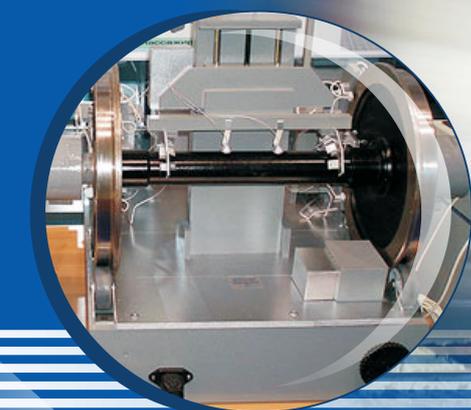
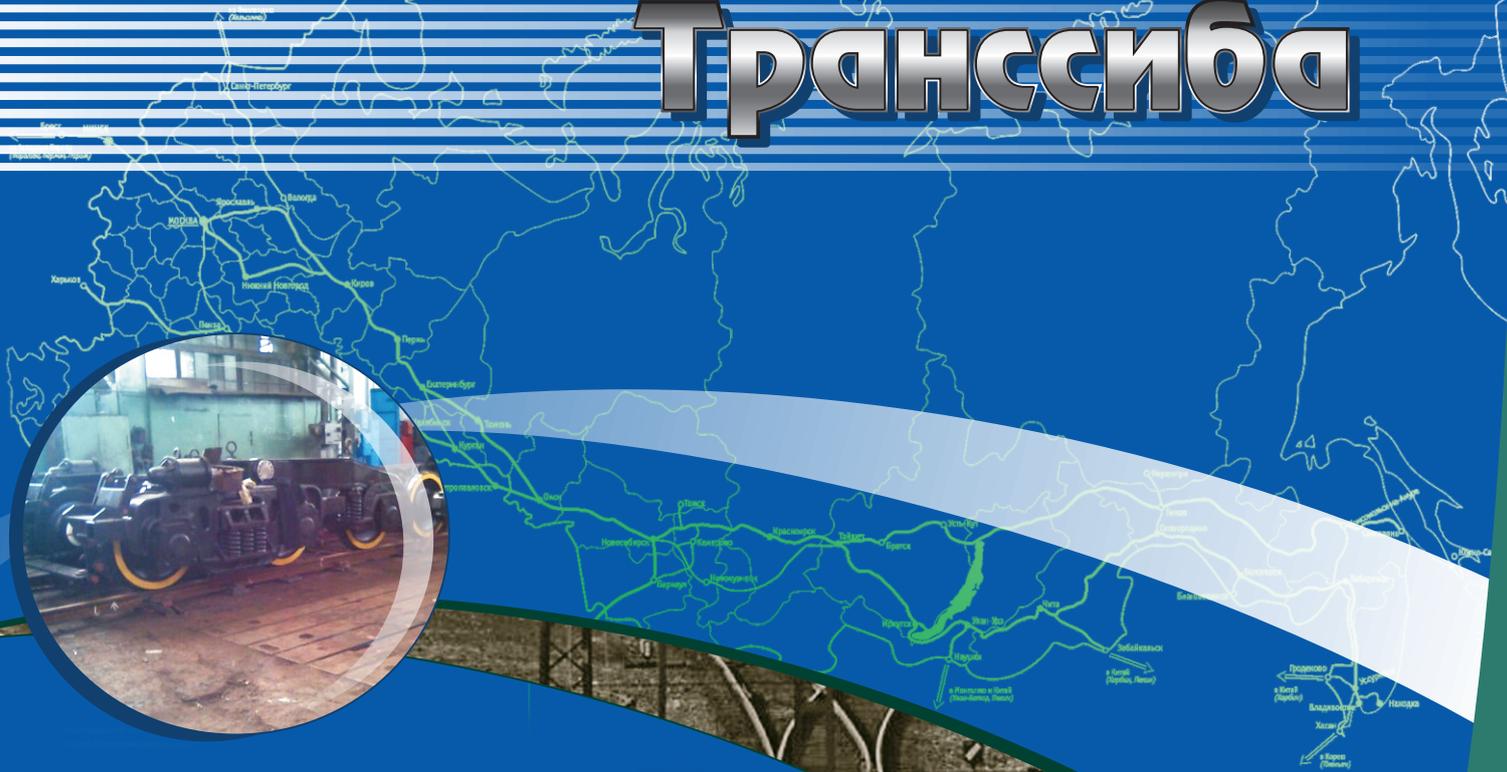


# ИЗВЕСТИЯ

№ 2(18)

2014

# Транссиб



## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Овчаренко Сергей Михайлович** – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. **Галиев Ильхам Исламович** – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. **Черемисин Василий Титович** – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. **Берндт Томас** – доктор, профессор Эрфуртского университета прикладных наук, факультета бизнеса, логистики и транспорта (Эрфурт, Германия).
6. **Бирюков Виталий Васильевич** – проректор по научной работе СибАДИ, д.э.н., профессор (Омск).
7. **Бокарев Сергей Александрович** – проректор по научной работе СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
8. **Глинка Тадеуш** – доктор, профессор Силезского университета (Катовицы, Польша).
9. **Каргапольцев Сергей Константинович** – проректор по научной работе ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
10. **Косарев Александр Борисович** – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
11. **Косых Анатолий Владимирович** – проректор по научной работе ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
12. **Лю Цзянькунь** – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
13. **Наек Вячеслав** – профессор, инженер Брненского технического университета (Брно, Чехия).
14. **Серенко Андрей Федорович** – проректор по научной работе ДВГУПС, д.т.н., профессор (Хабаровск).
15. **Солоненко Владимир Гельевич** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Вагоны» КазАТК (Алматы, Республика Казахстан).
16. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – проректор по научной работе ТашИИТА, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
17. **Чугуй Юрий Васильевич** – директор Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ (Новосибирск).

## EDITORIAL BOARD

1. **Ovcharenko Sergey Mikhailovich** – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
  2. **Galiyev Ilkham Islamovich** – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
  3. **Shantarenko Sergey Georgievich** – deputy chief editor, vice-rector for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
  4. **Cheremisin Vasily Titovich** – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
  5. **Berndt Thomas** – Dr., professor of University of applied sciences Erfurt, faculty of business, logistics and transport (Erfurt, Germany).
  6. **Biryukov Vitaly Vasilyevich** – vice-rector for research of SibADI, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
  7. **Bokaryov Sergey Alexandrovich** – vice-rector for research of SSTU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
  8. **Glinka Tadeusz** – Ph. D., professor of University of Silesia (Katowice, Polish).
  9. **Kargapol'tsev Sergey Konstantinovich** – vice-rector for research of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
  10. **Kosarev Alexander Borisovich** – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
  11. **Kosih Anatoly Vladimirovich** – vice-rector for research of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
  12. **Liu Jiankun** – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
  13. **Naek Vyacheslav** – professor, engineer of Brno University of Technology (Brno, Czech republic).
  14. **Serenko Andrey Fedorovich** – vice-rector for research of FESTU, D. Sc., professor (Khabarovsk, Russia).
  15. **Solonenko Vladimir Gelyevich** – D. Sc., professor, the leader of the department «Wagons» of KazATC (Almaty, Kazakhstan).
  16. **Fayzibaev Sherzod Sabirovich** – vice-rector for research of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
  17. **Chuguy Yuri Vasilyevich** – director of Technological design institute of scientific instrument engineering, Russian Academy of Sciences, professor, the honored worker of science of the Russian Federation (Novosibirsk, Russia).
- Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

## СОДЕРЖАНИЕ

### Подвижной состав железных дорог

- Абляимов О. С. Исследование эксплуатации тепловозов UzTE16M4 на участке Кумкурган – Ташгузар ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари» ..... 2
- Ахмеджанов Р. А., Макарошкин В. В., Родченко Л. А. О совершенствовании ультразвукового контроля оси колесной пары вагона ..... 7
- Дрягилев А. Е. Анализ неисправностей механической части электровозов 2ЭС6 ..... 18
- Дульский Е. Ю., Лыткина Е. М., Худоногов А. М. Исследование эффективности осциллирующих режимов инфракрасного энергоподвода в технологии капсулирования изоляции обмоток при ремонте электрических машин тягового подвижного состава ..... 24
- Меликов В. В., Файзибаев Ш. С., Набиев Э. С. Широкослойная наплавка гребня цельнокатаного колеса многоэлектродным способом ..... 30
- Сидоров О. А., Филиппов В. М., Стулаков С. А. Построение математической модели механического изнашивания контактных пар устройств токосъема ..... 36
- Супчинский О. П., Капустян М. Ф., Обрывалин А. В. Оценка технико-экономического эффекта от корректировки технологической документации для оптимизированной системы технического обслуживания и ремонта локомотивов ..... 41

### Транспортная энергетика

- Ведрученко В. Р., Крайнов В. В. Исследование динамики системы топливоиспользования дизельных энергетических установок методами теории автоматического управления ..... 47
- Емельянова М. Н. Обоснование механической величины эксплуатационной термомеханической нагрузки на провода контактной сети ..... 55
- Кандаев В. А., Авдеева К. В., Слелтерева Н. К. Расчет напряженности магнитного поля над кабелем с повреждением ..... 60
- Кремлев И. А., Кондратьев Ю. В., Терехин И. А. Расчетная модель электрического сопротивления железобетонных фундаментов опор контактной сети ..... 65

### Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Королёва К. А., Грипутенко С. С. Восстановление выпадений дискретизируемого сигнала, имеющих место во время калибровки АЦП универсального счетчика электрической энергии на подвижном составе постоянного и переменного тока ..... 70

### Путь и искусственные сооружения

- Абдукамилов Ш. Ш. Исследование колебательного процесса барханных песков, уложенных в железнодорожное земляное полотно ..... 75
- Адегова Л. А., Рудзей Г. Ф. Прогнозирование расчетной усталостной долговечности элементов конструкций с применением модифицированных кривых усталости ..... 86

### Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

- Аксенов В. А., Юдаева О. С., Егорова О. Г., Гладаренко А. С. Перспективные экологически безопасные шумо-, виброзащитные материалы для пассажирских вагонов локомотивной тяги ..... 95
- Галиев И. И., Гателок О. В., Лукс Д. Ю. Внедрение колес повышенной твердости – один из инновационных путей повышения эффективности грузовых вагонов в эксплуатации ..... 100

### Организация производства на транспорте

- Комяков А. А., Никифоров М. М., Эрбес В. В. О подходах к оценке фактической экономики энергетических ресурсов, достигаемой при реализации энергосервисных договоров ..... 106
- Юдаева О. С. Анализ условий труда и заболеваемость проводников пассажирских вагонов ..... 115

### АННОТАЦИИ ..... 120

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: Омский государственный университет путей сообщения

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

Тел./факс: (3812) 31-13-44; e-mail: nauka@omgups.ru

УДК 629.42:629.4.054

О. С. Абляимов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОВЗОВ $UzTE16M4$ НА УЧАСТКЕ КУМКУРГАН – ТАШГУЗАР ГАЖК «ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ»

*Представлены результаты исследований по оценке эффективности использования тепловозов  $UzTE16M4$  на «горном» участке Кумкурган – Ташгузар Узбекских железных дорог при движении грузовых поездов с остановками и без остановок на промежуточных станциях.*

Согласно договору о взаимном сотрудничестве между Управлением по эксплуатации локомотивов, Управлением «Темирйўленилғитаъмин» ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари» и кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ТашИИТа проводятся теоретические и экспериментальные исследования, направленные на оценку топливно-энергетической эффективности использования локомотивного парка железнодорожной компании в реальных условиях эксплуатации.

В настоящее время на железных дорогах ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари» движение грузовых поездов организовано электровозами серии «Узбекистан», ВЛ80<sup>С</sup>, ВЛ60<sup>К</sup> и тепловозами серии ТЭ10М,  $UzTE16M$  в различном секционном исполнении.

Одной из задач комплексной программы развития и модернизации железнодорожной отрасли Узбекистана на 2011 – 2015 гг. является задача обновления (пополнения) парка тягового подвижного состава высокопроизводительными локомотивами, что позволит изыскать резервы, связанные с дальнейшим повышением эффективности использования электрической и тепловозной тяги, повышением пропускной и провозной способности железных дорог ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари».

Цель настоящих исследований состоит в обосновании параметров эффективности использования тепловозной тяги для реальных условий эксплуатации грузовых тепловозов на неэлектрифицированном участке Кумкурган – Ташгузар железнодорожной компании.

Объектами исследования являются четырехсекционные магистральные тепловозы серии  $UzTE16M4$  и спрямленный профиль пути горного участка Кумкурган – Ташгузар ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари».

Предмет исследования – основные показатели перевозочной работы и параметры энергетической эффективности использования тепловозов на заданном участке железнодорожного пути.

В настоящее время проблема повышения эффективности использования тепловозного парка на неэлектрифицированных железнодорожных линиях успешно реализуется, особенно после завершения первого этапа модернизации части магистральных тепловозов серии ТЭ10М локомотивного парка путем замены дизеля 10Д100 на дизель 1А-5Д49.

Конструктивным отличием четырехсекционного модернизированного тепловоза  $UzTE16M4$  [3] являются новая силовая энергетическая установка дизель-генератор 1А-9ДГ с дизелем 1А-5Д49, микропроцессорная система регулирования мощности дизель-генератора УСТА-75-02 (унифицированная система тепловозной автоматики), система КЛУБ-У (комплексное локомотивное устройство безопасности), унифицированный пульт управления УПУ. Для обеспечения управления и контроля параметров на четырех секциях в электрической схеме базового тепловоза  $UzTE16M3$  внесены изменения в соединениях интерфейсов и пультов управления каждой секции, а также систем подготовки пуска, пуска дизеля и пожарной сигнализации [3].

Дизель 1А-5Д49 отличается от дизеля 10Д100 главным образом экономичностью: удельный расход топлива у дизеля 1А-5Д49 третьего исполнения на режиме номинальной мощности (2206 кВт) составляет 208 г/(кВт·ч), в режиме холостого хода расход топлива – 14 кг/ч.

Аналогичные параметры для дизеля 0Д100 составляют 286 г/(кВт·ч) и 22,8 кг/ч.

Для достижения поставленной цели и оценки топливно-энергетической эффективности использования тепловозов *UzTE16M4* на участке Кумкурган – Ташгузар выполнены тяговые расчеты по исходным данным, представленным в работе [2], учтены также рекомендации [1].

Методика исследований заключается в составлении математических моделей ведения грузового поезда тепловозами *UzTE16M4* с учетом тяговых свойств тепловоза и условий организационной перевозочной работы на «горном» участке Кумкурган – Ташгузар, на котором станция Акробат является наивысшей точкой участка и делит его примерно пополам на участки с различным профилем пути.

Участок Кумкурган – Акробат содержит преимущественно подъемы, в том числе и затяжной подъем, длина которого составляет 111,4 км, величина максимального подъема – +20,7 ‰. Участок Акробат – Ташгузар содержит в основном спуски, протяженность и величина максимального спуска составляют 109,05 км и – 20,5 ‰.

Железнодорожный участок Кумкурган – Ташгузар протяженностью 220,45 км относится к IV «горному» типу профиля пути и является наиболее «тяжелым участком» железнодорожной линии Термез – Карши, на котором 87 элементов профиля пути приходится на долю условно «трудных», характеризующихся величиной подъема  $i \geq +7,0$  ‰; на долю спусков и площадок ( $i = 0$  ‰) приходится, соответственно, 191 и 2 элемента профиля пути.

