}{2},$$

$$b_2 = \frac{d^2 \varphi(Z)}{dZ^2} \cdot X_p, \quad (2)$$

$$b_3 = \frac{\frac{d^2 \varphi(Z)}{dZ^2} \cdot (H + 2Y_p)}{2}.$$

Уравнения связи между продольными деформациями в местах сопряжения выглядят так:

$$\varepsilon_{z1}^k = a_1 + b_1 \cdot \left(\frac{-B}{2} \right) = a_2 + b_2 \cdot \frac{H}{2} = \varepsilon_{z2}^H,$$

$$\varepsilon_{z2}^k = a_2 + b_2 \cdot \left(\frac{-H}{2} \right) = a_3 + b_3 \cdot \frac{B}{2} = \varepsilon_{z3}^H.$$

Добавляя к ним общее уравнение равновесия

$$N = t \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_{z1} dY + t \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \sigma_{z2} dY + t \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_{z3} dY = 0,$$

получаем систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов, решая которую получаем

$$a_1 = \frac{H \frac{d^2 \varphi(Z)}{dZ^2} \cdot (2 \cdot B^2 + B \cdot H + 4 \cdot B \cdot X_p - 4 \cdot (2 \cdot B + H) \frac{-2 \cdot B \cdot Y_p + 2 \cdot H \cdot X_p}{4 \cdot (2 \cdot B + H)})}{4 \cdot (2 \cdot B + H)},$$

$$a_2 = \frac{B^2 \cdot Y_p \frac{d^2 \varphi(Z)}{dZ^2}}{2 \cdot B + H},$$

$$a_3 = \frac{H \frac{d^2 \varphi(Z)}{dZ^2} \cdot (2 \cdot B^2 + B \cdot H + 4 \cdot B \cdot X_p - 4 \cdot (2 \cdot B + H) \frac{-2 \cdot B \cdot Y_p + 2 \cdot H \cdot X_p}{4 \cdot (2 \cdot B + H)})}{4 \cdot (2 \cdot B + H)}.$$

Используя другие уравнения равновесия, $M_x = 0$, $M_y = 0$, определим координаты центра кручения:

$$X_p = -\frac{3B^2}{6B + H},$$

$$Y_p = 0.$$

Подставив их в уравнение (2), окончательно запишем коэффициенты уравнений деформаций в виде

$$b_1 = \frac{H \frac{d^2 \varphi(Z)}{dZ^2}}{2}, \quad b_2 = \frac{3B^2 \frac{d^2 \varphi(Z)}{dZ^2}}{6B + H},$$

$$b_3 = \frac{H \frac{d^2 \varphi(Z)}{dZ^2}}{2}, \quad a_1 = \frac{B \cdot H^2 \frac{d^2 \varphi(Z)}{dZ^2}}{24B + 4H}, \quad (3)$$

$$a_2 = 0, \quad a_3 = \frac{B \cdot H^2 \frac{d^2 \varphi(Z)}{dZ^2}}{24B + 4H}.$$

Подставив полученные значения (3) в функцию нормальных напряжений, из дифференциальных уравнений равновесия можно найти выражение для касательных напряжений

$$\frac{\partial \sigma_{zi}}{\partial Z} + \frac{\partial \tau_{zyi}}{\partial Y} = 0, \quad \tau_{zyi} = - \int \frac{\partial \sigma_{zi}}{\partial Z} \cdot dY + \tau_{0i}. \quad (4)$$

Функцию τ_{0i} определим из граничных условий. В данном случае граничным условием для крайних пластин будет горизонтальная составляющая внешних сил на свободной грани. Для промежуточных пластин должно соблюдаться условие равенства касательных напряжений вдоль их границы

$$\begin{aligned} \tau_{zy1} \left(\frac{B}{2}, Z \right) &= 0, \\ \tau_{zy1} \left(\frac{-B}{2}, Z \right) &= \tau_{zy2} \left(\frac{H}{2}, Z \right), \\ \tau_{zy3} \left(\frac{-B}{2}, Z \right) &= 0. \end{aligned}$$

Интегрируя касательные напряжения, получим в каждом элементе поперечные силы

$$Q_1 = t \int_{\frac{-B}{2}}^{\frac{B}{2}} \tau_{zy1} dY.$$

Запишем сумму моментов от этих сил относительно центра кручения:

$$\begin{aligned} M_Z &= Q_1 \cdot \left(\frac{H}{2} - Y_p \right) + Q_2 \cdot X_p + \\ &+ Q_3 \cdot \left(\frac{H}{2} + Y_p \right). \end{aligned}$$

Сумма внутренних моментов по каждой пластинке при свободном кручении равна

$$M_{св} = GI_d \cdot \left(\frac{d}{dZ} \varphi(Z) \right).$$

В сумме эти два момента дадут внешний крутящий момент:

$$M_Z + M_{св} = M_{кр},$$

или

$$\begin{aligned} \frac{B^3 \cdot E \cdot t \cdot H^2 \cdot (2H + 3B)}{72B + 12H} \frac{d^3 \varphi(z)}{dZ^3} + \\ + GI_d \cdot \left(\frac{d\varphi(z)}{dZ} \right) = M_{кр}. \end{aligned} \quad (5)$$

Решив дифференциальное уравнение третьего порядка (5), определим функцию угла закручивания с тремя постоянными интегрирования. Полученное решение первого цикла повторяет решение В. З. Власова.

Из граничных условий найдем эти постоянные, учитывая, что

1) угол поворота в заделке $\varphi(0) = 0$;

2) первая производная в месте заделки также равна «0», так как на бесконечно малом расстоянии от заделки угол не изменится: $\varphi'(0) = 0$;

3) вторая производная при $z = l$ (свободный конец балки) также равна «0», ибо в данной точке отсутствуют нормальные напряжения: $\varphi''(L) = 0$.

Применение метода итераций к расчету тонкостенных стержней открытого профиля

Зная значения всех неизвестных, можем записать функцию нормальных продольных напряжений, полученных на первом этапе итерационного процесса. Затем из дифференциальных уравнений равновесия по (4) для касательных напряжений имеем

$$\tau_{yz,i}^{(1)}(y, z) = - \int \frac{\partial \sigma_{z,i}^{(1)}(y, z)}{\partial z} \cdot dy + \tau_{0,i}(z). \quad (6)$$

Аналогично из уравнений равновесия касательных и нормальных напряжений определим функцию $\sigma_{y,i}^{(1)}$:

$$\frac{\partial \sigma_{y,i}^{(1)}(y, z)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz,i}^{(1)}(y, z)}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

$$\sigma_{y,i}^{(1)}(y, z) = - \int \frac{\partial \tau_{yz,i}^{(1)}(y, z)}{\partial z} \cdot dy + \sigma_{y0,i}(z).$$

Функция $\sigma_{y,0,i}(z)$ находится из граничных условий. В данном случае граничным условием для крайних пластин будет нормальная составляющая внешних сил на свободной грани балки. Для промежуточных пластин должно соблюдаться условие равенства нормальных напряжений на их границе.

В начале второго цикла по обобщенному закону Гука получим функцию деформаций вдоль оси Y , $\varepsilon_{y,i}^{(2)}$:

$$\varepsilon_{y,i}^{(2)}(y, z) = \frac{1}{E_i} \cdot (\sigma_{y,i}^{(1)}(y, z) + \mu_i \cdot \sigma_{z,i}^{(1)}(y, z)). \quad (8)$$

Зная функцию деформации $\varepsilon_{y,i}^{(2)}(y, z)$, можно найти соответствующую функцию перемещения $V_i^{(2)}(y, z)$, пользуясь уравнением связи между деформациями и перемещениями:

$$V_i^{(2)}(y, z) = \int_h \varepsilon_{y,i}^{(2)}(y, z) \cdot dy + V_{0,i}(z). \quad (9)$$

Далее определим функцию деформации сдвига по закону Гука:

$$\gamma_{yz,i}^{(2)} = \frac{\tau_{yz,i}^{(1)}}{G_i}, \quad (10)$$

$$\text{где } G_i = \frac{E_i}{2(1 + \mu_i)}.$$

Из геометрических уравнений вновь находим функцию продольных деформаций $\varepsilon_{z,i}^{(2)}(y, z)$, но это уже не линейная функция, с которой начинался первый цикл вычислений:

$$\begin{aligned} \gamma_{yz,i}^{(2)} &= \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z}, \\ \frac{\partial \gamma_{yz,i}^{(2)}}{\partial z} &= \frac{\partial W}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}, \\ \varepsilon_{z,i}^{(2)}(y, z) &= \frac{\partial W}{\partial z} = \\ &= \int \frac{\partial \gamma_{yz,i}^{(2)}}{\partial z} dy + \int \frac{\partial^2 V_i^{(2)}}{\partial z^2} dy + \varepsilon_{0,i}^{(2)}(z). \end{aligned} \quad (11)$$

На этом и последующих этапах продольная деформация уже не соответствует гипотезе плоских сечений, на нее влияют и сдвиговые деформации, определенные на предыдущем этапе.

Зная деформации, по обобщенному закону Гука получим нормальные напряжения второго цикла

$$\sigma_{z,i}^{(2)}(y, z) = E_i \cdot \frac{\varepsilon_{z,i}^{(2)}(y, z) + \mu \varepsilon_{y,i}^{(2)}(y, z)}{(1 - \mu_i^2)}. \quad (12)$$

Функции $\varepsilon_{0,i}^{(2)}(z)$ и $V_{0,i}^{(2)}(z)$ находим из условия статического равновесия.

Функция $\sigma_{z,i}^{(2)}$ становится более высокого порядка и имеет вид параболы пятой степени, что объясняется влиянием касательных и поперечных напряжений. По аналогичной процедуре можно провести уточнение напряженного состояния балки на последующих этапах итерации. Значения нормальных напряжений продольного направления $\sigma_{z,i}^{(2)}(y, z)$ подставляем в (6), и аналогичным образом, повторив цикл (6)–(12), находим нормальные напряжения третьего цикла.

Заключение

Решение задачи стесненного кручения тонкостенного стержня открытого профиля с использованием метода итераций хорошо согласуется с известными решениями В.З. Власова. В таком решении отсутствуют понятия секториальных геометрических характеристик, не применяется понятие бимоента. На первом цикле получено решение для каждого элемента стержня, как для обычного стержня в сопротивлении материалов [10–13], – нормальные напряжения распределяются линейно, касательные – по квадратной параболе. Это решение принимается за основу следующих циклов итераций, что далее позволяет усложнять алгоритм, рассматривать слоистые и анизотропные материалы конструкций [14, 15]. Также метод итераций дает возможность учитывать деформации сдвигов. В зависимости от

количества циклов можно получать результаты напряженно-деформированного состояния в виде полиномов более высокой степени, что повышает точность решения.