Железнодорожный участок Кумкурган – Акробат протяженностью 111,4 км содержит 86 спрямленных элементов и характеризуется изменением крутизны элементов от  $i = -0,5$  ‰ до  $i = -20,5$  ‰, а также подъемов – от  $i = +0,1$  ‰ до  $i = +20,2$  ‰, часть из которых приходится на долю условно «трудных» элементов при  $i \geq +7,0$  ‰.

Участок железной дороги Акробат – Ташгузар протяженностью 109,05 км содержит 166 элементов и характеризуется изменением крутизны элементов от  $i = 0$  ‰ до  $i = -20,5$  ‰, а также от  $i = 0$  ‰ до  $i = +12,8$  ‰.

В зависимости от крутизны уклонов (подъема или спуска) элементов профиля пути, по которому движется грузовой поезд, его движение может быть ускоренным, равномерным или замедленным. В основе каждого из них лежит принцип максимального использования мощности и тягово-эксплуатационных свойств локомотива [2], что для тепловоза *UzTE16M4* соответствует 15-й позиции контроллера машиниста в диапазоне скоростей от 19 км/ч (скорость выхода на автоматическую характеристику) до 100 км/ч согласно тяговой характеристике тепловоза.

Анализ результатов тяговых расчетов для различных условий организации движения грузовых поездов на участке Ташгузар – Кумкурган показывает, что при работе тепловозов *UzTE16M4* на 15-й позиции контроллера машиниста в сочетании с режимами холостого хода и торможения преобладает ускоренное и замедленное движение, а равномерное движение – движение с постоянной скоростью – встречается довольно редко.

В таблице 1 приведены результаты тяговых расчетов для трех различных вариантов ведения грузового поезда тепловозами *UzTE16M4* на участке Кумкурган – Ташгузар при движении без остановок и с остановками на промежуточных станциях с учетом дифференциации массы состава в диапазоне от  $Q_1 = 2500$  т до  $Q_3 = 3500$  т на величину  $\Delta Q = 500$  т и постоянным числом осей в составе  $m = 200$  осей.

Анализ результатов тяговых расчетов относительно графического (унифицированного) грузового поезда ( $Q_2 = 3000$  т) позволил сделать следующие выводы (в скобках приведены значения для условий движения с остановками) [2].

1. Усредненное время хода поезда составляет 4,25 ч (4,53 ч), с увеличением массы состава на  $\Delta Q = 500$  т происходит увеличение времени на 3,24 % (4,06 %).

2. Техническая скорость движения поезда, при увеличении массы состава имеет тенденцию к снижению.

3. Общий и удельный средний расход дизельного топлива на тягу поездов составляет, соответственно, 4085,7 кг (4193,3 кг) и 62,14 кг/10<sup>4</sup>ткм брутто (63,76 кг/10<sup>4</sup>ткм брутто).

4. Увеличение массы состава на 20 % способствует увеличению полного расхода дизельного топлива на 10,67 % (10,94 %), удельный расход дизельного топлива при этом уменьша-

# Подвижной состав железных дорог

ется на 5,15 % (4,91 %), уменьшение массы состава на 20 % обеспечивает уменьшение полного расхода дизельного топлива на 12,08 % (12,41 %) и увеличение удельного расхода дизельного топлива на 5,49 % (5,10 %).

Показатели перевозочной работы тепловозов *УзТЕ16М4* на участке *Кумкурган – Ташгузар*

Вариант тягового расчета	Условия перевозочной работы			Время хода поезда, мин			Расход дизельного топлива			Затраты денежных средств		
	масса состава $Q$ , т	число осей $n$ , осей	техническая скорость движения $V_T$ , км/ч	общее $t_x$	в режиме тяги $t_t$	в режиме холостого хода и торможения $t_{х,тг}$	общий		удельный		полные $C_T$ , тыс. с.у.м	удельные $C_T$ , тыс. с.у.м/км
							за поездку $E$ , кг	натурного топлива $e$ , кг/10 <sup>4</sup> ткм брутто	условного топлива $e_y$ , кг/10 <sup>4</sup> ткм брутто			
Перегон Кумкурган – Тангимуш, $L = 22,075$ км												
1	2500	200	59,42	22,29	15,73	6,56	481,1	87,17	124,66	851,8	38,58	
2	3000	200	58,02	22,83	17,89	4,94	544,8	82,26	117,64	964,5	43,69	
3	3500	200	56,65	23,42	19,50	3,92	592,5	76,69	109,66	1049,0	47,52	
Перегон Тангимуш – Бойсун, $L = 33,375$ км												
1	2500	200	47,51	42,15	35,44	6,71	1076,5	129,02	184,50	1905,9	57,10	
2	3000	200	43,41	46,13	40,44	5,69	1226,5	122,50	175,17	2171,4	65,06	
3	3500	200	39,47	50,73	45,17	5,56	1369,2	117,21	167,61	2424,1	72,63	
Перегон Бойсун – Дарбанд, $L = 20,625$ км												
1	2500	200	55,00	22,50	12,00	10,50	372,1	72,16	103,19	658,8	31,94	
2	3000	200	52,41	23,61	13,54	10,07	418,2	67,59	96,65	740,4	35,90	
3	3500	200	49,84	24,83	14,81	10,02	456,5	63,24	90,43	808,2	39,18	
Перегон Дарбанд – Шураб, $L = 8,000$ км												
1	2500	200	28,81	16,66	10,41	6,25	512,7	256,3	366,6	907,7	113,5	
2	3000	200	27,20	17,65	12,57	5,08	544,6	226,9	324,5	964,2	120,5	
3	3500	200	25,83	18,58	14,69	3,89	574,6	205,2	293,5	1017,3	127,2	
Перегон Шураб – Акназар, $L = 9,625$ км												
1	2500	200	38,47	15,01	12,94	2,07	465,2	193,3	276,5	823,6	85,57	
2	3000	200	34,89	16,55	15,06	1,49	513,7	177,9	254,4	909,5	94,49	
3	3500	200	32,19	17,94	16,81	1,13	557,2	165,4	236,5	986,5	102,5	
Перегон Акназар – Акробат, $L = 17,700$ км												
1	2500	200	44,05	24,11	22,11	2,00	669,6	151,3	216,4	1185,5	66,98	
2	3000	200	38,96	27,26	25,66	1,60	776,4	146,2	209,1	1374,6	77,66	
3	3500	200	35,53	29,89	28,61	1,28	865,2	139,7	199,7	1531,8	86,54	
Перегон Акробат – Дехканбад, $L = 52,425$ км												
1	2500	200	50,00	62,61	3,88	59,03	171,5	13,1	18,7	303,6	5,79	
2	3000	200	49,84	63,11	4,21	58,90	183,3	11,5	16,5	324,5	6,19	
3	3500	200	49,64	63,37	4,58	58,79	192,4	10,5	15,0	340,6	6,50	
Перегон Дехканбад – Ташгузар, $L = 56,625$ км												
1	2500	200	62,53	54,33	5,38	48,95	207,5	14,6	21,0	367,4	6,49	
2	3000	200	62,10	54,71	6,02	48,69	222,6	13,3	19,1	394,1	6,96	
3	3500	200	62,01	54,79	6,59	48,20	243,4	12,3	17,5	430,9	7,61	
Участок Кумкурган – Ташгузар, движение по перегонам с остановками, $L = 220,45$ км												
1	2500	200	50,88	259,96	117,89	142,07	3691	66,97	95,77	6534,7	29,64	
2	3000	200	48,66	271,85	135,39	136,46	4214	63,72	91,12	7460,7	33,84	
3	3500	200	46,65	283,55	150,76	132,79	4675	60,59	86,65	8276,8	37,54	
Участок Кумкурган – Ташгузар, движение по перегонам без остановок, $L = 220,45$ км												
1	2500	200	54,54	242,52	115,64	126,88	3609	65,48	93,64	6389,5	28,98	
2	3000	200	51,83	255,22	132,17	123,05	4105	62,07	88,75	7267,7	32,97	
3	3500	200	49,46	267,44	146,74	120,70	4543	58,87	84,19	8043,1	36,48	

5. Время хода поезда в режиме холостого хода и торможения, а также в режиме тяги составляет соответственно от 2,11 ч (2,37 ч) до 2,01 ч (2,21 ч) и от 1,93 ч (1,96 ч) до 2,44 ч (2,51 ч). При увеличении массы состава на 20 % происходит снижение времени хода поезда на режиме холостого хода и торможения, а также его увеличение в режиме тяги соответственно на 0,039 ч (0,061 ч) и 0,24 ч (0,26 ч).

6. Уменьшение массы состава на 20 % приводит к снижению времени в режиме тяги и увеличению показателя использования режима холостого хода и торможения [2] на 4,10 % (3,45 %), а с увеличением массы состава на 20 % происходит повышение и снижение этих показателей на 3,08 % (3,37 %).

7. Уменьшение массы состава на 20 % приводит к снижению полной и удельной стоимости перевозок на 12,08 % (12,41 %), а с увеличением массы состава на 20 % происходит повышение стоимости на 10,67 % (10,94 %).

По данным таблицы рассчитаны уравнения регрессии для определения параметров основных показателей перевозочного процесса на участке Кумкурган – Ташгузар в зависимости от массы состава грузового поезда при движении с остановками и без остановок на промежуточных станциях (обозначены индексом звездочка \*).

Общее время хода поезда, мин,

$$t_x = 0,0236Q + 201,02; \quad (1)$$

$$t_x^* = 0,0249Q + 180,3.$$

Время хода поезда в режиме тяги, мин,

$$t_T = 0,0329Q + 36,07; \quad (2)$$

$$t_T^* = 0,0311Q + 38,217.$$

Время хода поезда на режиме холостого хода и торможения, мин,

$$t_{x,x,T} = 164,95 - 0,0093Q; \quad (3)$$

$$t_{x,x,T}^* = 142,08 - 0,0062Q.$$

Техническая скорость движения, км/ч,

$$V_T = 61,42 - 0,00423Q; \quad (4)$$

$$V_T^* = 67,18 - 0,0051Q.$$

Общий расход дизельного топлива за поездку, кг,

$$E = 1241,33 + 0,984Q; \quad (5)$$

$$E^* = 1283,67 + 0,934Q.$$

Удельный расход натурального топлива, кг/10<sup>4</sup>ткм брутто,

$$e = 82,9 - 0,00638Q; \quad (6)$$

$$e^* = 81,97 - 0,00661Q.$$

Приведенные денежные затраты, тыс. сўм/км

$$c_T = 9,97 + 0,0079Q; \quad (7)$$

$$c_T^* = 10,31 + 0,0075Q.$$

В принятом диапазоне изменения массы состава (от 2500 до 3500 т) усредненное значение времени, затраченного на один разгон – замедление, составляет 2,34 мин, а расход дизельного топлива на одну остановку поезда колеблется от 11,71 кг ( $Q_1 = 2500$  т) до 18,86 кг ( $Q_3 = 3500$  т).

Для обоих видов движения грузовых поездов с увеличением объема перевозочной работы тепловозами *UzTE16M4* на железнодорожных участках Кумкурган – Акробат и Акробат – Ташгузар повышается эффективность использования этих тепловозов на обоих упомянутых участках несмотря на различные «тяговые» качества их профилей пути.

Полученные нами результаты хорошо согласуются с исследованиями [2 – 5] и другими, а предложенные для широкого диапазона разнообразных условий организации движения грузовых поездов на участке Кумкурган – Ташгузар уравнения регрессии и параметры основных показателей перевозочной работы тепловозов *UzTE16M4* будут полезны машинистам-инструкторам и специалистам цеха эксплуатации локомотивного депо Карши, работа которых сопряжена с прогнозированием расхода дизельного топлива на тягу поездов и напрямую связана с оценкой топливно-энергетической эффективности использования тепловозной (локомотивной) тяги в условиях эксплуатации.

## Список литературы

1. Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги: Учебник для вузов железнодорожного транспорта [Текст] / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – М.: Маршрут, 2005. – 448 с.
2. Абляимов, О. С. Основы управления локомотивов: Учебник для профессиональных колледжей железнодорожного транспорта [Текст] / О. С. Абляимов, Э. С. Ушаков. – Ташкент: Davr, 2012. – 392 с.
3. Абляимов, О. С. К вопросу эксплуатации тепловозов *UzTE16M4* на участке Ташгузар – Кумкурган ГАЖК «Ўзбекистон темир йуллари» [Текст] / О. С. Абляимов, В. С. Кудряшов, И. Р. Каюмов // Материалы республиканской науч.-техн. конф. с участием зарубежных ученых «Транспортная логистика, мультимодальные перевозки» / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2012. – С. 48 – 51.
4. Абляимов О. С. Исследование эксплуатации тепловозов 4ТЭ10М на участке Кумкурган – Ташгузар [Текст] / О. С. Абляимов // Материалы республиканской науч.-техн. конф. с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2013. – С. 54 – 57.
5. Абляимов О. С. Исследование эксплуатации электровозов 3ВЛ80<sup>С</sup> на участке Кумкурган – Ташгузар [Текст] / О. С. Абляимов // Повышение эффективности использования и совершенствование системы технического обслуживания и ремонта локомотивов: Межвуз. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 39 – 42.

## References

1. Kuz'mich V. D., Rudnev V. S., Frenkel' S. Ia. *Teoriia lokomotivnoi tiagi: Uchebnik dlia vuzov zheleznodorozhnogo transporta* (Theory of locomotive traction: the Textbook for high schools of railway transport). Moscow: Marshrut, 2005, 448 p.
2. Ablialimov O. S., Ushakov E. S. *Osnovy upravleniia lokomotivov: Uchebnik dlia professional'nykh kolledzhei zheleznodorozhnogo transporta* (Bases of management of locomotives: the Textbook for the professional College of railway transport). Tashkent: Davr, 2012, 392 p.
3. Ablialimov O. S., Kudriashov V. S., Kaiumov I. R. To the question of operation of diesel locomotives *UzTE16M4* on the Tashguzar – Kumkurgan railway company «Uzbekiston Temir Yullari» [K voprosu ekspluatatsii teplovozov *UzTE16M4* na uchastke Tashguzar – Kumkurgan GAZhK «Ўзбекистон темир йуллари»]. *Materialy respublikanskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s uchastiem zarubezhnykh uchenykh «Transportnaia logistika, mul'timodal'nye perevozki»* (Materials of the Republican scientific-technical conference with participation of foreign scientists «Transport logistics, multimodal transport»). – Tashkent, 2012, pp. 48 – 51.
4. Ablialimov O. S. Study of operation of diesel locomotives TEM on the site Kumkurgan – Tashguzar [Issledovanie ekspluatatsii teplovozov 4TE10M na uchastke Kumkurgan – Tashguzar]. *Materialy respublikanskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s uchastiem zarubezhnykh*

uchenykh «Transportnaia logistika, mul'timodal'nye perevozki» (Materials of the Republican scientific-technical conference with participation of foreign scientists «Transport logistics, multimodal transport»). – Tashkent, 2013, pp. 54 – 57.

5. Ablialimov O. S. Study of operation of electric locomotives 3VL80S on the site Kumkurgan – Tashguzar [Issledovanie ekspluatatsii elektrovozov 3VL80S na uchastke Kumkurgan – Tashguzar]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov / Omskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniia «Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniia i sovershenstvovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniia i remonta lokomotivov»* (Interuniversity collection of scientific works “Increase of efficiency and improvement of the system of maintenance service and repair of locomotives”). – Omsk, 2014, pp. 39 – 42.