Библиографический список

1. Аллахвердов Б. М. Итерационный метод расчета балок с изменяющимися по высоте характеристиками / Б. М. Аллахвердов // Исследования по механике материалов и конструкций : сб. науч. ст. – СПб. : ПГУПС, 2002. – С. 30–34. Деп. ВИНТИ. № 1400-B2002.
2. Полинкевич К. Ю. Итерационный способ расчета слоистых балок на прочность / К. Ю. Полинкевич // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – 2013. – Вып. 2 (35). – С. 148–153.
3. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни / В. З. Власов. – М. : Стройиздат, 1959. – 568 с.
4. Уманский А. А. Кручение и изгиб тонкостенных авиаконструкций / А. А. Уманский. – М. : Оборонгиз, 1959. – 112 с.
5. Сливкер В. И. Строительная механика. Вариационные основы : учеб. пособие / В. И. Сливкер. – М. : Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2005. – 736 с.
6. Горбунов Б. Н. Теория рам из тонкостенных стержней / Б. Н. Горбунов, А. И. Стрельбицкая. – М. : Гостехиздат, 1948. – 198 с.
7. Бычков Д. В. Расчет балочных и рамных стержневых систем из тонкостенных элементов / Д. В. Бычков. – М. : Госстройиздат, 1948. – 208 с.
8. Карякин Н. И. Основы расчета тонкостенных конструкций (прочность, устойчивость и колебания) / Н. И. Карякин. – М. : Высшая школа, 1960. – 239 с.
9. Джанелидзе Г. Ю. Статика упругих тонкостенных стержней / Г. Ю. Джанелидзе, Я. Г. Пановко. – М. : Гостехиздат, 1948. – 208 с.
10. Попов А. А. Сопротивление материалов (теория и задачи) / А. А. Попов. – М. : Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1956. – 476 с.
11. Тимошенко С. П. Об устойчивости плоской формы изгиба двутавровой балки / С. П. Тимошенко // Изв. С.-Петерб. политех. ин-та. – 1905. – Т. 4. – Вып. 3–4.

12. Филоненко-Бородич М. М. Теория упругости / М. М. Филоненко-Бородич. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. – 364 с.

13. Филин А. П. Прикладная механика твердого деформируемого тела : в 2 т. Т. II / А. П. Филин. – М. : Наука, 1978. – 616 с.

14. Аллахвердов Б. М. Итерационный способ расчета анизотропной балки на прочность / Б. М. Аллахвердов, К. Ю. Полинкевич // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – 2014. – Вып. 2 (39). – С. 73–79.

15. Аллахвердов Б. М. Итерационный способ расчета тонкостенных анизотропных стержней открытого профиля на кручение / Б. М. Аллахвердов, К. Ю. Полинкевич // Междунар. науч.-исслед. журнал. – Екатеринбург : Полиграфист, 2017. – Вып. 1 (55). – С. 12–18.

References

1. Allakhverdov B. M. Iteratsionniy metod rascheta balok s izmenyayushymysya po vysote kharakteristikamy [Iterative calculating method of beams with height alternating characteristics]. *Issledovaniya po mekhanike materialov i konstruktsey* [The study on materials and structural mechanics. Coll. Papers]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2002, vol. 12, pp. 30–34. Dep. VINITI, no. 1400-V2002. (In Russian)
2. Polynkevich K. Y. Iteratsionniy sposob rascheta sloistikh balok na prochnost [Iterative calculating method of laminated beams strength]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, issue 2 (35), pp. 148–153. (In Russian)
3. Vlasov V. Z. *Tonkostenniye uprugkiye sterzhny* [Thin-walled elastic bars]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1959, 568 p. (In Russian)
4. Umanskiy A. A. *Krucheniye i izgib tonkostennykh aviakonstruktsiy* [Torsion and bending of thin-walled aviation constructions]. Moscow, Oborongiz Publ., 1959, 112 p. (In Russian)
5. Slyvker V. I. *Stroitel'naya mekhanika. Varyatsionnye osnovy* [Structural mechanics. Variation basics]. Moscow, Assosiation of architectural institutes of higher education Publ., 2005, 736 p. (In Russian)

6. Gorbunov B. N. & Strelbitskaya A. I. *Teoriya ram iz tonkostennykh sterzhney* [Theory of frames made of thin-walled bars]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1948, 198 p. (In Russian)
7. Bychkov D. V. *Raschet balochnykh i ramnykh sterzhnevnykh sistem iz tonkostennykh elementov* [Calculation of braced and framed bar systems made of thin-walled elements]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1948, 208 p. (In Russian)
8. Karyakyn N. I. *Osnovy rascheta tonkostennykh konstruktsiy (prochnost, ustoichivost i kolebaniya)* [Thin-walled structures principles of design (strength, stability, oscillations)]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1960, 239 p. (In Russian)
9. Dzhaneldze G. Y. & Panovko Y. G. *Statyka uprugykh tonkostennykh sterzhney* [Elastic thin-walled bars statics]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1948, 208 p. (In Russian)
10. Popov A. A. *Soprotivleniye materialov (teoriya i zadachy)* [Strength of materials (theory and tasks)]. Moscow, State scientific and technical publishing house of machine building literature, 1956, 476 p. (In Russian)
11. Tymoshenko S. P. *Ob ustoychivosti ploskoy formy izgyba dvutavrovoy balky* [On stability of flatness of flanged beam bending]. *Proceedings of Saint Petersburg Polytechnical Transport University*, 1905, vol. 4, no. 3–4, pp. 151–219. (In Russian)
12. Philonenko-Borodich M. M. *Teoriya uprugosti* [The theory of elasticity]. Moscow, State publishing house of physico-mathematical literature, 1959, 364 p. (In Russian)
13. Phylin A. P. *Prykladnaya mekhanika tverdogo deformiruyemogo tela* [Applied mechanics of solid deformable body]. In 2 vol. Moscow, Nauka Publ., 1978, vol. II, 616 p. (In Russian)
14. Allakhverdov B. M. & Polynkevych K. Y. *Iteratsionniy sposob rascheta anizotropnoy balky na prochnost* [Iterative calculating method of anisotropic beam stability]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, issue 2 (39), pp. 73–79. (In Russian)
15. Allakhverdov B. M. & Polynkevych K. Y. *Iteratsionniy sposob rascheta tonkostennykh anizotropnykh sterzhney otkrytogo profilya na krucheniye* [Iterative calculating method of open profile thin-walled anisotropic beams torsion]. *International Research Journal*. Yekaterinburg, LLC “POLYGRAPHYST Company”, 2017, issue 1 (55), pp. 12–18. (In Russian)

ПОЛИНКЕВИЧ Константин Юрьевич – аспирант, 110237@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.04:519.2

В. Г. Себешев**РАСЧЕТЫ НАДЕЖНОСТИ СООРУЖЕНИЙ
И КОНСТРУКЦИЙ ПО ПОЛИКРИТЕРИАЛЬНЫМ
И ОБОБЩЕННЫМ УСЛОВИЯМ БЕЗОТКАЗНОСТИ**

Дата поступления: 06.12.2016

Решение о публикации: 13.03.2017

Цель: Разработка метода решения прямых и обратных задач теории надежности строительных конструкций и сооружений в форме, позволяющей реализовывать в практических инженерных расчетах концепцию единого интегрального показателя надежности, учитывающего многочисленные поликритериальные условия безотказности. **Методы:** Используются аналитические и численные методы вероятностных расчетов конструкций и оценки суммарной вероятности отказа строительной системы. **Результаты:** Показана возможность перехода от развернутой системы частных условий к обобщенным показателям надежности с ранжированием определенных групп расчетных параметров по их вероятностным свойствам и влиянию на характеристики надежности. Предложен метод определения и использования обобщенных показателей вероятности отказа/надежности, основанный на преобразовании в безразмерную форму условий расчетных предельных состояний, соответствующих совокупности качественно различных критериев безотказности. Сформулированы критерии возможного исключения условий работоспособности, незначимых по влиянию на общую оценку надежности, на основе анализа частных индексов надежности и коэффициентов приближенности к расчетным предельным состояниям. Изложены методики и алгоритмы решения прямых и обратных (проектных) задач расчета надежности конструкций. **Практическая значимость:** Разработанный подход позволяет обосновать введение и использование нормируемых (требуемых) показателей надежности, единых для строительной системы (сооружения, конструкции) в целом.

Ключевые слова: Надежность, вероятность отказа, функция работоспособности, индекс надежности, коэффициент нагруженности, обобщенный нагрузочный эффект, обобщенное сопротивление, требуемая надежность.

Vladimir G. Sebeshev, Cand. Sci., professor, sebeshev@sibstrin.ru (Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)) BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS RELIABILITY ANALYSIS BY MEANS OF POLYCRITERION AND GENERALIZED SERVICEABILITY REQUIREMENTS

Objective: To develop problem-solving method for direct and inverse problems of building structures and constructions reliability theory, in a way which makes it possible to implement unitary integral reliability index approach in practical engineering calculations allowing for numerous polycriterion non-failure operation conditions. **Methods:** Analytical and numerical methods of probabilistic structural calculations and estimation of building systems probability of failure were used. **Results:** Transition from full-scale system of partial limit state conditions to overall reliability indices was shown, with ranking of certain rating groups by means of their probabilistic properties and their influence on reliability characteristics. The method of estimation and application of generalized probability of failure/reliability indices was suggested, based on transformation in dimensionless form of limit states conditions, which correspond to the set of non-failure operation criteria different by quality. The criteria

of possible elimination of serviceability requirements were stated on the basis of partial reliability indices and proximity coefficients to design limit states, which do not influence the general reliability estimation. Methods and algorithms of direct and inverse (design) problems of construction reliability calculations were stated. **Practical importance:** The developed approach makes it possible to explain the implication and use of normalized (required) reliability, common for building system (constructions, structures) in general.

Keywords: Reliability, probability of failure, serviceability function, reliability index, load level coefficient, generalized load effect, generalized resistance, target reliability.