УДК 629.4.027/027:620.179.16(07)

Р. А. Ахмеджанов, В. В. Макаровичкин, Л. А. Родченко

## О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ОСИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ВАГОНА

В статье рассмотрены штатные технологии ультразвукового контроля подступичной части нераспрессованных осей колесных пар вагонов в соответствии с действующими нормативными документами РД 07.09-97 и СТО РЖД 1.11.002-2008 и предложены меры по их совершенствованию.

На территории РФ ультразвуковой контроль (УЗК) колесных пар вагонов выполняется в соответствии с руководящими документами [1, 2].

В настоящей статье рассмотрены в основном вопросы совершенствования УЗК эхометодом подступичной части в зоне внешней кромки колеса – зоне контроля, определяющей в наибольшей степени эксплуатационную надежность колесной пары.

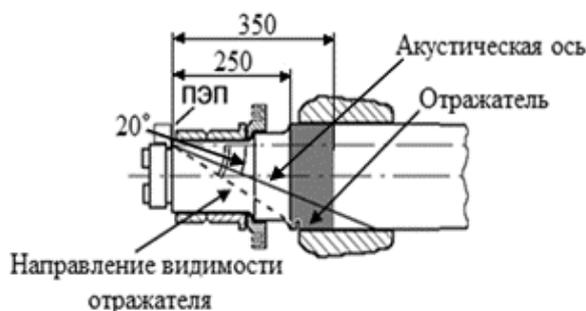


Рисунок 1 – Схема прозвучивания внешней кромки подступичной части оси по СТО РЖД 1.11.002-2008 (вариант AR1.3)

Согласно рекомендациям документа [2] контроль рассматриваемой зоны осуществляют по варианту AR1.3 продольными волнами в осевом направлении (частота – 2,5 МГц, угол ввода –  $20 \pm 2$  градуса) с резьбовой канавки при ее сканировании по окружности пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭПом) с целью выявления поверхностных поперечных трещин (рисунки 1, 2). Браковочная чувствительность соответствует выявлению эталонного отражателя в контрольном образце (КО) в виде поперечного пропила глубиной 3 мм на расстоянии (250 – 350) мм от

поверхности сканирования с условной чувствительностью 40 дБ.

В соответствии с требованиями документа [2] контроль этой зоны выполняют путем сканирования наклонным или комбинированным ПЭПом (частота – 2,5 МГц, угол ввода – 18 градусов) по торцу (ось РУ-1Ш) или по резьбовой канавке (ось РУ-1). Браковочную чувствительность настраивают по пропилу глубиной 3 мм, расположенному на расстоянии 272 мм для оси РУ-1 и 285 мм для оси РУ-1Ш. При этом определение уровня чувствительности  $N_3$  при УЗК оси с напрессованными кольцами осуществляют по настроечным образцам осей РУ-1 и РУ-1Ш при уровне сигнала от отражателя, равном половине высоты А-развертки. Зона контроля для оси РУ-1 – (1,1 – 1,4) деления горизонтальной шкалы экрана

дефектоскопа, что составляет от точки ввода (257 – 333) мм, для оси РУ-1Ш соответственно (1,2 – 1,5) деления и (266 – 357) мм.

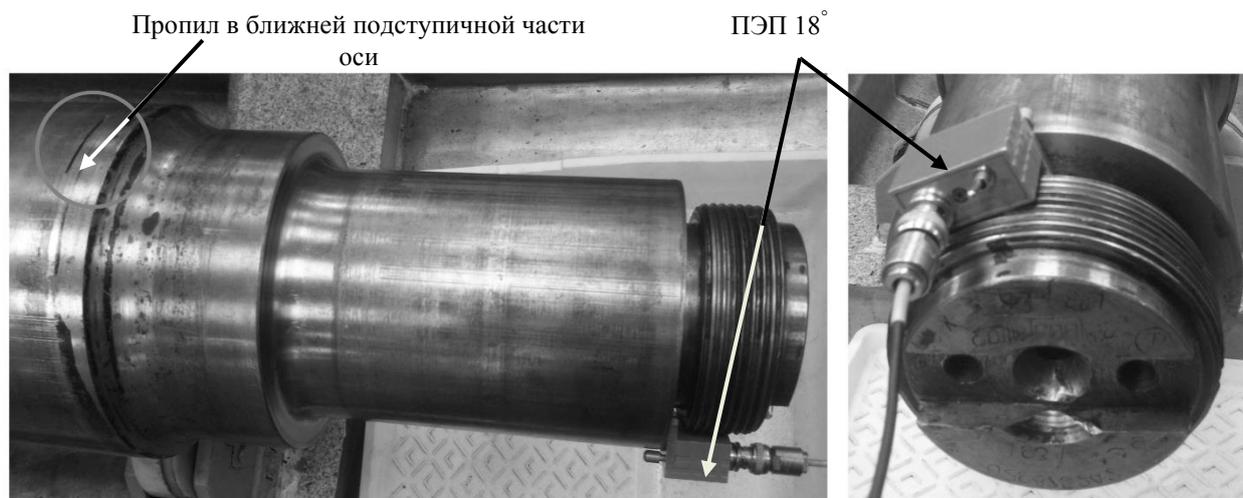


Рисунок 2 – Контроль ближней подступичной части оси РУ-1 в зоне под внешней кромкой колеса

Таким образом, данная зона по СТО независимо от типа оси составляет (250 – 350) мм, а по РД различается: для РУ-1 – (257 – 333) мм и РУ-1Ш – (266 – 357) мм.

На рисунке 3 изображено смещение зоны контроля и положения отражателя на акустической оси при контроле подступичной части в зоне под внешней кромкой колеса. Положение преобразователя при контроле оси с ее торцевой поверхности является стационарным относительно контролируемого участка.

Рассмотрим, возможно ли обнаружение этого отражателя на практике и сохранение пропорциональности его отображения по заданной зоне контроля. Все расчетные результаты получены при моделировании процесса контроля в среде Mathcad.

При установке параметров зон контроля в дефектоскопе введенные значения автоматически пересчитываются в единицы времени. Это связано с тем, что глубиномер дефектоскопа оперирует единицами времени и производит отсчет временного интервала между вводом ультразвука в объект и получением эхо-сигнала. После этого, если требуется оператору, дефектоскоп производит пересчет временного интервала в единицы расстояния, умножая его на соответствующий коэффициент. В этом случае в дефектоскопе зона контроля по акустической оси задается по отметкам  $Y_{нач.ак}$  и  $Y_{кон.ак}$ , равным 257 и 333 мм. При этом принадлежащие контуру объекта контроля точки  $Y_{нач}$  и  $Y_{кон}$  не располагаются на линии, соответствующей параметрам значения угла ввода, установленного в дефектоскопе.

Рассмотрим процесс пересчета значений координат, происходящий в дефектоскопе согласно



Рисунок 3 – Смещение реальной зоны контроля при контроле оси в зоне под внешней кромкой ступицы по РД 07.09.97

$$Y = R \cos \alpha = \left( \frac{1}{2} C_w \cos \alpha \right) t = K_y t, \quad (1)$$

где  $Y$  – координата по длине объекта контроля, мм;  
 $R$  – координата по акустическому лучу, мм;  
 $\alpha$  – значение угла ввода, градусы;  
 $C_w$  – значение скорости волны, мм/мкс;  
 $t$  – время, с;  
 $K_y$  – коэффициента пересчета по глубине, мм/мкс.  
 Получим:

$$t_n = \frac{y_n}{K_y} = \frac{2y_n}{C_w \cos \alpha}, \quad (2)$$

где  $t_n$  – время распространения волны от ПЭПа до начала зоны контроля и обратно, мкс;  
 $y_n$  – координата по длине объекта контроля, равная началу зоны контроля, мм.

Формула (2) иллюстрирует, каким образом дефектоскоп интерпретирует введенные в него координаты зоны контроля (257 – 233) мм. Он пересчитает координату в значение времени, которое в реальности потребуется ультразвуку, чтобы дойти, например, до точки  $Y_{\text{нач.ак}}$  и обратно. Точка  $Y_{\text{нач.ак}}$ , в отличие от точки  $Y_{\text{нач}}$ , принадлежит линии акустической оси. Аналогичная ситуация происходит с точкой  $Y_{\text{кон}}$ , которая в реальности подменяется точкой  $Y_{\text{кон.ак}}$ . Если через точки  $Y_{\text{нач.ак}}$  и  $Y_{\text{кон.ак}}$  провести окружности с радиусами, равными расстоянию от них до точки ввода ультразвука по акустической оси (см. рисунок 3), то на пересечении с контуром оси найдем точки  $Y_{\text{нач.реал}}$  и  $Y_{\text{кон.реал}}$ . Между этими двумя точками и будет располагаться реальная зона контроля, в которой производится поиск дефекта. Таким образом, происходит смещение реальной зоны контроля по отношению к необходимой. Для оси РУ-1 при значении угла ввода 18 градусов протяженность этой зоны составляет (232,1 – 316) мм, и она включает в себя галтельный переход и область на предподступичной части.

В соответствии с требованиями руководящего документа СТО зона контроля оси под внешней кромкой ступицы составляет (250 – 350) мм. Реальное положение зоны контроля в этом случае будет составлять (223,5 – 335,7) мм. Как видим, за счет увеличения значения дальней границы реальная зона теперь хотя бы включает в себя зону, указанную в РД. Однако ближняя граница зоны теперь еще больше захватывает предподступичную часть оси. К тому же, остается нерешенной проблема неверного отображения на дефектоскопе координат обнаруженных отражателей. В соответствии с требованиями СТО параметры зоны контроля по варианту AR1.3 не зависят от типа исследуемой оси и по сравнению с зонами контроля по аналогичному методу РД, равными (257 – 333) мм для оси РУ-1 и (266 – 357) мм для оси РУ-1Ш, заметно расширена. Однако это не является ее преимуществом, как могло бы показаться на первый взгляд. Ниже рассматриваются рекомендации по уточнению зон контроля, а также причины необоснованности их расширения.

*Рекомендации по смещению зоны контроля в ближней подступичной части оси.* На рисунке 4 изображена рекомендуемая авторами зона контроля для оси РУ-1, длина которой составляет (283 – 348) мм (граничные значения для точек  $Y_{\text{нач.ак}}$  и  $Y_{\text{кон.ак}}$  соответственно). Эти значения получены как координаты точек пересечения окружностей с соответствующим значением радиуса, равного расстоянию до исходной точки зоны контроля с линией акустической оси.

При таких значениях границ зоны контроля, установленных в дефектоскопе, реальная зона сместится в точки  $Y_{\text{нач}}$  и  $Y_{\text{кон}}$ , что соответствует координатам (257 – 333) мм по контуру оси РУ-1 (зона, указанная в РД и соответствующая наиболее вероятной области образования дефектов). Аналогичным образом получены расчетные значения рекомендуемой зоны контроля для оси РУ-1Ш, которые составляют 291 и 369 мм. При использовании для контроля внешней кромки

подступичной части оси преобразователя 18 градусов контролируемая зона будет ближе к поверхности ввода по контуру оси, чем по линии акустической оси, следовательно, положение отражателя (по данным глубиномера дефектоскопа) определится неверно.

Кроме предложенных рекомендаций для зоны контроля (см. рисунок 4) возможны и другие способы получения корректных результатов установки па-

раметров рекомендуемых зон контроля. На рисунке 5 представлены результаты расчетов, выполненные для ПЭПа с углом ввода 24 градуса для оси РУ-1.

При сравнении рисунков 4 и 5 видно, что при использовании 24-градусного ПЭПа, в отличие от 18-градусного, акустический луч с допустимой точностью попадает в конец зоны контроля. В данном случае вместо указанных в РД (257 – 333) мм следует установить зону контроля (272 – 334) мм для оси РУ-1. Это означает, что при приближении к концу зоны контроля показания дефектоскопа будут ближе к реальным значениям. Для оси РУ-1Ш применение данной методики дает следующую коррекцию: рекомендуемая зона контроля составит (279 – 354) мм вместо (266 – 357) мм.

На рисунке 6, б приведены расчетные данные положения зоны контроля на основном лепестке диаграммы направленности (ДН) при контроле 24-градусным ПЭПом. Начало зоны приходится на уровень диаграммы направленности (ДН), равный 0,69; конец зоны – на уровень 1.

Для сравнения приведен рисунок 6, а – положение зоны контроля по ДН для преобразователя со значением угла ввода 18 градусов. Начало зоны находится на уровне 0,13; конец зоны – на уровне 0,68. Это показывает, что при контроле 18-градусным ПЭПом дефект выявляется не верхушкой основного лепестка ДН, а его нижней частью, что приводит к снижению амплитуды эхо-сигнала (чувствительности) и неверному отображению координат отражателя на экране дефектоскопа.

Таким образом, тенденция увеличения угла ввода ведет к сближению зоны контроля по линии акустической оси с реальной зоной по контуру объекта контроля и соответственно к увеличению амплитуды отраженного сигнала. Однако существует ограничение по увеличению угла ввода акустической волны, так как увеличение этого угла ведет к росту помех в эхо-сигнале. Например, для угла ввода 18 градусов, расчетное соотношение коэффициентов прозрачности продольной и поперечной волн составляет 23 дБ (14 раз), а для 24 градусов – 18 дБ (8 раз). Допустимое отношение «сигнал/помеха» не должно быть меньше трех (10 дБ).

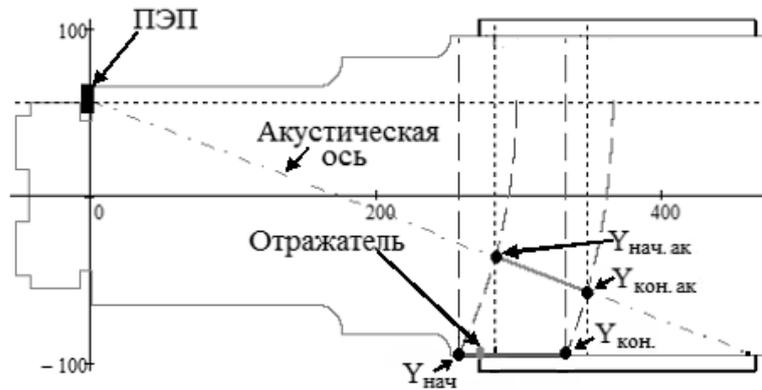


Рисунок 4 – Рекомендованная зона контроля для оси РУ-1 и ее смещение по акустической оси



Рисунок 5 – Зона контроля по РД 07.09-97 и ее смещение при использовании ПЭПа 24 градуса для оси РУ-1

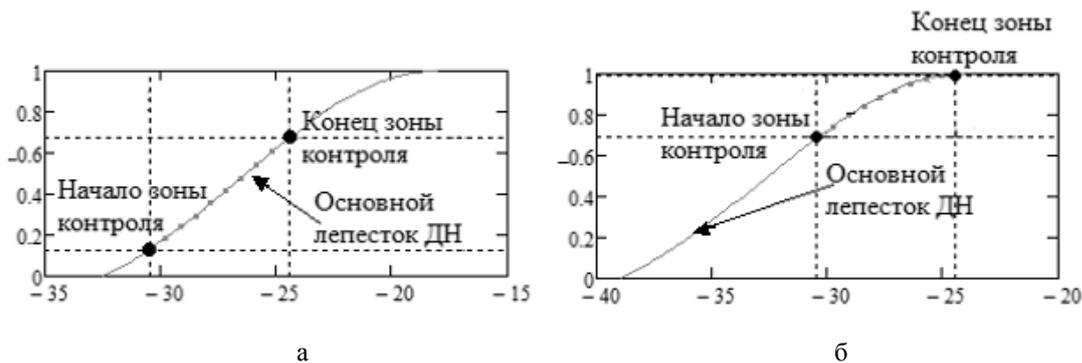


Рисунок 6 – Положение зоны контроля на диаграмме направленности для ПЭПа 18 градусов (а) и при контроле ПЭПа 24 градуса (б)

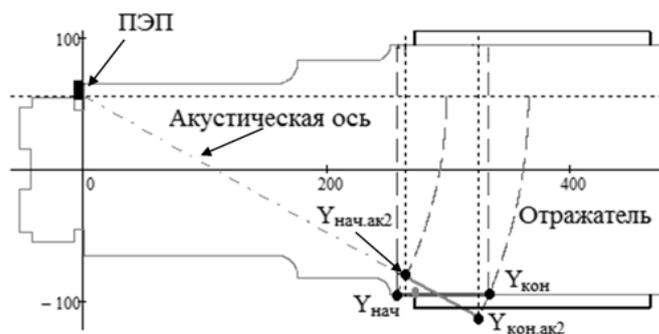


Рисунок 7 – Зона контроля по РД 07.09-97 и ее смещение при указании в параметрах настройки дефектоскопа угла 27,4 градуса для оси РУ-1

Еще один способ получения корректных результатов контроля состоит в том, чтобы, не заменяя ПЭПа (18-градусного), указать в параметрах настройки дефектоскопа другое значение угла ввода (рисунок 7).