Введение

Вступившие в силу российские законодательно-нормативные документы [1, 2] определяют перспективу внедрения в проектную и экспертную практику вероятностных методов расчета сооружений и строительных конструкций для оценок, прогнозирования и обеспечения их механической надежности. С учетом реализованного в Eurocodes опыта нормирования общих показателей надежности (target reliability indexes) [3–5], требований американских стандартов ASCE/SEI [6], а также рекомендаций отечественных специалистов [7–9] очевидна актуальность разработки прикладных методик и технологий расчетов надежности сооружений и конструкций, в том числе по нормативным характеристикам. При этом существует потребность в создании рациональных способов и алгоритмов учета разнообразных критериев работоспособности строительных систем, с многочисленными выражающими их условиями безотказности (ненаступления расчетных предельных состояний), в общем показателе надежности.

Основные положения

Общепринятым в теории надежности подходом к описанию работоспособного (безотказного) по механическим признакам состояния сооружения/конструкции является формирование и использование системы условий безотказности, отражающих основные критерии ненаступления опасных для объекта случайных по своей природе событий, системное истолкование принципиального со-

держания которых дано в методе расчетных предельных состояний. Само по себе количество этих критериев сравнительно невелико (прочность, жесткость, устойчивость и некоторые другие), но применяться они должны к многочисленным различным объектам (всему сооружению, его частям, элементам, сечениям, точкам).

Для построения исходной системы из m условий работоспособности может быть полезным формирование «дерева рисков», структурно-графически представляющего совокупность потенциальных причин возникновения различных по смыслу предельных состояний (отказов) – на рис. 1 изображена его примерная модель, которая допускает расширение за счет дополнительных требований, например по длительной или усталостной прочности, прогрессирующему разрушению, прочности узлов и соединительных элементов и др. Конечно, вместо графической интерпретации системы рисков возможно ее табличное или иное описание, но в любом случае очевидно большое количество m условий работоспособности для многоэлементной конструкции, причем с разным влиянием на итоговую вероятность отказа. Желательно обоснованное исключение некоторых из них, не значимых по влиянию на общую надежность, а также обобщение по определенным группам (в частности, по разным критериям, видам параметров и т.п.) – таким образом можно существенно упростить выполнение вероятностных расчетов в решениях задач надежности.

Условие ненаступления некоторого j -го расчетного предельного состояния (частное условие безотказности) представляется в виде

$$\tilde{Q}_j < \tilde{R}_j \text{ или } \tilde{S}_j = \tilde{R}_j - \tilde{Q}_j > 0, \quad (1)$$

где $\tilde{Q}_j$, $\tilde{R}_j$ и $\tilde{S}_j$ – нагрузочный фактор/эффект (параметр воздействия, усилие, напряжение, перемещение и др.), сопротивление (предельная нагрузка или усилие, прочностная характеристика материала, допустимое перемещение и др.) и резерв работоспособности по j -му условию; « $\sim$ » – символ случайной величины, по [10].

Вероятности отказов по условиям (1)

$$P_{fj} = \int_{-\infty}^0 p_{Sj}(S_j) dS_j$$

(здесь $p_{Sj}(S_j)$ – плотность распределения j -го резерва работоспособности) принято вычислять по соответствующим частным индексам надежности (характеристикам безопасности [10])

$$\beta_j = \frac{\bar{S}_j}{\hat{S}_j} =$$

$$= \frac{\bar{S}_j}{\hat{S}_j} = \frac{\bar{R}_j - \bar{Q}_j}{\sqrt{\bar{R}_j + \bar{Q}_j - 2\hat{R}_j \hat{Q}_j r_{R_j Q_j}}} = \frac{1}{A_{S_j}}, \quad (2)$$

где

$$A_{S_j} = (1 - \xi_j)^{-1} \times$$

$$\times \sqrt{A_{R_j}^2 + (\xi_j A_{Q_j})^2 - 2\xi_j A_{R_j} A_{Q_j} r_{R_j Q_j}} -$$

коэффициент вариации (КВ) частного резерва работоспособности; $\xi_j = \bar{Q}_j / \bar{R}_j$ – коэффициент нагруженности (приближения к предельному состоянию); $A_{R_j} = \hat{R}_j / \bar{R}_j$ и $A_{Q_j} = \hat{Q}_j / \bar{Q}_j$ – КВ сопротивления и нагрузочного фактора; символами « $\bar{}$ », « $\hat{}$ », « $\wedge$ » обозначены, как в [10], математические ожидания (МО), дисперсии и среднеквадратичные отклонения (стандарты) случайных величин; $r_{R_j Q_j}$ – коэффициент/индекс корреляции $\hat{R}_j$ и $\hat{Q}_j$.

Зависимости $P_{fj} = \Phi_j(\beta_j)$ в [11] предложено аппроксимировать при нормальном распределении $p_{Sj}(S_j)$ выражением, обеспечивающим

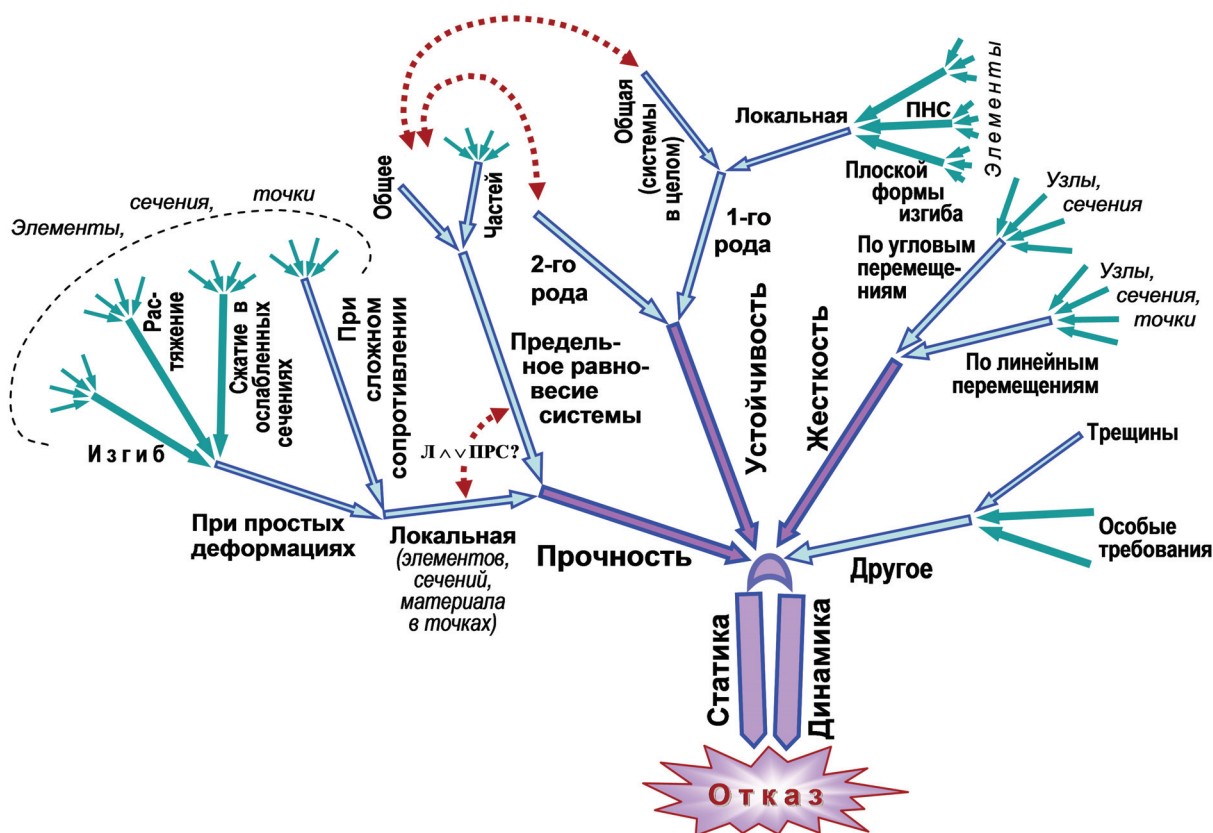


Рис. 1. Модель «дерева рисков»

хорошую точность в диапазоне реальных значений вероятностей отказа $10^{-7} < P_{ff} < 10^{-3}$:

$$P_{ff} = 10^{-(0,23\beta_j^2 + 0,8)} \quad (3)$$

Общая вероятность отказа по всей системе поликритериальных условий (1) определяется (с пренебрежимо малым завышением) суммированием частных вероятностей:

$$P_f \approx \sum_{j=1}^m P_{ff}.$$

Общему показателю P_f формально соответствует обобщенный индекс надежности β_0 , который при использовании описания $P_f = \Phi_0(\varphi_0)$, аналогичного (3), вычисляется по формуле

$$\beta_0 = \sqrt{-4,3478 \lg \sum_{j=1}^m 10^{-\varphi_j(\beta_j)} - 3,4783}, \quad (4)$$

в которой $\varphi_j(\beta_j)$ в предположении о нормальном распределении j -го частного резерва работоспособности – как в (3); для других законов распределения $p_{Sj}(S_j)$ возможны иные аппроксимации $\varphi_j(\beta_j)$.

Частные индексы надежности β_j ($j = \overline{1, m}$) находим подстановкой в (2) выражения коэффициента вариации A_{Sj} , полученного методом статистической линеаризации [12] в представляющем практический интерес случае слабой стохастической связи расчетных параметров $\tilde{X}$ сооружения/конструкции:

$$\beta_j = \frac{1 - \xi_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_{XRj}} (\rho'_{ji} \cdot A_{x_{Rj,i}})^2 + \xi_j^2 \sum_{i=1}^{n_{XQj}} (\Theta'_{ji} \cdot A_{x_{Qj,i}})^2 - 2\xi_j r_{RjQj} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{XRj}} (\rho'_{ji} \cdot A_{x_{Rj,i}})^2 \times \sum_{i=1}^{n_{XQj}} (\Theta'_{ji} \cdot A_{x_{Qj,i}})^2}}}}, \quad (5)$$

где $A_{x_{Rj,i}}$, $A_{x_{Qj,i}}$ – КВ величин $\tilde{x}_{Rj,i}$, $\tilde{x}_{Qj,i}$ – элементов векторов $\tilde{X}_{Rj}$ и $\tilde{X}_{Qj}$ расчетных параметров сооружения/конструкции, от которых зависят соответственно сопротивление $\tilde{R}_j$ и нагрузочный фактор $\tilde{Q}_j$; смысл множителей ρ'_{ji} и Θ'_{ji} будет раскрыт далее.

В более общем виде формула для β_j выведена в [11]. Заметим, что при удачном смысловом выборе $\tilde{R}_j$ и $\tilde{Q}_j$ они могут быть статистически независимыми или слабо коррелированными, тогда $r_{RjQj} = 0$, что упрощает вычисление β_j по (7). Дополнительный выигрыш дают замена вектора расчетных случайных величин $\tilde{X} = \{\tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \dots \tilde{x}_i \dots \tilde{x}_n\}$ его безразмерным аналогом

$$\tilde{\chi} = \{\tilde{\chi}_1 \tilde{\chi}_2 \dots \tilde{\chi}_i \dots \tilde{\chi}_n\} = \{\tilde{x}_1 / \bar{x}_1 \tilde{x}_2 / \bar{x}_2 \dots \tilde{x}_i / \bar{x}_i \dots \tilde{x}_n / \bar{x}_n\} \quad (6)$$

(примечание: для элементов, у которых $\bar{x}_i = 0$, принимается $\tilde{\chi}_i = \tilde{x}_i / \hat{x}_i$), а также введение в рассмотрение относительных сопротивления и нагрузочного фактора

$$\tilde{\rho}_j = \tilde{R}_j / \bar{R}_j, \quad \tilde{\Theta}_j = \tilde{Q}_j / \bar{Q}_j. \quad (7)$$

Безразмерные $\tilde{\chi}_i$ ($i = \overline{1, n}$), $\tilde{\rho}_j$ и $\tilde{\Theta}_j$ имеют МО, равные 1, и такие же КВ, как у соответствующих размерных параметров (исключение – величины, упомянутые выше в примечании; для них $\bar{\chi}_i = 0$, а КВ формально принимается равным 1).

Использование (6) и (7) дает в формуле (5) следующие выражения множителей при коэффициентах вариации:

$$\rho'_{ji} = \partial \rho_j / \partial \chi_{Rj,i} \Big|_{\chi_{Rj} = \bar{\chi}_{Rj}}, \quad \Theta'_{ji} = \partial \Theta_j / \partial \chi_{Qj,i} \Big|_{\chi_{Qj} = \bar{\chi}_{Qj}}, \quad (8)$$

где $\chi_{Rj,i} = x_{Rj,i} / (\bar{x}_{Rj,i} \vee \hat{x}_{Rj,i})$; $\chi_{Qj,i} = x_{Qj,i} / (\bar{x}_{Qj,i} \vee \hat{x}_{Qj,i})$; $\bar{\chi}_{Rj}$, $\bar{\chi}_{Qj}$ – состоящие из 1 и 0 векторы МО относительных расчетных параметров $\tilde{\chi}_{Rj}$ и $\tilde{\chi}_{Qj}$, являющихся аргументами для $\tilde{\rho}_j$ и $\tilde{\Theta}_j$; зависимости $\tilde{\rho}_j = \rho_j(\tilde{\chi}_{Rj})$ и

$\tilde{\Theta}_j = \Theta_j(\tilde{\chi}_{Q_j})$ получаются преобразованием исходных выражений $\tilde{R}_j = R_j(\tilde{X}_{R_j})$ и $\tilde{Q}_j = Q_j(\tilde{X}_{Q_j})$.

Вычисление производных в (8) в безразмерной форме значительно упрощает вероятностный расчет как в аналитическом виде, так и в компьютерных реализациях. МО $\bar{Q}_j$ и $\bar{R}_j$, необходимые для определения коэффициентов нагруженности β_j и «весовых коэффициентов» ρ'_{ji} и Θ'_{ji} при отыскании β_j , находятся по результатам обязательного расчета сооружения (конструкции) при МО входных параметров задачи.

По аналогии с основной зависимостью (4) можно ввести выражение для вычисления групповых индексов надежности (обобщенных по некоторым группам условий безотказности)

$$\beta_{G_k} = \sqrt{-4,3478 \lg \sum_{j=1}^{m_{G_k}} 10^{-\Phi_j(\beta_j)} - 3,4783}, \quad (9)$$

где G_k – номер k -й группы расчетных условий; m_{G_k} – количество условий в группе.

В частности, целесообразно отыскание групповых индексов, соответствующих трем основным критериям работоспособности, трактуемым как обобщенные условия безотказности, – по прочности, устойчивости, жесткости и «другим» (рис. 1): $\beta_{G_1} \equiv \beta_{\text{проч}}$, $\beta_{G_2} \equiv \beta_{\text{уст}}$, $\beta_{G_3} \equiv \beta_{\text{жест}}$, $\beta_{G_4} \equiv \beta_{\text{друг}}$; им отвечают вероятности отказов $P_{f, \text{проч}}$, $P_{f, \text{уст}}$, $P_{f, \text{жест}}$ и $P_{f, \text{друг}}$, суммирование которых дает общую вероятность отказа системы P_f . Кроме того, возможно многоуровневое обобщение индексов надежности и соответствующих им вероятностей отказов, например внутри вышеуказанных групп – по подгруппам (по прочности различных элементов и их сечений при изгибе, растяжении/сжатии, сложном сопротивлении; по устойчивости при разных типах равновесных состояний; по вариантам сочетаний воздействий и т. д.). Использование обобщенных показателей по-

зволяет оценивать вклады различных групп расчетных условий работоспособности в общую характеристику надежности.

По общему для системы в целом индексу надежности (4) и групповым индексам (9) получены критерии, позволяющие исключать из рассмотрения совокупность условий безотказности (из общего количества m) или в пределах некоторой группы G_k , дающих суммарный вклад в обобщенные показатели вероятностей отказа P_f или P_{f, G_k} не более 3%: можно пренебрегать условиями, для которых

$$\beta_j > \beta_{\min} + \lg m + 1, \quad (10)$$

$$\beta_j^{(G_k)} > \beta_{\min}^{(G_k)} + \lg m_{G_k} + 1,$$

где $\beta_{\min} = \min \beta_j$ (по всем m условиям); $\beta_{\min}^{(G_k)} = \min \beta_j^{(G_k)}$ (в группе G_k).

Поскольку индексы β_j , согласно (2), существенно зависят от коэффициентов нагруженности ξ_j (соответственно $\beta_j^{(G_k)}$ – от $\xi_j^{(G_k)}$), то оценивать возможность игнорирования некоторых исходных условий безотказности можно сразу после выполнения расчета объекта при МО входных параметров, по значениям коэффициентов ξ_j или $\xi_j^{(G_k)}$: с достаточной уверенностью предлагается пренебрежение условиями, по которым $\xi_j < (0,7-0,75) \xi_{\max}$; $\xi_j^{(G_k)} < (0,7-0,75) \xi_{\max}^{(G_k)}$ (здесь $\xi_{\max} = \max \xi_j$, $\xi_{\max}^{(G_k)} = \max \xi_j^{(G_k)}$).

Решение прямых задач расчета надежности с использованием обобщенных показателей надежности

В прямых задачах по известным вероятностным характеристикам расчетных параметров отыскиваются общие показатели надежности сооружения/конструкции P_f и $P_s = 1 - P_f$ по определенным критериям работоспособности, с учетом сформированной на их основе системы условий безотказности (1).

Использование изложенных выше положений разработанного метода позволяет:

– определять обобщенный индекс надежности β_0 , по нему – P_f и P_s для последующего сравнения с нормативными или рекомендуемыми общими показателями [3–8];

– осуществлять многоуровневое обобщение и ранжирование условий безотказности с «отсеиванием» незначимых из них; перевод части случайных расчетных параметров, мало изменчивых в сравнении с другими, в категорию квазидетерминированных [13];

– снижать трудоемкость вычислительных процедур вероятностных расчетов применением приема обезразмеривания расчетных параметров системы и воздействий и перехода к относительным характеристикам нагрузочного фактора и сопротивления.

Дополнительные упрощения возможны за счет начального укрупнения расчетных параметров (например, можно предварительно определять МО и КВ критической продольной силы сжатого стержневого элемента по стохастическим характеристикам модуля упругости, момента инерции сечения, длины элемента, коэффициента приведения длины; или предельного усилия в сечении, интегрально учитывающего прочностную характеристику материала и размеры по-

перечного сечения и т. п.) – это уменьшает размеры входных случайных векторов.

В качестве иллюстрации представим решение прямой задачи расчета надежности плоской фермы, изображенной на рис. 2, А.

Сечения элементов унифицированы по следующим группам: 1) сжатые стержни 1–4 верхнего пояса; 2) растянутые стержни 6–8 нижнего пояса; 3) все элементы решетки (5, 9, 10–15).

На рис. 2, Б показаны МО продольных сил в стержнях и коэффициенты приближения к предельным состояниям элементов, вычисленные при заданных МО нагрузок, площадей и моментов инерции сечений, а также предела текучести и модуля упругости материала.

Согласно «дереву отказов» (рис. 2, В), расчетные критерии работоспособности – прочность семи растянутых стержней и устойчивость восьми сжатых. Общее количество условий безотказности $m = 15$ (по числу стержней). КВ усилий во всех стержнях $A_{N_j} \equiv A_{Q_j} = 0,12$ ($j = \overline{1, 15}$), сопротивлений – предельных продольных сил при растяжении $A_{R_j} = 0,08$ ($j = 5-9, 11, 14$), критических сил при сжатии $A_{R_j} = 0,06$ ($j = 1-4, 10, 12, 13, 15$).

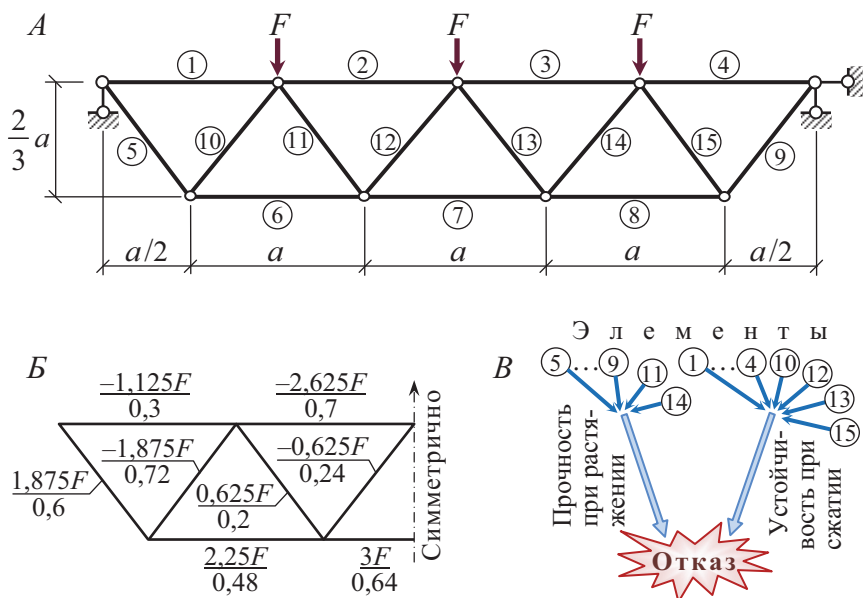


Рис. 2. К решению прямой задачи расчета надежности:

А – расчетная схема; Б – математические ожидания продольных сил в стержнях и коэффициенты ξ_j ; В – «дерево рисков»

В таблице приведены данные для расчета вероятности отказа с учетом симметрии (в МО) фермы и нагрузок. При определении индексов β_j ($j = 1, 15$) применен прием обезразмеривания расчетных параметров.