Как видно из рисунка 7, зона контроля по акустической оси не в полной мере совпадает с зоной контроля по контуру объекта. Середины зон полностью совпадают, а к концам зоны наблюдаются отклонения. В данном случае вместо указанных в РД (257 – 333) мм следует установить зону

контроля (265 – 325) мм и угол ввода 27,4 градуса (при этом контролируемый участок остается прежним). В результате получаем относительно небольшое смещение результатов по сравнению с другими вариантами изменения зоны контроля. Чем ближе к середине зоны, тем с большей точностью будут определены координаты отражателей. Применение данной методики для оси РУ-1Ш показывает, что рекомендованная зона контроля по параметрам дефектоскопа составит (274 – 348) мм, а угол ввода – 26,3 градуса.

На рисунке 8 приведены результаты контроля настроечного образца оси РУ-1 с ПЭПом 18 градусов при стандартных значениях параметров настройки дефектоскопа; на рисунке 9 – в настройках дефектоскопа был задан угол ввода 27,4 градуса, при этом реально использовался все тот же ПЭП 18 градусов.

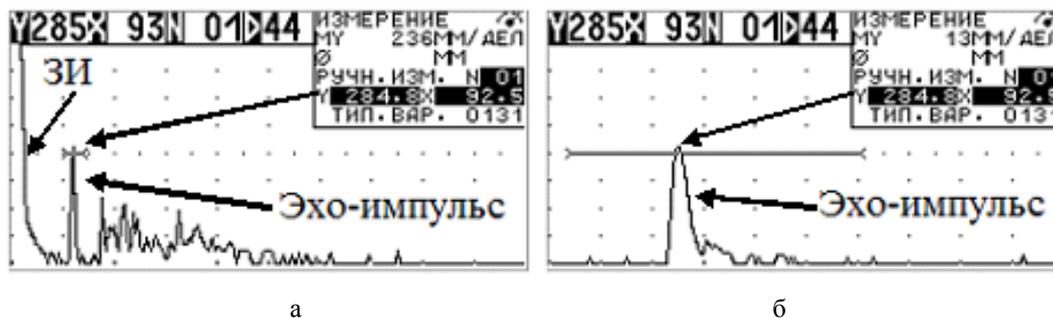


Рисунок 8 – Снимок с экрана дефектоскопа при контроле ближней подступичной части оси 18-градусным ПЭПом: а – эхосигнал от пропила глубиной 2 мм, расположенного на расстоянии 264 мм относительно зарезьбовой канавки, в ближней подступичной части настроечного образца оси РУ-1; б – с применением инструмента «Лупа»

Как видно на рисунке 8, координата  $Y$  положения отражателя по глубине, полученная по данным глубиномера, составляет 284,8 мм. И это при том, что отражатель находится на расстоянии 264 мм от зарезьбовой канавки. На рисунке 9 то же значение координаты составляет 265,8 мм. Результаты эксперимента доказывают эффективность изменения значения угла ввода в настройках дефектоскопа при проведении контроля.

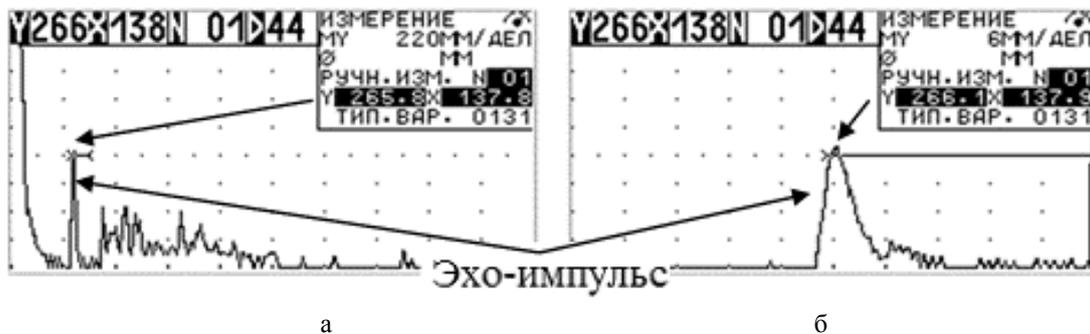


Рисунок 9 – Снимок с экрана дефектоскопа при установке в настройках значения параметра «Угол ввода», равного 27,4 градуса: а – эхо-сигнал от пропила глубиной 2 мм, расположенного на расстоянии 264 мм относительно зарезьбовой канавки, в ближней подступичной части образца оси РУ-1; б – применение инструмента «Лупа»

Выше были рассмотрены способы получения более адекватных результатов контроля и даны рекомендации по корректировке зон контроля, указанных в РД. Рекомендации по изменению зоны контроля по СТО смысла не имеют ввиду того, что параметры зоны контроля, предложенные в варианте АР1.3, а именно (250 – 350) мм, одинаковы как для оси РУ-1, так и для оси РУ-1Ш, несмотря на их конструктивные различия и несовпадение расстояний до контролируемых участков.

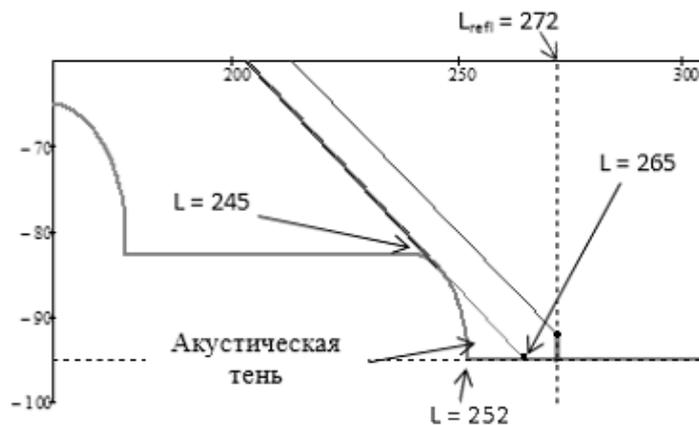


Рисунок 10 – Акустическая тень на оси РУ-1 в зоне под внешней кромкой ступицы

*Акустическая тень и влияние трансформированной поперечной волны на обнаружение отражателей в ближней подступичной части оси.* Предварительно рассмотрим, в чем состоит недостаток выбранной в СТО координаты начала зоны контроля (рисунок 10).

Вблизи галтельного перехода между предподступичной и подступичной частями оси образуется акустическая тень в зоне от 252 мм (начало подступичной части) до точки 264 мм. Расчетное значение координаты точки касания продольной волны с поверхностью подступичной части, которая выходит за границу зоны акустической тени, составляет 265 мм. Отражатели, находящиеся в этой «тене» области, не будут выявляться. Начиная с расстояния 260 мм возможно частичное выявление отражателей в зависимости от их размера за счет соскальзывания продольной волны по поверхности галтельного перехода. В связи с этим не имеет смысла зона контроля, начало которой приходится на отметку 257 и тем более 250 мм (как отмечалось выше, по параметрам оси РУ-1 эта точка располагается на поверхности предподступичной части). Для оси РУ-1 рекомендуется сместить начальную границу зоны контроля на отметку 260 мм, что иллюстрируется рисунком 10.

Зона контроля для оси РУ-1Ш по РД составляет (266 – 357) мм. Здесь картина такая же, как и для оси РУ-1. Однако из-за различной длины шеек искусственный пропилен на настроечном образце находится на расстоянии 285 мм, а рекомендуемая граница начала зоны контроля в связи с явлением акустической тени составляет 270 мм.



Рисунок 11 – Зона трансформации ультразвуковой волны на шейке оси РУ-1 при положении (по времени) текущей точки трансформации, совпадающем с концом зоны контроля по РД 07.09-97

Рассмотрим теперь конечную границу зоны контроля – 350 мм (рисунок 11).

На рисунке 11 обозначено:  $Y_{ш}$  – координата точки, в которую попадает трансформированная поперечная волна от шейки оси при текущем положении точки трансформации;  $Y_{нач}$ ,  $Y_{кон}$  – координаты начала и конца зоны контроля на подступичной части оси по

РД;  $Y_{нач.тр}$ ,  $Y_{кон.тр}$ ,  $Y_{тек.тр}$  – координаты начала, конца зоны трансформации и текущего положения точки трансформации по акустическому лучу. Угол раскрытия диаграммы направленности по второму боковому лепестку для 18-градусного ПЭПа составляет 23,64 градуса. В точке касания луча, исходящего под этим углом из ПЭПа, с верхним контуром шейки оси располагается начальная точка трансформации, расчетная координата которой равна 20,6 мм относительно торца зарезьбовой канавки. Конечная точка зоны трансформации совпадает с границей шейки оси (начало галтельного перехода), что соответствует 159,3 мм. В этих пределах текущая точка трансформации может принимать положения, соответствующие разным уровням диаграммы направленности. Если начало зоны приходится на второй боковой лепесток, то к концу зоны точка трансформации смещается до уровня раскрытия 0,121 по первому боковому лепестку ДН. Трансформированная поперечная волна, в зависимости от текущего положения точки трансформации, касается нижнего (по отношению к месту установки преобразователя) контура шейки оси, предподступичной части и в самом крайнем положении (конечная точка трансформации) галтельного перехода – подступичной части. Координаты отражателя, которые обнаружит трансформированная поперечная волна, будут отображаться на дефектоскопе в соответствии с расстоянием по акустическому лучу. Дефектоскоп оперирует единицами времени. Общее время распространения ультразвука, равное сумме времени прохода продольной волны до точки трансформации и времени прохода трансформированной поперечной волны до отражателя, дефектоскоп пересчитает в расстояние для продольной волны по параметрам, которые установлены в дефектоскопе по акустической оси. Моделирование в среде Mathcad позволило определить с учетом явления трансформации расчетные значения координат отражателей, расположенных на поверхности шейки оси. Для искусственного отражателя, расположенного в настроечном образце НО 01.11.002-О на расстоянии  $L = 147$  мм относительно торца зарезьбовой канавки, расчетное значение составит 333 мм по параметрам акустической оси (значение  $Y_{тек.тр}$  на рисунке 11). Значение  $Y_{тек.тр}$  показывает как раз ту координату, которую дефектоскопист увидит на экране дефектоскопа (333 мм) при реальном положении отражателя, расположенного в точке  $Y_{ш} = 147$  мм.

Влияние трансформированной волны было подтверждено экспериментально. На образце оси РУ-1 на расстоянии 147 и 156 мм от зарезьбовой канавки изготовлены два отражателя в виде пропилов. Фотографии образца приведены на рисунке 12, результаты контроля – на рисунках 13 и 14.

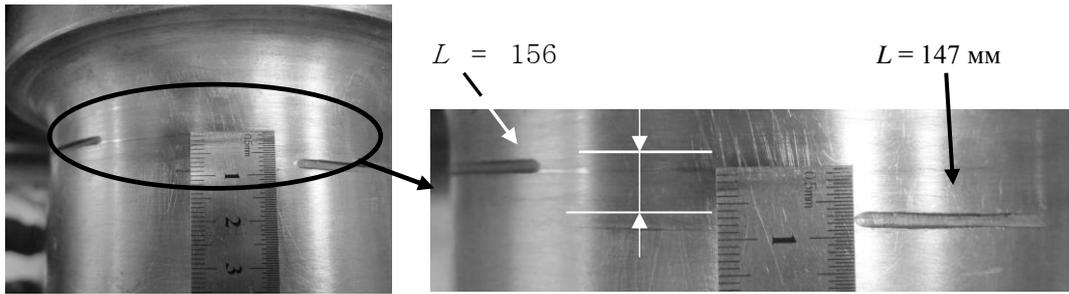


Рисунок 12 – Пропилы на шейке образца оси РУ-1, улавливаемые трансформированной поперечной волной

На рисунке 13, а показано, что отражатель на шейке оси найден при уровне условной чувствительности 40 дБ, а на рисунке 13, б – при значении 28 дБ без учета влияния шероховатости поверхности.

Расчет эквивалентной площади отражателя, выполненный по SKH-диаграмме, показал, что для отражателя, расположенного на глубине 272 мм, значение коэффициента условной выявляемости дефекта должно составлять 28 дБ (а не 40 дБ, как рекомендовано в СТО РЖД 1.11.002-2008).

Очевидно, что 40 дБ – чувствительность, рекомендованная в СТО, существенно завышена. Согласно Изменениям № 1 к СТО ФПК 1.11.001-2011 значение условной чувствительности скорректировано с 40 до 32 дБ. Различие данных 32 дБ по Изменениям № 1 и 28 дБ (полученных в нашем случае) объясняется введением поправки на влияние шероховатости торцевой поверхности оси. На рисунке 13 координата найденного отражателя составляет 331 мм в масштабе по глубине  $Y$ , что согласуется с расчетными данными ( $Y_{\text{тек.тр}} = 333$  мм, см. рисунок 11). Это доказывает, что отражатель, реально находящийся на шейке оси, найден трансформированной поперечной волной. И отраженный сигнал, безусловно, находится в пределах зон контроля, которые рекомендованы руководящими документами РД и СТО.

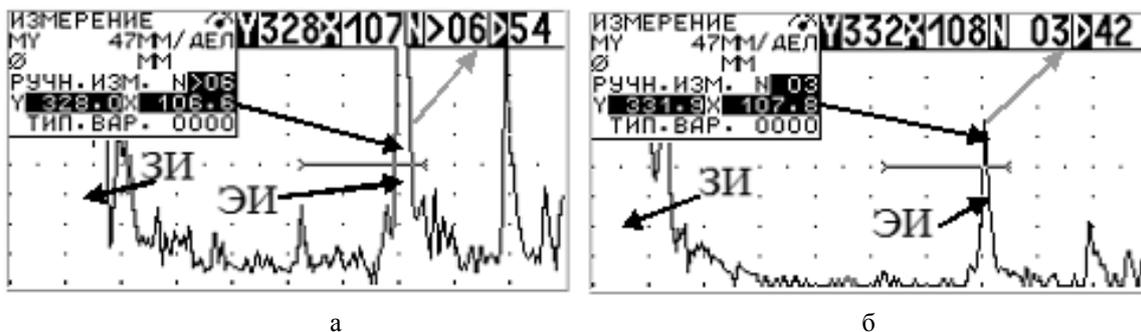


Рисунок 13 – Снимок экрана дефектоскопа при контроле подступичной части оси РУ-1 при влиянии трансформированной поперечной волны: а – эхо-сигнал от пропила на шейке оси РУ-1, расположенного на расстоянии 147 мм от резьбовой канавки при браковочной чувствительности 40 дБ; б – при браковочной чувствительности 28 дБ

На рисунке 14 представлен эхо-сигнал от пропила, смещенного относительно предыдущего на 9 мм ( $L = 156$  мм).