Суммируя частные вероятности отказов, находим

$$P_f = \sum_{j=1}^{15} P_{fj} = \{0,597 + 2 \cdot [3 \cdot (<10^{-20}) + 1,081 + 2,457 + 0,105 + (<10^{-4})] \cdot 10^{-3} = 7,883 \cdot 10^{-3}.$$

По вышеизложенному методу вычисляем обобщенный индекс надежности β_0 по формуле (4) при $\varphi_j(\beta_j) = 0,23 \beta_j^2 + 0,8$

$$\beta_0 = \sqrt{-4,3478 \cdot \lg [10^{-3,2239} + 2 \cdot (10^{-2,9662} + 10^{-2,6095} + 10^{-3,9768} + 10^{-7,1999})] - 3,4783} = 2,3803$$

и далее определяем общую вероятность отказа

$$P_f = \Phi_0(\beta_0) = 10^{-(0,23\beta_0^2 + 0,8)} = 10^{-2,1032} = 7,885 \cdot 10^{-3},$$

получен тот же результат, что и в расчете по частным условиям.

Обобщенные по двум группам условий – прочности и устойчивости – индексы надежности, найденные по выражению (9): $\beta_{\text{проч}} = 3,1576$, $\beta_{\text{уст}} = 2,4228$, им соответствуют вероятности отказов $P_{f,\text{проч}} = 0,807 \cdot 10^{-3}$, $P_{f,\text{уст}} = 7,078 \cdot 10^{-3}$ – видно, что риск потери устойчивости намного выше, причем доминирующий вклад в общую вероятность отказа вносят опасные по потере устойчивости стержни 10 и 15, для которых $\beta_{10} = \beta_{15} = \beta_{\min} = 2,805$.

По критериям (10) из всех $m = 15$ условий безотказности возможен неучет тех, по которым $\beta_j > \beta_{\min} + \lg m + 1 = 2,805 + \lg 15 + 1 = 4,981$, – это условия 1, 4, 6, 8, 12, 13, 11, 14 (8 из 15). При оценке по двум группам – $\beta_j^{(\text{проч})} > 3,246 + \lg 7 + 1 = 5,091$ и $\beta_j^{(\text{уст})} > 2,805 + \lg 8 + 1 = 4,708$ – «отсеиваются» те же незначимые условия. Аналогичные результаты дает применение более простых критериев оценки по коэффициентам нагруженности ξ_j .

Расчет вероятности отказа фермы по частным индексам надежности

Номера j стержней (условий безотказности)	Количество равнонадежных элементов	Коэффициент нагруженности, ξ_j	КВ резерва, A_{sj}	Индекс надежности, β_j	Вероятность отказа, P_{fj} (по (3))
1, 4 (сж)	2	0,3	0,065299	10,72	$< 10^{-20}$
2, 3 (сж)	2	0,7	0,097755	3,0689	$1,081 \cdot 10^{-3}$
10, 15 (сж)	2	0,72	0,099825	2,8049	$2,457 \cdot 10^{-3}$
12, 13 (сж)	2	0,24	0,057701	13,17	$< 10^{-20}$
5, 9 (раст)	2	0,6	0,107629	3,7165	$0,105 \cdot 10^{-3}$
6, 8 (раст)	2	0,48	0,098579	5,2750	$6,31 \cdot 10^{-8}$
7 (раст)	1	0,64	0,110897	3,2463	$0,597 \cdot 10^{-3}$
11, 14 (раст)	2	0,2	0,083522	9,578	$< 10^{-20}$

Применение обобщенных характеристик надежности в обратных (проектных) задачах

Обратная задача расчета надежности сооружения/конструкции состоит в определении области допустимых значений (ОДЗ) вероятностных характеристик расчетных параметров, обеспечивающих требуемую общую надежность $[P_s]$ (непревышение допустимой вероятности отказа $[P_f]$).

В общей постановке обратная задача формулируется как

$$P_s(\{\bar{X}\}, \{A_X\}) \geq [P_s]$$

или

$$P_f(\{\bar{X}\}, \{A_X\}) < [P_f], \quad (11)$$

где $\{\bar{X}\}$ и $\{A_X\}$ – векторы искомых МО и КВ расчетных параметров (в $\{\bar{X}\}$ могут присутствовать и детерминированные величины с КВ, равными 0).

Взятые со знаком равенства требования (11) определяют граничную гиперповерхность искомой ОДЗ в $2n_X$ -мерном пространстве характеристик $\{\bar{X}\}$ и $\{A_X\}$ (n_X – размерность векторов). Ее точное аналитическое описание затруднительно или вообще невозможно даже при нормальном распределении случайных величин, но применение достаточно удачных аппроксимаций позволяет получить из (11) уравнение границы ОДЗ расчетных параметров в пространстве частных индексов надежности:

$$\lg \sum_{j=1}^m 10^{-\varphi_j(\beta_j)} - \lg [P_f] = 0, \quad (12)$$

где $\varphi_j(\beta_j)$ может приниматься, в частности, как в (4).

Если нормируется не надежность или вероятность отказа, а общий индекс надежности $[\beta_0]$ (как в [4]), то в (12) $\lg [P_f] = -(0,23[\beta_0]^2 + 0,8)$.

Индексы β_j входят в (12) своими выражениями через элементы векторов $\{\bar{X}\}$ и $\{A_X\}$

по (5), но практическое использование полученного таким образом уравнения границы ОДЗ оказывается затруднительным даже при сравнительно небольших количествах параметров (n_X) и расчетных условий безотказности (m) – из-за сложности, а также неединственности решения и необходимости в конечном счете выбирать некоторый приемлемый набор допустимых значений искомых величин, для чего могут быть применены, в частности, оптимизационные процедуры [14, 15].

В имеющих практическое значение двух основных постановках обратных задач (подбор требуемых характеристик сечений элементов или определение допускаемых воздействий/нагрузок) рационален следующий алгоритм:

1) по известной $[P_f]$ из (12) определяется требуемое значение частного индекса надежности в предположении наиболее невыгодного по общей надежности, но выигрышного по расходу материала случая равной вероятности отказов по всем m условиям работоспособности:

$$[\beta_j] = 2,085 \sqrt{-\lg [P_f] - 0,8 + \lg m} = \sqrt{[\beta_0]^2 + 4,348 \lg m};$$

2) выбирается одно из условий, содержащее либо одну из подлежащих определению расчетных величин, либо несколько взаимосвязанных (например, площадь $\tilde{A}$ и моменты сопротивления $\tilde{W}_y, \tilde{W}_z$ сечения стержневого конструктивного элемента в условии прочности при пространственной деформации в упругой стадии); из равенства $\beta_j = [\beta_j]$ (здесь β_j – по (5)) получается уравнение, связывающее МО и КВ искомых расчетных (в упомянутом случае $\tilde{A}, \tilde{W}_y, \tilde{W}_z$), решаемое, как правило, подбором – последовательными приближениями, причем КВ сначала могут назначаться ориентировочно; удобно вместо (5) использовать (2) с заданным по смыслу коэффициентом A_{Q_j} (A_{R_j} обычно известен), откуда решением квадратного уравнения находится

коэффициент нагруженности ξ_j , далее по ξ_j получаются комбинации искомым МО параметров при соответствующих их КВ;

3) последовательно аналогичным образом используются все расчетные условия безотказности, причем в каждом последующем учитываются уже ранее найденные параметры.

Вследствие округлений «в запас» и дискретности некоторых расчетных величин фактические значения частных вероятностей отказа оказываются меньше допустимых $[P_{ff}]$, соответствующих необходимому $[\beta_j]$. В результате получается экономически невыгодный запас надежности. Поэтому при переходе к расчету по очередному условию безотказности целесообразно уточнять $[\beta_j]$ с учетом вероятностей отказов P_{ff} по уже рассмотренным условиям:

$$[\beta_j^-] = 2,085 \times \sqrt{-\lg \left([P_{ff}] - \sum_{j=1}^{m_p} P_{ff} \right) - 0,8 + \lg(m - m_p)},$$

где m_p – количество ранее использованных условий.

Заключение

Разработанные метод, способы, алгоритмы и формульный аппарат могут быть реализованы в инженерных проектных и поверочных расчетах надежности сооружений и строительных конструкций с применением обобщенных и нормируемых показателей надежности.

Библиографический список

1. Федеральный закон РФ от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент по безопасности зданий и сооружений». – М., 2010.
2. ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения». – М. : Стандартинформ, 2015. – 13 с.
3. Vrouwenvelder T. Treatment of risk and reliability in the Eurocodes / T. Vrouwenvelder // Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings. – 2008. – Vol. 161, issue SB4 (August). – P. 209–214.
4. European Committee for Standardisation. Eurocode : Basis of Structural Design. – Brussels : Comité Européen de Normalisation, 2002. EN 1990.
5. HSE. Target Level for Reliability-Based Assessment of Offshore Structures during Design and Operation. Offshore Technology Report, ed. H. a. S. E. – UK, London : HSE Books, 2002.
6. Ellingwood B. R. Acceptable risk bases for design of structures / B. R. Ellingwood // Progress in Structural Engineering and Materials. – 2001. – Vol. 3, N 2. – P. 170–179.
7. Raizer V. Reliability of Structures. Analysis and Applications / V. Raizer. – Backbone Publishing Company (USA). – 2009. – 146 p.
8. Райзер В. Д. Теория надежности сооружений / В. Д. Райзер. – М. : Изд-во АСВ, 2010. – 384 с.
9. Лычев А. С. Надежность строительных конструкций / А. С. Лычев. – М. : Изд-во АСВ, 2008. – 184 с.
10. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А. Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.
11. Себешев В. Г. Расчет надежности сооружений и конструкций по обобщенным характеристикам и условиям безотказности / В. Г. Себешев // Изв. вузов. Строительство. – 2016. – № 6. – С. 13–31.
12. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Высшая школа, 1999. – 576 с.
13. Себешев В. Г. Об оценке влияния стохастических свойств расчетных параметров на надежность систем с регуляторами напряженно-деформированного состояния / В. Г. Себешев // Материалы VIII Всерос. науч.-технич. конференции «Актуальные вопросы строительства». – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2015. – С. 3–11.
14. Райзер В. Д. Вероятностная оптимизация уровня надежности сооружений / В. Д. Райзер // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – № 6. – С. 33–39.