Рисунки 14, а, в отображают амплитуду эхо-сигнала, найденную при нормальном положении ПЭПа при двух значениях уровня браковочной чувствительности (28 и 40 дБ соответственно), а рисунки 14, б, г получены в результате «качания» ПЭПа (смещения точки ввода волны относительно поверхности шейки оси за счет поворота корпуса ПЭПа). В результате происходит резкое увеличение амплитуды сигнала как при браковочной чувствительности 40 дБ, рекомендованной СТО РЖД 1.11.002-2008, так и при браковочной чувствительности 28 дБ. Искусственное изменение положения точки ввода показывает, что отражатели найдены трансформированной волной.

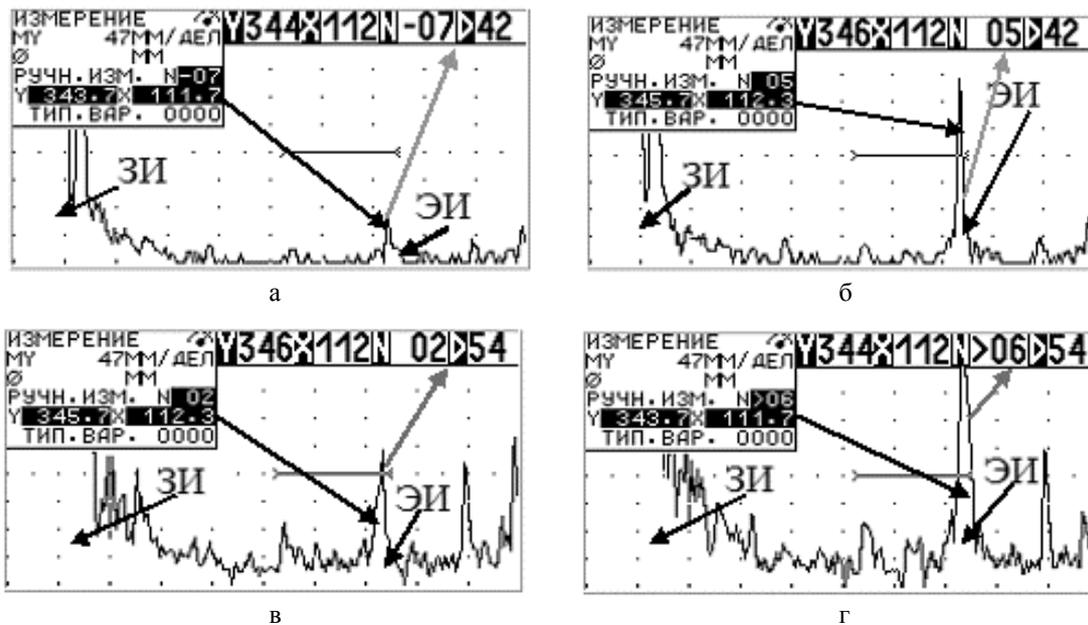


Рисунок 14 – Дефектограммы при контроле шейки оси РУ-1 при стационарном положении и смещении ПЭПа относительно этого положения при двух значениях уровней браковочной чувствительности:  
 а – изменение амплитуды эхо-сигнала от отражателя на шейке оси РУ-1 на расстоянии 156 мм от резьбовой канавки при стационарном положении ПЭПа с условной чувствительностью 28 дБ;  
 б – то же при смещении ПЭПа; в – изменение амплитуды сигнала при уровне условной чувствительности 40 дБ;  
 г – то же при смещении ПЭПа

Таким образом, в зону контроля по методу  $N_3$  (РД) попадут сигналы от отражателей, находящихся в зоне от 97 до 153 мм по длине шейки оси (см. рисунки 13, 14), что соответствует (287 – 333) мм по акустическому лучу. Однако в связи с тем, что начало зоны трансформации приходится на второй боковой лепесток, амплитуды эхо-сигналов от трансформированной поперечной волны внесут заметные помехи, начиная с середины второго бокового лепестка. Во избежание этого рекомендуется уменьшить дальнюю границу зоны контроля до

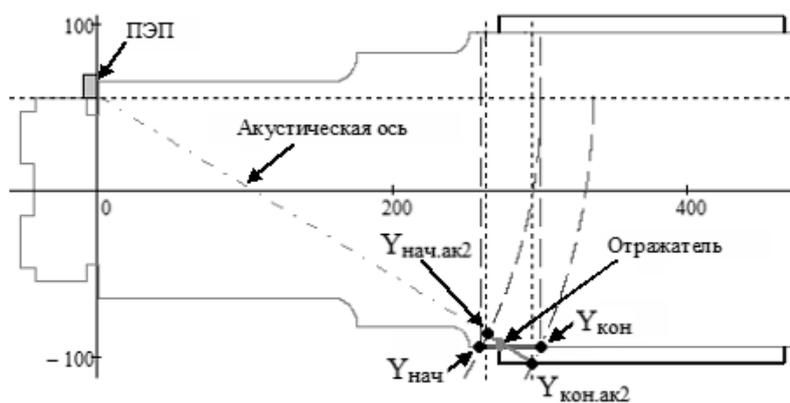


Рисунок 15 – Рекомендации по зоне контроля для РУ-1

300 мм. Например, пропил, расположенный на настроенном образце оси РУ-1, в сечении А – А на шейке оси, на расстоянии 147 мм от резьбовой канавки, устойчиво выявляется трансформированной поперечной волной, а на дефектоскопе его координата (331 мм) попадает как раз в зону контроля для внешней кромки ступицы как по РД, так и по СТО, а в зону контроля до 350 мм

падают все возможные отражатели вплоть до галтельного перехода от шейки до предподступичной части.

Для исключения излишних сигналов от трансформированной поперечной волны рекомендуется уменьшить дальнюю границу зоны контроля для оси РУ-1 до 300 мм, а для оси РУ-1Ш сместить конечную границу зоны контроля на отметку 330 мм.

Как отмечалось ранее, применение подтверждающего контроля по РД при использовании ПЭПа на 50 градусов дает возможность дополнительного контроля указанного участка

оси. В зависимости от вида освидетельствования в СТО эта часть оси проверяется дополнительно или как основной контроль (вариант AR3.1). Результаты проведенных экспериментов также доказывают необходимость этого подтверждающего контроля со стороны средней части оси 50-градусным ПЭПом, что позволит указать наличие отражателей именно в области внешней кромки ступицы. И в том случае, если подтверждающий контроль отражателей не обнаружит, а сигналы в зоне во время основного контроля имели место, необходимо провести контроль шейки оси трансформированной волной, который и покажет наличие отражателей на шейке.

Еще одним способом уменьшения влияния трансформированной поперечной волны является увеличение диаметра пьезопластины, при котором произойдет сужение диаграммы направленности. Для оси РУ-1, в отличие от РУ-1Ш, в которой контроль осуществляется с торца оси, увеличение диаметра пьезопластины невозможно в связи с конструктивными особенностями резьбовой канавки.

Таким образом, зоны контроля по РД для вагонных осей более предпочтительны, по сравнению с СТО, но рекомендуется и в них внести соответствующую коррекцию (рисунок 15). Предлагается назначить оптимальную зону контроля по акустической оси преобразователя для оси РУ-1 (260 – 300) мм, а для оси РУ-1Ш – (270 – 330) мм. С учетом дополнительной корректировки, рассмотренной на рисунке 15, эта зона изменится до (264 – 295) мм для оси РУ-1 при условии, что в параметрах настройки дефектоскопа будет установлен угол ввода, равный 27,4 градуса, и (276 – 324) мм для оси РУ-1Ш при значении угла 26,3 градуса для среднего значения координаты зоны контроля.

В соответствии с требованиями руководящего документа РД для подтверждения обнаружения недопустимого дефекта в *средней и дальней подступичной части* используется подтверждающий контроль – вариант метода  $N_6$ , при котором осуществляется «прозвучивание» оси в осевом направлении со стороны средней части поперечными волнами. Контроль осуществляется вводом поперечной волны как в сторону средней части, так и в сторону ступицы колеса (рисунок 16, в), что зависит от того, в какой из этих частей был выявлен дефект по основному варианту контроля. При обнаружении дефектов в зоне внешней кромки ступицы колеса (рисунок 16, б) или после проведения УЗК в этой зоне (рисунок 16, а) *предлагается* выполнять подтверждающий контроль подступичной части (чувствительность  $N_6$ ) при обнаружении дефектов в зоне внешней кромки ступицы колеса, напрессованного на ось (см. рисунок 16, б, в) после проведения контроля внешней кромки ступицы (см. рисунок 16, а).

СТО регламентирует технологию контроля для подтверждения обнаруженных недопустимых дефектов в *средней части* и в зонах *внутренней и внешней кромок ступицы* с использова-

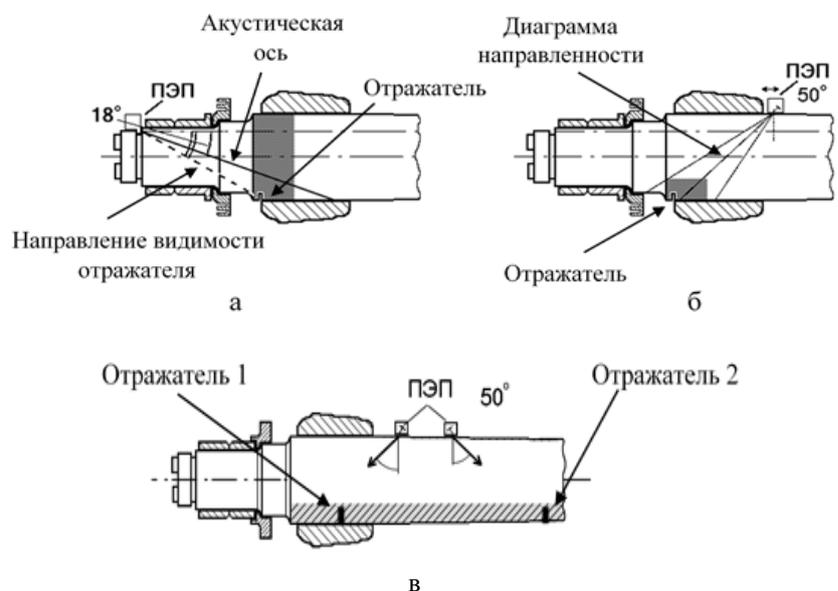


Рисунок 16 – Схема прозвучивания внешней части подступичной части оси по РД 07.09-97: а – схема прозвучивания внешней части подступичной части оси по варианту метода  $N_3$ ; б и в – подтверждение по варианту метода  $N_6$

нием варианта AR3.1 как дополнительного метода. При этом осуществляют контроль оси поперечными волнами, распространяющимися в осевом направлении. Сканирование выполняют перемещением ПЭПа по цилиндрическим поверхностям средней части (рисунок 17). В этом случае вариант AR3.1 эквивалентен подтверждающему контролю  $N_6$  по РД (см. рисунок 16, в).

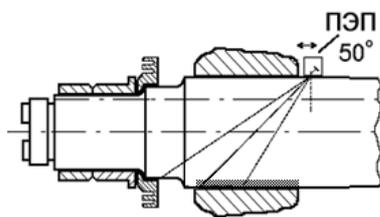


Рисунок 17 – Схема прозвучивания оси по варианту AR3.1

тельностью  $N_2$  «прозвучивания» оси в осевом направлении со стороны торца оси прямым ПЭПом (рисунок 18). Следует отметить, что для установленных значений параметров зоны контроля 100 – 400 мм осуществляется контроль только шейки оси в зонах: от 100 мм до

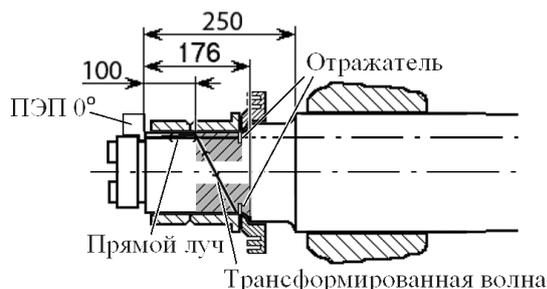


Рисунок 18 – Схема прозвучивания ближней шейки и предподступичной части оси РУ-1 по варианту метода  $N_2$

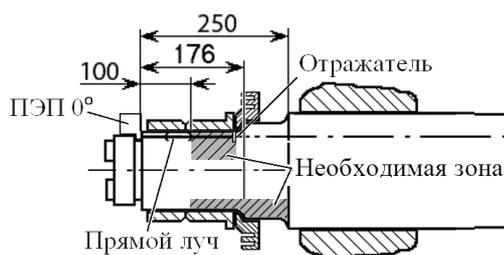


Рисунок 19 – Схема прозвучивания оси РУ-1 по варианту AR1.2

конец – 516 мм. С целью унификации параметров контроля шейки для различных типов осей значение конечной координаты рекомендуется принять равным 516 мм.

В соответствии с требованиями СТО контроль *ближней шейки и предподступичной части* оси соответствует варианту AR1.2, в котором верхняя граница зоны контроля ограничена значением 250 мм. В этом случае контроль шейки оси (рисунок 19) выполняется только в прямой «видимости» отражателя (верхняя заштрихованная область). Значение границы 250 мм не позволяет обнаруживать дефекты трансформированным лучом. Для выполнения контроля шейки и предподступичной части оси в соответствии с вариантом AR1.2 (верхняя и

Кроме этого после обнаружения дефектов в зоне внешней кромки ступицы колеса, напрессованного на ось, в связи с возможным влиянием трансформированной поперечной волны на результаты контроля зоны внешней кромки ступицы в качестве подтверждения предлагается дополнительно выполнить контроль шейки оси, не изменяя положения преобразователя.

По технологии контроля, регламентируемой РД, для контроля *ближней шейки и предподступичной части* оси используется вариант с чувстви-

тельностью  $N_2$  «прозвучивания» оси в осевом направлении со стороны торца оси прямым ПЭПом (рисунок 18). Следует отметить, что для установленных значений параметров зоны контроля 100 – 400 мм осуществляется контроль только шейки оси в зонах: от 100 мм до начала галтельного перехода (прямой луч, продольная волна) и от 100 мм до начала предподступичной части (176 мм по длине оси РУ1) с учетом контроля трансформированной поперечной волной противоположной поверхности шейки относительно положения ПЭПа. Результаты расчета в среде Mathcad позволили определить значения координат, соответствующие указанным точкам. Для координаты начала зоны (100 мм) при контроле трансформированной волной расчетное значение расстояния равно 298 мм. Для начала предподступичной части (176 мм) расчетное значение составляет 400 мм. Контроль же предподступичной части осуществляется только трансформированной волной и в данном случае не может быть выполненным из-за ограничения длины зоны. Для контроля предподступичной части необходимо установить значение верхней границы зоны, равное 500 мм, что соответствует расчетному значению суммарного расстояния для конечной координаты 250 мм по длине оси. Для оси РУ-1Ш необходимо установить следующие параметры зоны контроля: начало – 100 мм,

нижняя заштрихованные области) необходимо скорректировать значение верхней границы зоны до значения 516 мм.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Произведен расчет и рекомендована необходимая поправка по зоне контроля для осей РУ-1 и РУ-1Ш, связанная с удалением акустической оси 18-градусного пьезопреобразователя от зоны контроля.