15. Гениев Г. А. Вопросы оптимизации расхода материалов в многоэлементных системах с позиций минимальной вероятности их отказа / Г. А. Гениев // Изв. вузов. Строительство. – 2002. – № 1–2. – С. 17–22.

References

1. *Phederalniy zakon ot 30.12.2009 g. № 384-FZ "Tekhnicheskiy reglament po bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy"* [Federal law № 384-FL of 30. 12. 2009 "Regulations on the reliability of buildings and constructions"]. Moscow, 2010. (In Russian)

2. *GOST 27751–2014 "Nadezhnost stroytelnykh konstruksiy i osnovaniy"* [State Standard 27751–2014 "The reliability of building structures and bases"]. Moscow, Stadartinform Publ., 2015, 13 p. (In Russian)

3. Vrouwenvelder T. Treatment of risk and reliability in the Eurocodes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, 2008, vol. 161, issue SB4 (August), pp. 209–214.

4. *European Committee for Standardisation. Eurocode: Basis of Structural Design*. Brussels, Comité Européen de Normalisation Publ., 2002, EN 1990.

5. *HSE. Target Level for Reliability-Based Assessment of Offshore Structures during Design and Operation*. Offshore Technology Report. Ed. by H. a.S. E. UK, London, HSE Books Publ., 2002.

6. Ellingwood B. R. Acceptable risk bases for design of structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2001, vol. 3, no. 2, pp. 170–179.

7. Raizer V. *Reliability of Structures. Analysis and Applications*. USA, Backbone Publishing Company, 2009, 146 p.

8. Raizer V. D. *Teoriya nadezhnosti sooruzheniy* [The theory of structures reliability]. Moscow, ACB Publ., 2010, 384 p. (In Russian)

9. Lychev A. S. *Nadezhnost stroitelnykh konstruksiy* [The reliability of building constructions]. Moscow, ACB Publ., 2008, 184 p. (In Russian)

10. Rzhanytsyn A. R. *Teoriya rascheta stroitelnykh konstruksiy na nadezhnost* [Design theory on the reliability of building constructions]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 239 p. (In Russian)

11. Sebeshev V. G. *Raschet nadezhnosti sooruzheniy i konstruksiy po obobshchennym kharakteristikam i usloviyam bezotkaznosti* [Constructions and buildings reliability analysis by means of generalized characteristics and serviceability requirements]. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2016, no. 6, pp. 13–31. (In Russian)

12. Ventzel Y. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya shkola [Higher school Publ.], 1999, 576 p. (In Russian)

13. Sebeshev V. G. Ob otsenke vliyaniya stokhasticheskikh svoystv raschetnykh parametrov na nadezhnost system s regulyatoramy napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [On impact assessment of stochastic characteristics of design parameters on reliability of systems with stress-strain behavior regulators]. *Materialy VIII Vseros. nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Aktualniye voprosy stroytelstva"* [Proceedings of the VIIIth All-Russian scientific and technical conference "Topical issues of building"]. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin) Publ., 2015, pp. 3–11. (In Russian)

14. Raizer V. D. Veroyatnostnaya optimizatsiya urovnya nadezhnosti sooruzheniy [Stochastic optimization of building reliability level] *Stroytelnaya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural mechanics and analysis of structure], 2008, no. 6, pp. 33–39. (In Russian)

15. Geniyev G. A. Voprosy optymyzatsii raskhoda materialov v mnogoelementnykh sistemakh s pozitsiy minimalnoy veroyatnosti ikh otказа [The issues of material consumption optimization in multiple-unit systems from the perspective of minimum probability of their failure]. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2002, no. 1–2, pp. 17–22. (In Russian)

СЕБЕШЕВ Владимир Григорьевич – канд. техн. наук, профессор, sebeshev@sibstrin.ru (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)).

УДК 504.064.2

Т. С. Титова, Р. Г. Ахтямов, Э. С. Насырова

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА
НА СОСТОЯНИЕ ВОДОЕМОВ В ПРЕДЕЛАХ УРБОЛАНДШАФТА**

Дата поступления: 16.11.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Разработка и научное обоснование набора показателей для оценки влияния антропогенных компонентов урболандшафта (жилищно-коммунальное хозяйство) на состояние водоемов. **Методы:** Анализ литературных данных, метод построения сводной оценки. **Результаты:** Для оценки состояния водоемов в пределах урболандшафта, подверженных негативному воздействию со стороны различных отраслей жилищно-коммунального хозяйства (водоснабжение, водоотведение и энергоснабжение), предложены и обоснованы наборы гидрохимических и гидробиологических показателей качества воды, разделенные на группы по приоритетности и условиям применения. Показатели I приоритета: температура, растворенный кислород, pH, электропроводность, индекс сапробности; II приоритета: перманганатная окисляемость – если не производится сброс производственных сточных вод в водоем, за исключением подогретых вод объектов энергетики; химическое потребление кислорода, концентрация взвешенных веществ, концентрация биогенных элементов ($N_{\text{общ}}$, $P_{\text{общ}}$) – если производится сброс производственных сточных вод в водоем; III приоритета: концентрация загрязняющих веществ. Разработан сводный показатель, включающий в себя предложенные показатели качества воды и позволяющий агрегировать величины показателей разной размерности в единое значение, комплексно оценить состояние водоемов и пригодность для конкретных видов водопользования. **Практическая значимость:** Оценка состояния водоемов в пределах урболандшафта по наборам показателей качества воды и сводному показателю позволит сократить время на проведение лабораторных анализов, увеличить число гидрологических постов и оперативно принять решения по экореабилитации водоемов в пределах урболандшафта, тем самым обеспечив необходимый уровень качества воды.

Ключевые слова: Урболандшафт, жилищно-коммунальное хозяйство, водоем, качество воды, показатель.

Tamila S. Tytova, D. Sci., professor, head of a chair, prorector for education; ***Rasul G. Akhtyamov**, Cand. Sci., associate professor; **Elina S. Nasyrova**, postgraduate student, ElinaSagitovna@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE ASSESSMENT OF HOUSING AND COMMUNAL SERVICES IMPACT ON RESERVOIRS CONDITION WITHIN THE LIMITS OF URBAN LANDSCAPE

Objective: To elaborate and scientifically validate a set of factors for the assessment of anthropogenic components of urban landscape (housing and communal services) impact on reservoirs condition. **Methods:** Literature data analysis, the method of aggregate estimate forming. **Results:** In order to assess the condition of reservoirs, attackable by various sectors of housing and communal services (water supply, water disposal, power supply) within the limits of urban landscape, a set of hydrochemical and hydrobiological indices of water quality were suggested and validated, which were divided into groups depending on priority and application conditions. The first priority indices are: temperature, dissolved oxygen, pH, conductivity, saprobity index; the second priority indices are: permanganate value – in case process waste water disposal in reservoir is not performed, with the exception of heated water of energy facilities; demand of chemical oxygen, suspended matter concentration, biogenic elements

concentration (N_{total} , P_{total}) – in case process waste water disposal in reservoir is not performed; the third priority index is the concentration of impurities. An aggregate indicator was developed including the suggested indices of water quality and making it possible to aggregate indices values of different measurements to a common value, fully estimate reservoirs condition and suitability for certain kinds of water consumption. **Practical importance:** The assessment of reservoirs condition within the limits of urban landscape by means of sets of water quality indices and aggregated index makes it possible to reduce the time of laboratory analyses conduct, increase the number of hydrological posts and take decisions on ecorehabilitation of reservoirs within the limits of urban landscape, thus providing the required level of water quality.

Keywords: Urban landscape, housing and communal services, reservoir, water quality, index.

Урболандшафт города, как сложная геосистема, включает в себя природные и антропогенные компоненты, которые, взаимодействуя между собой, оказывают влияние друг на друга. При современных темпах урбанизации основное воздействие на природные компоненты урболандшафта оказывают такие антропогенные компоненты как строительство (промышленное, транспортное, жилищно-гражданское, гидротехническое и гидромелиоративное) и жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ) [1].

Одним из природных компонентов урболандшафтов, подверженных антропогенному воздействию, являются водоемы. Их состояние определяет не только внешний облик городской территории, но и пригодность для конкретных видов водопользования (хозяйственно-питьевое, коммунально-бытовые и промышленные нужды и др.). Однако в пределах урболандшафта из-за массовой застройки прибрежной зоны, химического и теплового загрязнения водоемов происходят изменение качества вод, обмеление, истощение биологической продуктивности. В связи с этим водоемы, подверженные антропогенному воздействию, представляют собой источник геоэкологической опасности [2].

В настоящее время оценка состояния внутригородских водоемов и как следствие принятие своевременных решений по обеспечению их устойчивого существования затруднены из-за отсутствия информации. По данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды на терри-

тории РФ общее количество гидростов на водоемах (354) в 7 раз меньше, чем на реках (2731).

Целями представленной работы являлись разработка и научное обоснование набора показателей для оценки влияния ЖКХ на состояние водоемов.

Воздействие отраслей ЖКХ на водоемы в пределах урболандшафта

Как антропогенный компонент урболандшафта ЖКХ обеспечивает функционирование города и комфортное проживание населения. К основным его отраслям, взаимодействующим с водоемами и оказывающим на них воздействие, относятся водоснабжение, водоотведение и энергоснабжение.

Как видно из рисунка, водоемы используются для удовлетворения нужд как различных функциональных зон урболандшафта, так и отраслей ЖКХ, что обуславливает широкий спектр неблагоприятных воздействий:

- химическое загрязнение, связанное с сверхнормативным содержанием поллютантов в водоеме, вследствие сброса производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод, захлывания прибрежной зоны водоема твердыми коммунальными отходами;
- тепловое загрязнение водоемов-охладителей ТЭЦ из-за сброса подогретых вод;
- биологическое загрязнение, вызванное поступлением патогенных микроорганиз-



Схема воздействия отраслей ЖКХ на водоемы в пределах урболандшафта

мов и яиц гельминтов с неканализованными хозяйственно-бытовыми сточными водами.

Гигиенические требования к качеству воды водоемов для хозяйственно-питьевых и коммунально-бытовых нужд населения города и рекреационного водопользования, а также к условиям отведения сточных вод в водоемы установлены в СанПиН 2.1.5.980–00.

Анализ показателей качества воды водоема

При оценке пригодности водоемов в условиях химического загрязнения для конкретных видов водопользования (качество воды) модель водоема представляется в виде схемы «нагрузка (воздействие антропогенных компонентов урболандшафта) – состояние (качество воды) – ответное действие (мероприятия по экореабилитации)» [3]. Показатели, характеризующие состояние водоемов (качество воды), в Российской Федерации включены в ГОСТ 17.1.3.07–82. В соответствии со стандартом водоемы по качеству воды разделяют-

ся на шесть классов: очень чистые, чистые, умеренно загрязненные, загрязненные, грязные и очень грязные. В стандарте приведены различные наборы показателей (программы). Например, для контроля качества воды в водоеме в основные фазы водного режима рекомендуется обязательная программа, включающая более 37 показателей.

В последнее время ведутся работы по сокращению определяемых показателей состояния водоемов, т. е. выделения небольшого числа контролируемых и определяемых в ходе полевых и лабораторных работ, которые дают интегральное представление о качестве воды. Проведенный анализ работ отечественных исследователей [4–14] в области лимнологии позволил выявить широко используемые гидрохимические показатели качества воды, применяемые для оценки состояния водоемов в пределах урболандшафта (таблица).

В качестве гидробиологических показателей качества воды применяют практически все группы водных организмов: планктонные и бентосные беспозвоночные, бактерии, простейшие водоросли, макрофиты и рыбы, по

которым определяется индекс сапробности по Пантле и Букку (в модификации Сладечек). В условиях большого количества водоемов в пределах урболандшафта для оперативного определения индекса сапробности водоемов чаще всего используют макрофиты, так как они существуют на границе водораздела. Характер их развития, обилие видового состава и жизненность позволяют отнести макрофиты к качественным показателям состояния водоемов.

С учетом нормируемости и встречаемости в работах выявленные гидрохимические (см. таблицу) и гидробиологические показатели качества воды разделены по приоритетности:

I: температура, растворенный кислород, pH, электропроводность, индекс сапробности;

II: перманганатная окисляемость – если не производится сброс производственных сточных вод в водоем, за исключением подогретых вод объектов энергетики; ХПК, концентрация взвешенных веществ, концентрация биогенных элементов ($N_{\text{общ}}$, $P_{\text{общ}}$) – если сбрасываются производственные сточные воды в водоем;

III: концентрация загрязняющих веществ, в зависимости от характеристики источни-

ка загрязнения: тяжелые металлы (Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Co, Sb, Hg), Fe, Cr, As, F, нефть и нефтепродукты, фенол, синтетические поверхностно-активные вещества, хлор- и фосфорорганические пестициды.

Для однозначной оценки состояния водоемов в пределах урболандшафта, в которые не сбрасываются производственные сточные воды, показатели I и II приоритетов предлагается объединить в сводный показатель Q^A [15], позволяющий агрегировать показатели разной размерности в единое значение и определяемый по формуле

$$Q^A = 0,14 \cdot q_1 + 0,29 \cdot q_2 + 0,07 \cdot q_3 + 0,21 \cdot q_4 + 0,29 \cdot q_5. \quad (1)$$

В (1) q_1 – преобразованное значение pH, рассчитываемое по формуле

$$q_1 = \begin{cases} 1; w_1 \leq 4,0, \\ \left(\frac{6,9 - w_1}{2,9} \right); 4,0 < w_1 \leq 6,9, \\ 0; w_1 > 6,9, \end{cases} \quad (2)$$

Оценка состояния водоемов в пределах урболандшафта

Показатели	Гидрохимические показатели качества воды											
Включенные в сокращенные программы ГОСТ 17.1.3.07–82:	T	pH	РК	Э	Мр	ВВ	ПО	ХПК	ВПК	ЗВ	БЭ	ГИ
№ 1	+		+	+								
№ 2	+	+		+		+		+	+	+		
№ 3	+	+	+			+		+	+	+		
Нормируемые по СанПиН 2.1.5.980–00	+	+	+		+	+		+	+			
Предлагаемые авторами проанализированных работ (встречаемость, %)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. T – температура воды, °C; РК – растворенный кислород, мг/дм³; Э – электропроводность, мкСм/см; Мр – минерализация, мг/л; ВВ – концентрация взвешенных веществ, мг/л; ПО – перманганатная окисляемость, мг/дм³; ХПК – химическое потребление кислорода, мг/дм³; ВПК – биологическое потребление кислорода за 5 суток, мг/л; ЗВ – концентрация загрязняющих веществ, мг/л; БЭ – концентрация биогенных элементов, мг/л; ГИ – концентрация главных ионов, мг/л.

если измеренная величина водородного показателя $w_1 < 7$, и по формуле

$$q_1 = \begin{cases} 0; w_1 \leq 7,0, \\ \left(\frac{w_1 - 7,1}{1,9}\right); 7,1 < w_1 \leq 9,0, \\ 1; w_1 > 9,0, \end{cases} \quad (3)$$

если $w_1 > 7$.

Преобразованное значение концентрации растворенного кислорода q_2 , входящее в (1), определяется по формуле

$$q_2 = \begin{cases} 1, w_2 \leq 1, \\ \left(\frac{9 - w_2}{8}\right); 1 < w_2 \leq 9, \\ 0, w_2 > 9, \end{cases} \quad (4)$$

если пробы отбирались в период открытой воды, и по формуле

$$q_2 = \begin{cases} 1, w_2 \leq 1, \\ \left(\frac{14 - w_2}{13}\right); 1 < w_2 \leq 14, \\ 0, w_2 > 14, \end{cases} \quad (5)$$

если в период ледостава, где w_2 – измеренное значение концентрации растворенного кислорода.

В (1) q_3 – преобразованное значение электропроводности, рассчитываемое по формуле

$$q_3 = \begin{cases} 0; w_3 \leq 400, \\ \left(\frac{w_3 - 400}{1200}\right); 400 < w_3 \leq 1600, \\ 1; w_3 > 1600, \end{cases} \quad (6)$$

если объект исследования – проточный водоем, и по формуле

$$q_3 = \begin{cases} 0; w_3 \leq 150, \\ \left(\frac{w_3 - 150}{850}\right); 150 < w_3 \leq 1000, \\ 1; w_3 > 1000, \end{cases} \quad (7)$$

если он бессточный, где w_3 – измеренное значение электропроводности.

Преобразованное значение индекса сапробности q_4 и перманганатной окисляемости q_5 определяются по формулам

$$q_4 = \begin{cases} 0; w_4 \leq 1, \\ \left(\frac{w_4 - 1}{3}\right); 1 < w_4 \leq 4, \\ 1; w_4 > 4, \end{cases} \quad (8)$$

$$q_5 = \begin{cases} 0; w_5 \leq 4, \\ \left(\frac{w_5 - 4}{21}\right); 4 < w_5 \leq 25, \\ 1; w_5 > 25, \end{cases} \quad (9)$$

здесь w_4 – рассчитанное значение индекса сапробности; w_5 – измеренное значение перманганатной окисляемости.

Для оценки состояния водоемов в пределах урболандшафта, в которые сбрасываются производственные сточные воды, предложили сводный показатель Q^B

$$Q^B = 0,11 \cdot \sum_{i=1}^8 q_i + \frac{0,11}{n} \cdot \sum_{i=1}^n z_i. \quad (10)$$

В выражении (10) q_1 – q_4 определяются по формулам (2)–(8), q_5 и q_6 – преобразованные значения ХПК и концентрации взвешенных веществ соответственно, рассчитываемые по формулам

$$q_5 = \begin{cases} 0; w_5 \leq 12, \\ \left(\frac{w_5 - 12}{68}\right); 12 < w_5 \leq 80, \\ 1; w_5 > 80, \end{cases} \quad (11)$$

$$q_6 = \begin{cases} 0; w_6 \leq 9, \\ \left(\frac{w_6 - 9}{221}\right); 9 < w_6 \leq 300, \\ 1; w_6 > 300, \end{cases} \quad (12)$$

где w_5 и w_6 – измеренные значения ХПК и концентрации взвешенных веществ соответственно.

Преобразованные значения концентрации общего азота q_7 и фосфора q_8 , входящие в (10), определяются по формулам

$$q_7 = \begin{cases} 0; w_7 \leq 0,5, \\ \left(\frac{w_7 - 0,5}{9,5} \right); 0,5 < w_7 \leq 10, \\ 1; w_7 > 10, \end{cases} \quad (13)$$

$$q_8 = \begin{cases} 0; w_8 \leq 0,03, \\ \left(\frac{w_8 - 0,03}{0,97} \right); 0,03 < w_8 \leq 1,00, \\ 1; w_8 > 1,00, \end{cases} \quad (14)$$

в которых w_7 – измеренное значение концентрации общего азота, w_8 – измеренное значение концентрации общего фосфора.

В формуле (10) n – количество загрязняющих веществ III приоритета, анализируемых при оценке состояния водоема в пределах урболандшафта, z_i – преобразованные значения концентраций i -го загрязняющего вещества III приоритета

$$z_i = \begin{cases} 0, w_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{w_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right), \min_i < w_i \leq \max_i, \\ 1, w_i > \max_i. \end{cases} \quad (15)$$

Здесь w_i – измеренное значение концентрации i -го загрязняющего вещества; $\min_i$ и $\max_i$ – соответственно их минимальное и максимальное значение, приведенное в шкале классов качества показателя.

Заключение

Таким образом, для оценки состояния водоемов в пределах урболандшафта, подверженных негативному воздействию со стороны различных отраслей ЖКХ, предложены и обоснованы наборы гидрохимических и гидробиологических показателей качества воды, сгруппированные по приоритетности и условиям применения (см. формулы (2)–

(9), (11)–(15)). Оценка состояния водоемов в пределах урболандшафта по ним позволит сократить время на проведение лабораторных анализов, увеличить число гидрологических постов и оперативно принять решения по экореабилитации водоемов. Разработанные сводные показатели (1) и (10) включают в себя предложенные показатели качества воды (см. (2)–(9), (11)–(15)) и дают возможность комплексно оценить состояние водоемов и пригодность для конкретных видов водопользования.