2. Предложены варианты совершенствования методики контроля ближней подступичной части оси в зоне под внешней кромкой ступицы, позволяющие более точно определять координаты отражателей.

3. Доказана нецелесообразность увеличения зоны контроля, определенной в СТО по сравнению с РД.

4. Получены и рекомендованы оптимальные размеры зоны контроля для вагонных осей РУ-1 и РУ-1Ш с учетом акустической тени от галтели и влияния трансформированной поперечной волны, отраженной от шейки оси.

5. Получены значения параметров зоны для контроля шейки и предподступичной части оси.

### *Список литературы*

1. РД 07.09-97. Руководство по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов [Текст] / Научно-исследовательский ин-т мостов ПГУПСа, Всероссийский научно-исследовательский ин-т железнодорожного транспорта. – М., 1997. – 27 с.

2. СТО РЖД 1.11.002-2008. Контроль неразрушающий. Элементы колесных пар вагонов. Технические требования к ультразвуковому контролю [Текст] / Научно-исследовательский ин-т мостов и дефектоскопии Федерального агентства железнодорожного транспорта. – М., 2009. – 40 с.

### *References*

1. RD 07.09-97. Manual on Integrated ultrasonic inspection car wheel pairs [RD 07.09-97. Rukovodstvo po kompleksnomu ul'trazvukovomu kontroliu kolesnykh par vagonov]. Moscow, 1997, 27 p.

2. Railways stations 1.11.002-2008. Nondestructive testing. Elements of a car wheel pairs. Technical requirements for ultrasonic testing [STO RZhD 1.11.002-2008. Kontrol' nerazrushaiushchii. Elementy kolesnykh par vagonov. Tekhnicheskie trebovaniia k ul'trazvukovomu kontroliu]. Moscow, 2009, 40 p.

УДК 629.4.027

А. Е. Дрягилев

## **АНАЛИЗ НЕИСПРАВНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОВЗОВ 2ЭС6**

*В данной статье приведен анализ отказов механического оборудования магистрального электровоза 2ЭС6 «Синара». Целью работы является анализ основных неисправностей механической части, причин их возникновения. Исследование проводилось на базе ремонтного локомотивного депо Московка с использованием статистических методов оценки. Данные для анализа взяты из формы первичного учета ТУ-29 «Книга повреждений и неисправностей локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава и их оборудования». По результатам исследования на механическое оборудование приходится 8,62 % от всех отказов. Средняя наработка на отказ механической части локомотива L<sub>2</sub> составляет 156221 км. Анализ отказов механического оборудования показал, что около 50 % всех неисправностей связано с износом поверхности катания колесной пары. Более трети всех отказов связано с односторонним износом гребня бандажа. Одной из причин отказов является нарушение развески электровоза при постройке на заводе-изготовителе и в процессе эксплуатации,*

ремонта. Средняя наработка до отказа колесной пары по причине одностороннего износа бандажа  $L_1 = 279874$  км. Около 20 % отказов механического оборудования приходится на разрыв вентиляционных патрубков. Анализ показал, что проблема имеет сезонный характер и проявляется в зимнее время года, что связано с конструктивным недостатком вентиляционных патрубков. Остальные виды отказов механического оборудования имеют меньшую статистическую значимость. Для сравнения в статье проанализировано распределение механических неисправностей электровозов ВЛ10. Полученные зависимости могут являться исходной информацией для формирования системы ремонта локомотивов 2ЭС6 «Синара» по техническому состоянию.

В локомотивном эксплуатационном депо Московка идет обновление парка эксплуатируемых электровозов. На смену грузовым электровозам серий ВЛ10 и ВЛ11 поступают современные локомотивы 2ЭС6 «Синара». Электровозы 2ЭС6 эксплуатируются на объединенном полигоне Свердловской, Западно-Сибирской и Южно-Уральской железных дорог. За 2012 – 2013 гг. в омское депо поступило 176 новых грузовых магистральных электровозов постоянного тока. В 2014 г. планируется поступление еще 100 новых электровозов серии 2ЭС6. Таким образом, будет полностью завершена программа обновления парка эксплуатируемых в депо электровозов. Грузовой электровоз 2ЭС6 отличается высокими потребительскими, эксплуатационными свойствами. Согласно проектной документации локомотив имеет ряд преимуществ по сравнению с электровозом ВЛ11:

мощность и сила тяги в продолжительном режиме увеличены на 30 %, что позволяет водить составы повышенного веса (до 8500 т);

расход энергии снижен на 10 %;

за счет конструктивных особенностей на 15 % снижена трудоемкость ремонта и увеличены сроки межремонтных пробегов.

В последние годы существует тенденция к повышению массы грузовых поездов и увеличению интенсивности пассажирских перевозок при постоянно возрастающих требованиях к обеспечению безопасности движения. Поэтому одной из важнейших задач локомотивного хозяйства является обеспечение надежной работы локомотивного парка.

Повышение надежности локомотивов, их сборочных единиц, узлов и деталей обеспечивается в период проектирования, в процессе изготовления и в период эксплуатации. Согласно ГОСТ 27.002-89 [1] под надежностью понимается свойство технического объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. На железнодорожном транспорте наряду с вышеупомянутым государственным стандартом используется отраслевой стандарт ОСТ 32.46-95 [2], в котором дается расшифровка основных понятий надежности применительно к локомотивам. Для локомотивов основной требуемой функцией является выполнение эксплуатационной работы (соответствующей регламентируемому назначению) с реализацией свойств, установленных техническими условиями, при обеспечении безопасности движения.

Одним из важных показателей, влияющих на безопасность движения, является надежность механической части локомотива. Механическое оборудование предназначено для реализации тяговых и тормозных усилий, развиваемых электровозом, размещения электрического и пневматического оборудования, обеспечения заданного уровня комфорта, удобных и безопасных условий работы локомотивных бригад.

Механическая часть воспринимает динамические нагрузки, возникающие при движении электровоза по кривым и прямым участкам пути. Для обеспечения нормальной и безаварийной работы механическая часть должна быть достаточно прочной, должна отвечать требованиям безопасности движения и правилам технической эксплуатации железных дорог. Механическое оборудование должно находиться в исправном состоянии и сохранять работоспособное состояние, обеспечивать удобство ремонта отдельных частей. Для восстановления большей части агрегатов, узлов локомотивов, особенно механического оборудования, необ-

ходимы постановка локомотива в депо с изъятием его из эксплуатации и проведение трудоемких монтажно-демонтажных работ.

Проведем анализ технического состояния механического оборудования грузовых электровозов 2ЭС6 «Синара». Первичные данные для анализа взяты из формы учета ТУ-29 «Книга повреждений и неисправностей локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава и их оборудования». За 12 месяцев 2013 г. в ремонтном локомотивном депо Московка зафиксировано 927 случаев неисправностей оборудования электровозов 2ЭС6. Из них 80 случаев приходится на неисправности механической части, что составляет 8,62 % от всех неисправностей.

Распределение основных видов неисправностей механического оборудования представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Основные неисправности механического оборудования

Вид неисправного оборудования	Количество случаев, ед.	Процентное соотношение неисправностей, %
Нагрев буксы колесно-моторного блока локомотива	2	2,5
Неисправность тормозной рычажной передачи	5	6,25
Автосцепное устройство СА-3	7	8,75
Разрыв вентиляционных патрубков ТЭД	15	18,75
Повреждение кожуха зубчатой передачи	2	2,5
Неисправность гидродемпфера	7	8,75
Односторонний износ гребня бандажа колесной пары	29	36,25
Повреждения кузова электровоза	2	2,5
Отсутствие трубки для запрессовки моторно-якорных подшипников	1	1,25
Ползуны, выщербины, провороты бандажей колесных пар	10	12,5
Всего	80	100

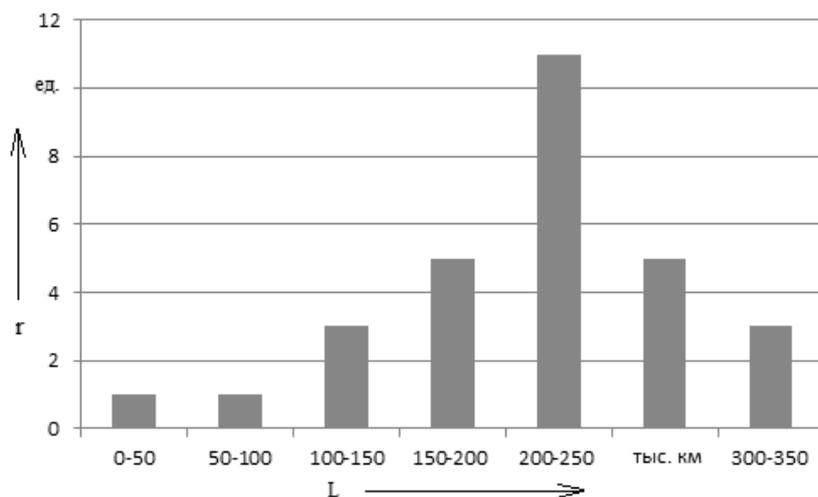
Как видно из данных таблицы 1, больше всего неисправностей механического оборудования приходится на неисправности поверхности катания колесной пары локомотива. На односторонний износ гребня бандажа приходится 29 случаев неисправностей, что составляет 36,25 % от общего количества, и десять случаев неисправностей приходится на ползуны, выщербины на поверхности катания колесной пары и провороты на поверхности катания колесных пар, что составляет 12,5 % от общего количества неисправностей.

Стоит отметить высокую интенсивность износа гребня бандажа электровоза 2ЭС6 №194, которая достигала 0,80 мм на 10 тыс. км пробега локомотива. Оптимальной величиной износа гребня колесной пары является 0,25 – 0,30 мм на 10 тыс. км пробега, которой хватило бы, чтобы бандаж доработал без его смены до планового ремонта. Результаты обмера бандажей колесных пар электровоза 2ЭС6 №194 представлены в таблице 2. После обнаружения максимально допустимого износа гребня бандажа в эксплуатации в 25 мм производилась обточка бандажей колесных пар без выкатки их из-под локомотива. После обточки данных колесных пар разница диаметров бандажей в тележке и под локомотивом становилась равной более 20 мм, что недопустимо в эксплуатации, по этой причине производилась замена колесно-моторного блока локомотива. Одной из причин такого интенсивного износа гребня бандажа является нарушение развески электровоза при постройке на заводе. Вследствие неправильной развески происходит перераспределение сил, действующих на колеса, возникают дополнительные силы в поперечном направлении.

Таблица 2 – Параметры бандажей колесных пар электровоза 2ЭС6 №194

Дата обмера	Порядковый номер колесной пары (КП) от кабины управления №1	Толщина бандажа (обода), мм		Толщина гребня, мм		Прокат, мм		Пробег локомотива, км
		левая сторона	правая сторона	левая сторона	правая сторона	левая сторона	правая сторона	
21.03.2013	1	88	87	30,5	25	1,5	1,5	114097
21.03.2013	2	86	86	30	25	1	2	114097
25.05.2013	1	84	84	30	25	0	0	142635
19.07.2013	2	82	82	29	24	0	1	173251
06.12.2013	1	84	82	31	24	0	1,5	243221
06.12.2013	2	90	90	30	25	1,5	2	243221

Распределение отказов, связанных с односторонним износом гребня бандажа в зависимости от пробега колесной пары, представлено на рисунке.



Гистограмма распределения неисправностей по причине одностороннего износа гребня бандажа в зависимости от пробега колесной пары

Как видно из гистограммы, больше всего отказов по причине предельного износа гребня бандажа колесных пар приходится на пробег 200 – 250 тыс. км. Восстановление профиля бандажа выполняется постановкой локомотива на техническое обслуживание ТО-4, где производится обточка колесных пар без их выкатки из-под локомотива.

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа. Согласно ОСТ 32.46-95 [2] этот показатель характеризует безотказность единицы тягового подвижного состава (далее – ЕТПС) или их однотипных сборочных единиц, определяемую по наработкам до первого отказа. В случае, когда за рассматриваемый период эксплуатации не все объекты имели первые отказы, средняя наработка до отказа  $\bar{L}_1$  определяется по формуле:

$$\bar{L}_1 = \frac{\sum_{i=1}^r l_i + (N - r) \cdot l_k}{r}, \quad (1)$$

где  $N$  – число наблюдаемых ЕТПС;

$r$  – число первых отказов за рассматриваемый период;

$l_k$  – средняя наработка ЕТПС, не имевших отказов за рассматриваемый период, км;

$l_i$  – наработка до первого отказа, км.

Средняя наработка до отказа колесной пары по причине одностороннего износа гребня бандажа  $\bar{L}_1$  составила 279874 км.

Стоит отметить, что 75% электровозов 2ЭС6, заходивших на ремонт в ТЧР-1 Московка в 2013 г. имели пробеги от постройки менее 200 тыс. км и только 3 % электровозов – пробеги более 300 тыс. км, т. е. 97 % локомотивов 2ЭС6 не прошли ремонта в объеме ТР-300.

За 12 месяцев 2013 г. у 29 электровозов серии 2ЭС6 приписки ТЧЭ-2 Омск обнаружен односторонний износ гребня бандажа колесной пары. По этой причине общее время простоя локомотивов на неплановом ремонте составило 2128,5 ч, среднее время простоя – 73,75 ч. Во всех случаях после обточки колесных пар производилась замена колесно-моторных блоков по причине разности диаметров более 20 мм между колесными парами в одной тележке локомотива.

На разрыв вентиляционных патрубков приходится 15 случаев неисправностей, что составляет 18,75 % от общего количества неисправностей механической части электровозов 2ЭС6. Неисправности, связанные с разрывом вентиляционных патрубков, имеют сезонный характер, все случаи приходились на зимние месяцы. Данный вид неисправности вызван некачественным изготовлением и конструктивным недостатком вентиляционных патрубков. Ремонт поврежденных патрубков производится заменой их на новые.

Средняя наработка на отказ – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Данный показатель используется для характеристики безотказности ЕТПС и ремонтируемых сборочных единиц с учетом как первых, так и последующих отказов.

Средняя наработка на отказ  $\bar{L}$  определяется по формуле, км:

$$\bar{L}_2 = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{\sum_{i=1}^N r_i}, \quad (2)$$

где  $l_i$  – наработка  $i$ -го объекта, км;

$r_i$  – число отказов  $i$ -го объекта, произошедших за период наблюдения.

Для механического оборудования электровоза 2ЭС6 средняя наработка на отказ  $\bar{L}_2$  составила 143250 км.

Для сравнения было проанализировано распределение механических неисправностей электровозов ВЛ10, заходивших на ремонт в ТЧ-1 Московка за 2013 г. Всего за 2013 г/в депо Московка зафиксировано 1232 случая непланового ремонта оборудования электровоза ВЛ10, 129 случаев приходится на механическое оборудование, что составляет 10,47 % от общего количества неисправностей. Распределение механических неисправностей электровозов ВЛ10 представлено в таблице 3.

Как видно из данных таблицы 3, на неисправности, связанные с поверхностью катания бандажа колесной пары, приходится 34 % случаев от всех неисправностей механического оборудования, из них только один случай связан с односторонним износом гребня бандажа.

Анализ отказов механического оборудования электровоза 2ЭС6 «Синара» за 2013 г. показал, что около половины неисправностей механической части связано с износом поверхности катания колесной пары. Более трети отказов связано с односторонним износом гребня бандажа колесной пары. Данная проблема не нова, но с вводом в эксплуатацию электровозов повышенной мощности она стала еще более острой. Интенсивность износа гребня влияет на долговечность бандажей колесных пар. От долговечности бандажей зависит срок службы всей колесной пары электровоза. Так как при предельном износе бандажей необходимо про-

изводить выкатку колесно-моторного блока, что не только оставляет эксплуатационные депо ОАО «РЖД» без работоспособного электровоза, но и добавляет работы ремонтным локомотивным депо, а значит, приводит к росту себестоимости перевозок и снижению конкурентоспособности железнодорожного транспорта.

Таблица 3 – Основные неисправности механического оборудования ВЛ10

Вид неисправного оборудования	Количество случаев, ед.	Процентное соотношение неисправностей, %
Неисправность тормозной рычажной передачи	2	1,55
Повреждение кузова электровоза	5	3,88
Нагрев буксы колесно-моторного блока локомотива	10	7,75
Автосцепное устройство СА-3	2	1,55
Разрыв вентиляционных патрубков ТЭД	3	2,33
Повреждение кожуха зубчатой передачи	42	32,56
Отсутствие болта крепления кожуха зубчатой передачи	12	9,30
Ползуны, выщербины, провороты бандажей	43	33,33
Излом листовой рессоры	4	3,10
Неисправности с тележкой	5	3,88
Односторонний износ гребня бандажа	1	0,78
Всего	129	100,00

В ходе анализа получены статистические зависимости, характеризующие наработку до отказа и наработку на отказ механического оборудования электровоза 2ЭС6. Полученные зависимости могут являться исходной информацией для формирования системы ремонта локомотивов по техническому состоянию.

Автором ставится задача по исследованию причин повышенного износа бандажей подвижного состава, а также факторов, влияющих на повышенный износ гребня бандажей локомотивов повышенной мощности.

### Список литературы

1. ГОСТ Р 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст] / Ин-т машиноведения АН СССР. – М., 1990. – 24 с.
2. ОСТ 32.46-95. Тяговый подвижной состав железнодорожного транспорта. Надежность. Термины и определения [Текст] / Главное управление локомотивного хозяйства МПС РФ. – М., 1995. – 58 с.
3. Галкин, В. Г. Надежность тягового подвижного состава: Учебное пособие [Текст] / В. Г. Галкин, В. П. Парамзин, В. А. Четвергов. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
4. Четвергов, В. А. Надежность локомотивов: Учебник [Текст] / В. А. Четвергов, А. Д. Пузанков. – М.: Маршрут, 2003. – 415 с.

### References

1. *Nadezhnost' v tehnikе. Osnovnyе ponjatiја. Terminy i opredelenija, GOST 27.002-89* (Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions, State Standart 27.002-89). Moscow, Standarty, 1990, 24 p.
2. *Tjagovyj podvizhnoj sostav zheleznodorozhnogo transporta. Nadezhnost'. Terminy i opredelenija, OST 32.46-95* (Traction rolling stock of railway transport. Dependability. Terms and definitions, OST 32.46-95). Moscow, 1995, 58 p.
3. Galkin V. G., Paramzin V. R., Chetvergov V. A. *Dependability of locomotives* (Nadezhnost' tjagovogo podvizhnogo sostava). Moscow: Transport, 1981, 184 p.
4. Chetvergov V. A., Puzankov A. D. *Dependability locomotives* (Nadezhnost' lokomotivov). Moscow: Marshrut, 2003, 415 p.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСЦИЛЛИРУЮЩИХ РЕЖИМОВ ИНФРАКРАСНОГО ЭНЕРГОПОДВОДА В ТЕХНОЛОГИИ КАПСУЛИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ПРИ РЕМОНТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований по выявлению рациональных режимов ИК-энергоподвода в технологии капсулирования изоляции обмоток электрических машин (ЭМ) тягового подвижного состава (ТПС). В данной работе опубликованы результаты по сравнению эффективности использования различных осциллирующих режимов инфракрасного (ИК) энергоподвода в процессе капсулирования изоляции обмоток ЭМ ТПС на технологической установке при их деповском и заводском ремонте. Объективными факторами при сравнении режимов капсулирования являются такие параметры, как электрическая прочность и цементирующая способность.*

В представленных нами ранее работах описывались исследования по сравнению эффективности использования конвективного и терморadiационного методов капсулирования изоляции обмоток при ремонте электрических машин тягового подвижного состава [1]. Терморadiационный метод в этих исследованиях был реализован в непрерывном режиме ИК-энергоподвода, когда пропитанная изоляция постоянно находилась под воздействием ИК-излучения, на лабораторном стенде по физическому моделированию процесса капсулирования изоляции обмоток ЭМ ТПС.

Известно, что капиллярно-пористые коллоидные тела, такие как пропитанная в лаке или компаунде изоляция обмоток ЭМ ТПС, при капсулировании ИК-излучением имеют значительные градиенты содержания смолы и растворителей (до 90 % при пропитке лаками) и интенсивно прогретаются [2].

Быстрое повышение температуры пропитанной изоляции после критической точки приводит к длительному воздействию высокой температуры на изоляцию, что вызывает ухудшение ее технологических свойств.

Значительный температурный градиент, направленный противоположно градиенту содержания смолы и растворителя, замедляет перемещение растворителя из внутренних слоев пропитанной изоляции к поверхности, что также отрицательно влияет на качество процесса капсулирования.

Отсюда возникает необходимость в прерывистом (осциллирующем) режиме ИК-энергоподвода, т. е. в сочетании нагрева пропитанной изоляции ИК-излучением с охлаждением ее воздухом.

В период облучения изоляция нагревается со значительным испарением растворителя в поверхностных слоях, а в период паузы она охлаждается в результате испарения растворителя за счет аккумулированной теплоты. Так как испарение происходит в основном в поверхностных слоях изоляции, то в период паузы температура на ее поверхности резко снижается и температурный градиент меняет свое направление (температура внутри пропитанной изоляции больше, чем на ее поверхности). В этом случае температурный градиент будет не замедлять, а ускорять подвод растворителя к поверхности изоляции, поэтому содержание растворителя в центре изоляции в период паузы уменьшается.

Следовательно, в период облучения к поверхности изоляции подводится теплота, необходимая для испарения растворителя, а в период паузы растворитель перемещается из центральных слоев к поверхностным. В этом случае нагрев изоляции незначительный (температурный градиент мал) и термодиффузия не препятствует перемещению растворителя.

Основными параметрами осциллирующего режима ИК-энергоподвода являются скважность и цикличность. Параметр скважности характеризует осциллирующий режим с позиции широтного регулирования по временной составляющей периода нагрева сегмента лобовой части обмотки ЭМ ТПС

$$q = \frac{\tau_{\text{осц}}}{\tau_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{осц}}$  – период осцилляции, мин (рисунок 1);

$\tau_{\text{н}}$  – продолжительность облучения (нагрева сегмента лобовой части обмотки ИК-излучателем), мин,

$$\tau_{\text{н}} = \tau_{\text{осц}} - \tau_{\text{п}}, \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{п}}$  – продолжительность паузы (охлаждения сегмента лобовой части обмотки), мин.

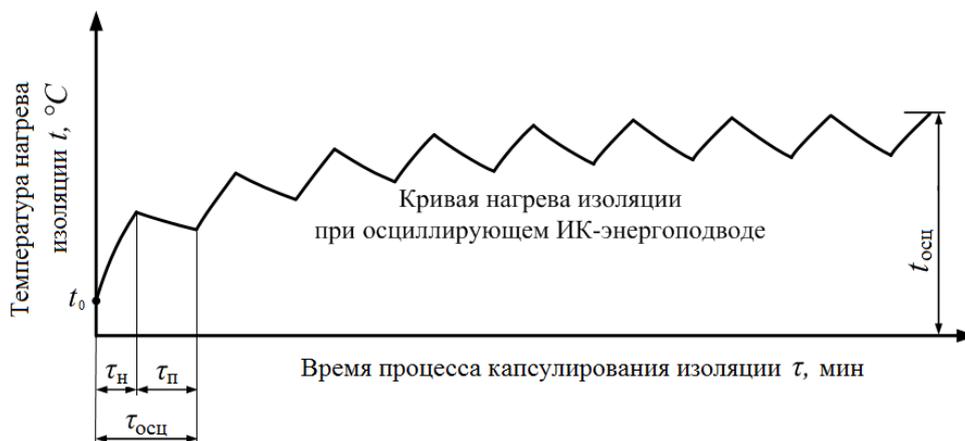


Рисунок 1 – Кривая нагрева изоляции при осциллирующем режиме ИК-энергоподвода в технологии капсулирования изоляции обмоток ЭМ ТПС:  $t_0$  – начальная температура нагрева,  $t_{\text{осц}}$  – конечная температура нагрева при осциллирующем режиме

Цикличность же, в свою очередь, характеризует осциллирующий режим с позиции частотного регулирования скорости вращения якоря ЭМ ТПС на установке (т. е. количества периодов продолжительности облучения  $\tau_{\text{н}}$  за один оборот):

$$N_{\text{ц}} = \frac{N_{\text{осц}}}{\tau_{\text{ц}}}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{осц}}$  – количество периодов осцилляции  $\tau_{\text{осц}}$  (оборотов якоря на установке);

$\tau_{\text{ц}}$  – время процесса капсулирования изоляции обмоток ЭМ ТПС.

При неизменной скважности показатель цикличности может изменяться в широких пределах (по частотной характеристике) в зависимости от скорости вращения якоря на установке.

Были проведены экспериментальные исследования по выявлению рациональных осциллирующих режимов ИК-энергоподвода в технологии капсулирования при изменении параметра цикличности. Исследования осуществлялись на реальной установке по капсулированию изоляции (рисунок 2).

Установка состоит из двух основных частей: основания, на котором располагается якорь 1 ТЭД типа НБ-514Б электровоза серии «Ермак», и генератора теплового излучения 2 (см. рисунок 2). Якорь одним концом вставляется в буксу 7 и опирается на резиновые ролики 6, через муфту 5 и редуктор 4 соединяется с асинхронным двигателем 8. Управление работой установки осуществляется с помощью пульта 3.

Особенностью установки является наличие управляемого генератора теплового излучения, питающегося от трехфазной сети напряжением 380 В, состоящего из шести групп регулируемых облучателей (по две группы на каждую фазу), которые представляют собой совокупность ИК-излучателей и рефлекторов-отражателей (рисунок 3).

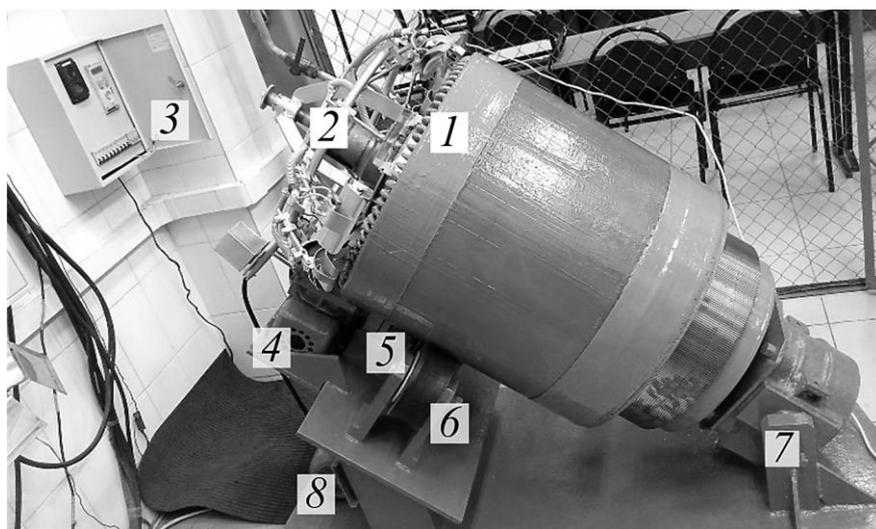


Рисунок 2 – Общий вид опытно-производственной установки для капсулирования изоляции лобовых частей обмоток якорей ТЭД электровозов

Регулирование расположения облучателей над обмоткой якоря ТЭД осуществляется путем изменения длины крепления облучателя 1 и углов наклона рефлектора  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

Суть эксперимента заключалась в поочередном проведении процесса капсулирования изоляционной ленты ЛЭС-0,1-20, пропитанной в лаке ФЛ-98 и компаундах Эпласт 155, ПК-11 и ПК-21, на данной установке в осциллирующем режиме ИК-энергоподвода сначала только коротковолновыми ИК-излучателями, затем только средневолновыми и в конце – комбинацией этих двух видов ИК-излучателей в спектрально-осциллирующем режиме ИК-энергоподвода [3].

Образцы ленты ЛЭС, пропитанные в лаке ФЛ-98 и компаундах Эпласт-155, ПК-21 и ПК-11, размещались на лобовой части обмотки якоря, как показано на рисунке 4. Данное расположение было обусловлено необходимостью проверки эффективности процесса капсулирования лишь по вершине лобовой части обмотки как на самом уязвимом от воздействия негативных факторов (теплота, влага, пыль и т. д.) месте [4].

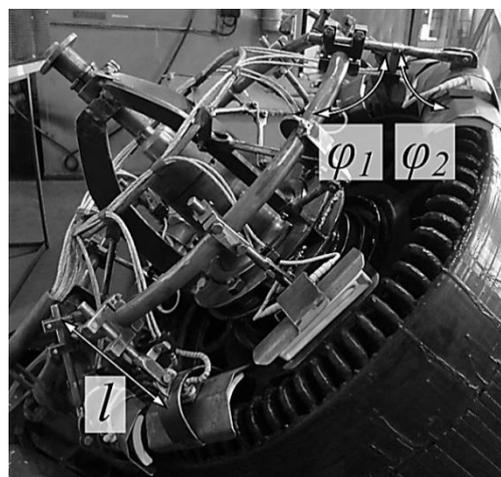


Рисунок 3 – Общий вид генератора теплового излучения

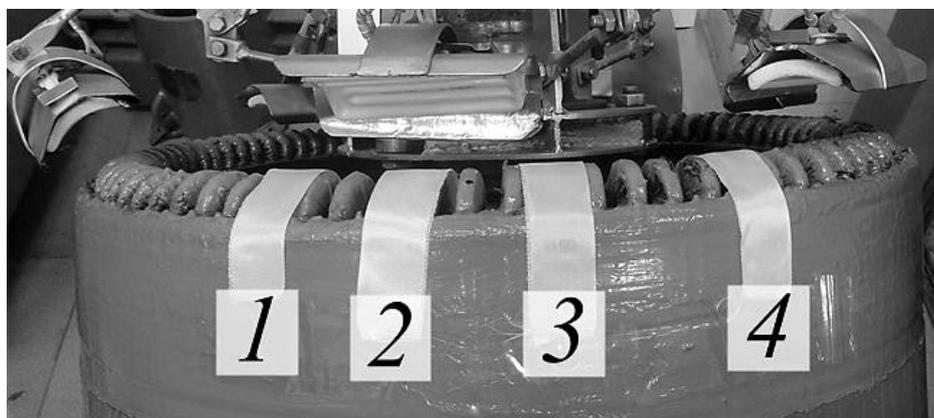


Рисунок 4 – Размещение пропитанных в лаке ФЛ-98 (1) и компаундах Эпласт 155 (2), ПК-21 (3), ПК-11 (4) образцов ленты ЛЭС на лобовой части обмотки якоря ТЭД

Каждый из режимов проводился при различных частотах вращения якоря (0,46, 2,3 и 4,6 об/мин), соответствующих значениям частот питающего напряжения 5, 25 и 50 Гц при работе привода установки от преобразователя частоты (режимы с частотой менее 5 Гц не рассматривались, так как нагрев изоляции был слишком интенсивный и максимальная температура нагрева достигалась практически мгновенно).