Библиографический список

1. Федоров М. П. Анализ геоэкологических проблем при строительстве городов (на примере Санкт-Петербурга) / М. П. Федоров, В. Н. Уманец // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 2 (2). – С. 196–201.
2. Зибров Г. В. Квалиметрический анализ геоэкологической опасности территорий с интенсивной антропогенной деятельностью / Г. В. Зибров, В. М. Умывакин, Д. А. Иванов, Д. А. Матвиец, Н. А. Минаева // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 2009. – № 2. – С. 180–186.
3. Федоров М. П. Индикаторы и индексы в моделировании природно-технических систем / М. П. Федоров, А. А. Музалевский // Биосфера. – 2013. – № 3 (5). – С. 311–326.
4. Арсентьева Н. Ю. Санитарно-бактериологическая и гидрохимическая оценка состояния озера Второго в рыбохозяйственных целях / Н. Ю. Арсентьева, Д. Ю. Нохрин // Вестн. Челябинск. гос. ун-та. – 2008. – № 4. – С. 50–52.
5. Баянов Н. Г. К вопросу о происхождении и современном экологическом состоянии некоторых озер Нижегородского Заволжья / Н. Г. Баянов, Г. А. Юлова // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. Сер. Биология. – 2001. – № 1. – С. 91–102.
6. Белова Е. А. Оценка состояния водоемов г. Гродно по гидрохимическим показателям / Е. А. Белова, О. И. Голубович, А. И. Шепелевич // Экология России : на пути к инновациям. – 2014. – № 9. – С. 99–102.

7. Бойкова И. Г. Эксплуатация, реконструкция и охрана водных объектов в городах : учеб. пособие / И. Г. Бойкова, В. В. Волшаник, Н. Б. Карпова, В. Г. Печников, Е. И. Пупырев. – М. : АСВ, 2008. – 256 с.

8. Вецлер Н. М. Некоторые аспекты современного состояния экосистемы озера Дальнее / Н. М. Вецлер // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. – 2008. – № 8. – С. 24–31.

9. Горюнова С. В. Основные типы городских водоемов и возможные пути их инженерно-экологического обустройства / С. В. Горюнова // Вестн. Моск. гос. пед. ун-та. Сер. Естественные науки. – 2016. – № 1 (22). – С. 40–49.

10. Дмитриев В. В. Оценка экологического состояния малых озер Карельского Приладожья / В. В. Дмитриев, С. Н. Бурцев, О. Н. Мандрыка, А. Ю. Ефимова, Г. Ю. Кузьменко, А. С. Лаптев, Н. В. Нестерова, В. А. Соловьев, Д. С. Тимченко, А. А. Шадрин // Междунар. журн. прикл. и фундамент. исследований. – 2016. – № 8 (4). – С. 647–655.

11. Катанаева В. Г. Диагностика экологического состояния некоторых озер Викуловского района Тюменской области / В. Г. Катанаева, О. А. Алешина, Н. С. Ларина // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. – 2004. – № 3. – С. 32–37.

12. Кононова А. С. Оценка устойчивости малых водоемов Пуровского и Тазовского районов Тюменской области к процессам закисления / А. С. Кононова, Т. А. Кремлева, Р. И. Тимшанов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – № 1 (2). – С. 68–72.

13. Руфова А. А. Антропогенное влияние на гидрохимическое и гидробиологическое состояние поверхностных вод северных городов (на примере г. Якутска) / А. А. Руфова, А. В. Татарина // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 4. – С. 503.

14. Стихова А. М. Оценка экологического состояния природных водных объектов (на примере водоемов г. Новороссийска) / А. М. Стихова, Т. М. Володина // Вестн. гос. Морского ун-та им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. – 2014. – № 3 (8). – С. 50–54.

15. Насырова Э. С. Комплексная оценка экологического состояния водоемов урбанизированных территорий (на примере г. Уфа) / Э. С. Насырова,

А. Н. Елизарьев, А. Н. Насыров // Вода : химия и экология. – 2015. – № 9. – С. 3–11.

References

1. Fedorov M. P. & Umanets V. N. Analiz geoeologicheskikh problem pry stroitelstve gorodov (na primere Sankt-Peterburga) [The analysis of geoeological problems in the process of city construction (by the example of Saint Petersburg)]. *Saint Petersburg State Polytechnical University Science and Research Bulletin*, 2010, no. 2 (2), pp. 196–201. (In Russian)

2. Zybrov G. V., Umyvakyn V. M., Ivanov D. A., Matviyetz D. A. & Mynayeva N. A. Kvalymetrycheskiy analiz geoeologicheskoy opasnosti territoriy s intensivnoy antropogennoy deyatel'nost'yu [Qualimetric analysis of geoeological danger of territories with intensive anthropogenic activity]. *Voronezh State University Bulletin. Series Geology*, 2009, no. 2, pp. 180–186. (In Russian)

3. Phedorov M. P. & Muzalevskiy A. A. Indikatory i indeksy v modelirovani prirodno-tekhnicheskikh system [Indicators and indices in natural engineering systems modelling]. *Biosphere*, 2013, no. 3 (5), pp. 311–326. (In Russian)

4. Arsenyeva N. Y. & Nokhryn D. Y. Sanitarno-bakteriologicheskaya i gidrokhimicheskaya otsenka sostoyaniya ozera Vtorogo v rybokhozyajstvennykh tselyakh [Sanitary-bacteriological and hydrochemical assessment of the lake Vtoroye condition for fishery purposes]. *Chelyabinsk State University Bulletin*, 2008, no. 4, pp. 50–52. (In Russian)

5. Bayanov N. G. & Yulova G. A. K voprosu o proiskhozhdenii i sovremennom ekologicheskom sostoyanii nekotorykh ozer Nyzhegorodskogo Zavolzh'ya [On the issue of origin and modern ecological condition of some lakes of Zavolzh'ye]. *Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Bulletin. Series Biology*, 2001, no. 1, pp. 91–102. (In Russian)

6. Belova Y. A., Golubovich O. I. & Shepelevich A. I. Otsenka sostoyaniya vodoyomov g. Grodno po gidrokhimicheskym pokazatelyam [The assessment of Grodno city reservoirs condition on the basis of hydrochemical indicators]. *The Ecology of Russia: on the way to innovations*, 2014, no. 9, pp. 99–102. (In Russian)

7. Boykova I. G., Volshanik V. V., Karpova N. B., Pechnikov V. G. & Pupyrev Y. I. *Ekspluatatsiya, rekonstruktsiya i okhrana vodnykh ob'ektov v gorodakh* [Maintenance, reconstruction and conservation of water bodies in cities]. Moscow, ACB Publ., 2008, 256 p. (In Russian)
8. Vetsler N. M. Nekotoriye aspekty sovremennogo sostoyaniya ecosystem ozera Dalneye [Some aspects of modern condition of Dalneye lake ecosystems]. *Issledovaniya vodnykh biologicheskikh resursov Kamchatki i severo-zapadnoy chasty Tykhogo okeana* [The study of Kamchatka's and north-west part of the Pacific ocean water biological resources], 2008, no. 8, pp. 24–31. (In Russian)
9. Goryunova S. V. Osnovniye typy gorodskikh vodoyomov i vozmozhniye puty ikh inzhenerno-ekologicheskogo obustroystva [The basic types of urban reservoirs and possible engineering ecological ways of their beautification]. *Moscow city University Bulletin. Series Natural sciences*, 2016, no. 1 (22), pp. 40–49. (In Russian)
10. Dmitriyev V. V., Burtsev S. N., Mandryka O. N., Yefimova A. Y., Kuzmenko G. Y., Laptev A. S., Nesterova N. V., Solovjov V. A., Tymchenko D. S. & Shadrina A. A. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya mal'nykh ozer Karelskogo Pryladozhja [The assessment of Karelian Pryladozhje small lakes' ecological condition]. *The International journal of Applied and Fundamental studies*, 2016, no. 8 (4), pp. 647–655. (In Russian)
11. Katanayeva V. G., Aleshina O. A. & Laryna N. S. Diagnostika ekologicheskogo sostoyaniya nekotorykh ozer Vykulovskogo rayona Tyumenskoy oblasti [Diagnostics of ecological condition of some Vykulov's district lakes in Tyumen region]. *Tyumen State University Bulletin*, 2004, no. 3, pp. 32–37. (In Russian)
12. Kononova A. S., Kremleva T. A. & Tymshinov R. I. Otsenka ustoichivosty mal'nykh vodoyomov Purovskogo i Tazovskogo rayonov Tyumenskoi oblasti k protsessam zakysleniya [The assessment of small reservoirs resistance to acidulation in Purov and Tazov's districts of Tyumen region]. *Interexpo Geo-Siberia*, 2016, no. 1 (2), pp. 68–72. (In Russian)
13. Rufova A. A. & Tatarinova A. V. Antropogennoye vliyaniye na gydrokhimicheskoye i gydrobiologicheskoye sostoyaniye poverkhnostnykh vod severnykh gorodov (na primere g. Yakutska) [Anthropogenic influence on hydrochemical and hydrobiological condition of surface waters in northern cities (by the example of Yakutsk city)]. *Sovremenniyе problemy nauky i obrazovaniya* [Modern issues of science and education], 2015, no. 4, p. 503. (In Russian)
14. Stykhova A. M. & Volodyna T. M. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya vodnykh ob'ektov (na primere vodoyemov g. Novorossiyska) [The assessment of water bodies ecological condition (by the example of Novorossiysk city)]. *Admiral Ushakov Maritime State University Bulletin*, 2014, no. 3 (8), pp. 50–54. (In Russian)
15. Nasyrova E. S., Yelizariyev A. N. & Nasyrov A. N. Kompleksnaya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya vodoyomov urbanizirovannykh territoriy (na primere g. Ufa) [Integrated assessment of reservoirs' ecological condition on urbanized territories (by the example of Ufa city)]. *Water: chemistry and ecology*, 2015, no. 9, pp. 3–11. (In Russian)

ТИТОВА Тамила Семеновна – доктор техн. наук, профессор, заведующая кафедрой, проректор по научной работе; *АХТЯМОВ Расул Гумерович – канд. техн. наук, доцент; *НАСЫРОВА Элина Сагитовна – аспирант, ElinaSagitovna@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).