Процесс капсулирования для всех режимов занимал 30 мин. Скважность периода работы ИК-излучателей при этом оставалась неизменной и равнялась 2,4; изменялся лишь показатель цикличности, который для режима при 5 Гц составлял 2,8 периода в минуту, для 25 Гц – 14, а для 50 Гц – 28 периодов в минуту.

Сопоставимость данных экспериментальных исследований обеспечивалась одинаковой дозой  $A$  облучения для всех вариантов запланированных опытов с обязательным контролем напряжения, подводимого к генератору теплового излучения, МДж/мм<sup>2</sup>:

$$A = \frac{P \cdot \tau_n}{S}, \quad (4)$$

где  $P$  – мощность ИК-излучателя, Вт;

$\tau_n$  – полный период облучения (за время работы, 30 мин), с;

$S$  – площадь лобовой части обмотки якоря тягового электродвигателя (ТЭД), мм<sup>2</sup>.

Проведенный расчет дозы облучения при 30-минутном процессе капсулирования изоляции лобовых частей обмоток якоря ТЭД типа НБ-514Б показал, что для всех заданных режимов доза облучения практически одинакова и составляет 1,4 МДж/мм<sup>2</sup>.

На следующем этапе данного эксперимента образцы изоляционной ленты проверялись на пробивное напряжение на аппарате АИИ-70. Результаты проверки представлены в виде гистограмм средних арифметических значений пробивного напряжения в зависимости от режимов ИК-энергоподвода и скорости вращения якоря ТЭД на установке (рисунки 5 – 7).

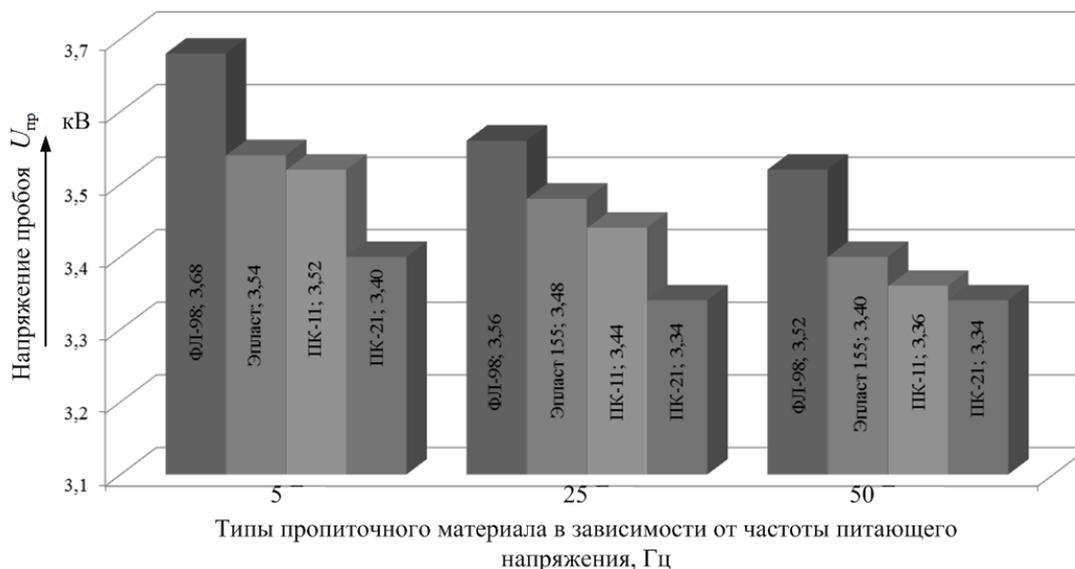


Рисунок 5 – Гистограмма средних арифметических значений пробивного напряжения при осциллирующем ИК-энергоподводе с коротковолновым излучением

По результатам проведенных исследований по определению электрической прочности изоляционной ленты ЛЭС 0,1-20 можно сделать несколько выводов:

1) средние значения пробивного напряжения изоляционной ленты, закапсулированной при осциллирующем режиме, в среднем на 10 % выше значений пробивного напряжения ленты, закапсулированной при непрерывном ИК-энергоподводе [1];

2) наибольшие показатели электрической прочности изоляционной ленты были получены при капсулировании в спектрально-осциллирующем режиме ИК-энергоподвода с чередо-

ванием средне- и коротковолновых ИК-излучателей при наименьшем количестве периодов облучения (при минимальной частоте вращения якоря ТЭД 0,46 об/мин). Это объясняется несколькими факторами: во-первых, при использовании двух видов ИК-излучателей (средне- и коротковолновых) первые обеспечивают более равномерное по толщине слоя пропитанной изоляции распределение тепла, а вторые – более быстрое проникновение ИК-излучения в нижние слои пропиточного материала. Во-вторых, при скорости вращения якоря ТЭД 0,46 об/мин, соответствующей частоте питающего напряжения 5 Гц, длительность периода паузы (охлаждения) пропитанной изоляции составляет 76 с. В момент паузы за счет термодиффузии температура внутри пропитанной изоляции успевает полностью выровняться по всей толщине. Это способствует равномерности процесса полимеризации и более качественному его протеканию.

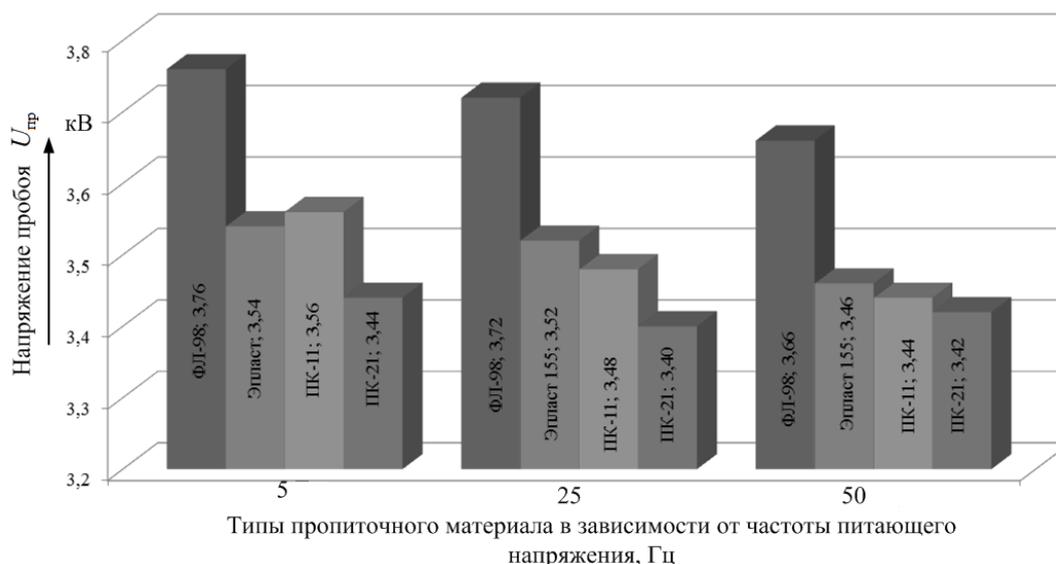


Рисунок 6 – Гистограмма средних арифметических значений пробивного напряжения при осциллирующем ИК-энергоподводе со средневолновым изучением

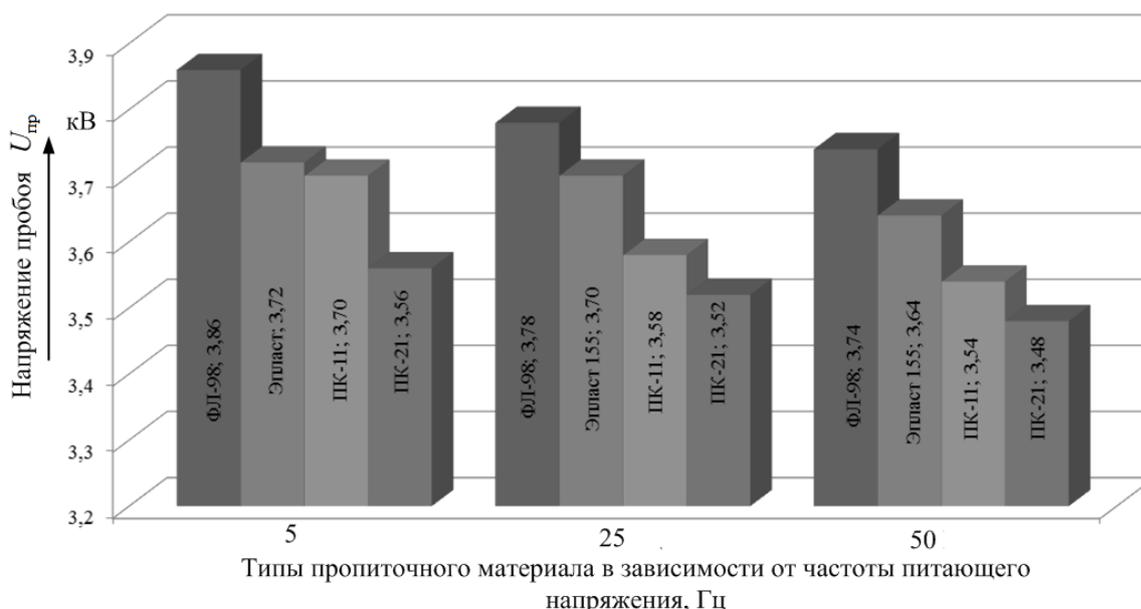


Рисунок 7 – Гистограмма средних арифметических значений пробивного напряжения при спектрально-осциллирующем режиме ИК-энергоподвода с чередованием средне- и коротковолнового изучения

Заключительным этапом исследований являлась проверка твердости закапсулированных образцов изоляционной ленты ЛЭС. Результаты исследований представлены на рисунке 8.

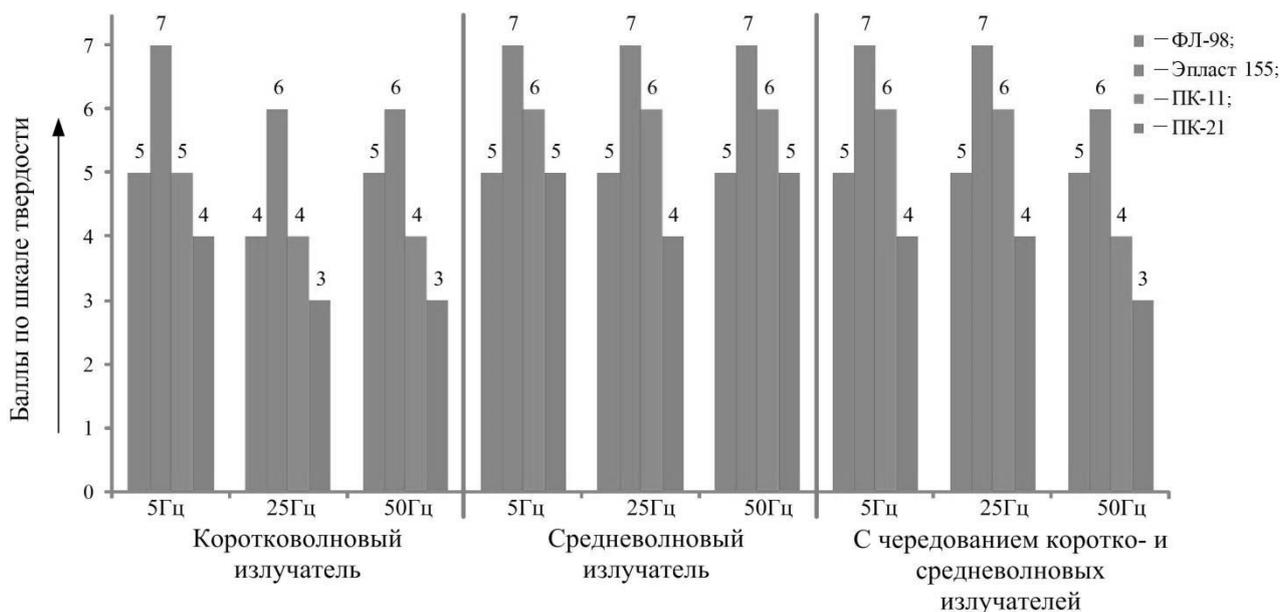


Рисунок 8 – Твердость закапсулированной изоляционной ленты ЛЭС

По данным результатам (см. рисунок 8) можно сделать вывод о том, что наибольшую твердость имеет закапсулированная изоляционная лента, пропитанная в компаунде Эпласт 155. Из рисунка 8 видно, что изменение скорости вращения якоря при различных осциллирующих режимах в значительной мере не влияет на показатели твердости закапсулированной изоляции, так как твердость с изменением скорости остается практически неизменной.

### Список литературы

1. Дульский, Е. Ю. Исследование эффективности конвективного и терморadiационного методов капсулирования изоляции обмоток при ремонте электрических машин тягового подвижного состава [Текст] / Е. Ю. Дульский, Н. С. Доценко, Е. М. Лыткина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – № 1 (17). – С. 14 – 19.
2. Лыков, А. В. Теория сушки [Текст] / А. В. Лыков. – М: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Пат. 2515267 Российская Федерация, Н 02 К 15/12. Спектрально-осциллирующий способ пропитки изоляции лобовых частей обмоток вращающихся электрических машин и устройство для его реализации [Текст] / Лыткина Е. М., Дульский Е. Ю., Худоногов А. М. (Россия); заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – № 2012157499/07; заявл. 26.12.2012; опубл. 10.05.2014.
4. Лыткина, Е. М. Основы локального метода продления ресурса изоляции электрических машин тягового подвижного состава тепловым излучением [Текст] / Е. М. Лыткина, Е. Ю. Дульский, А. М. Худоногов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – № 1 (17). – С. 26 – 30.

### References

1. Dul'skii E. Yu., Dotsenko N. S., Lytkina E. M. Research of efficiency of convective and thermoradiation methods capsulation of isolation of windings in the repair of electric cars traction rolling stock [Issledovanie effektivnosti konvektivnogo i termoradiatsionnogo metodov kapsulirovaniia izoliatsii obmotok pri remonte elektricheskikh mashin tiagovogo podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 1 (17), pp. 14 – 19.
2. Lykov, A. V. *Teoriia sushki* (Theory of drying). Moscow: Energiia Publ., 1968, 472 p.
3. Lytkina E. M., Dul'skii E. Yu., Khudonogov A. M. *Patent RU 2012157499/07(090552) H02K 15/12*, 26.12.2012.

4. Lytkina E. M., Dul'skii E. Iu., Khudonogov A. M. Fundamentals of local method of extending the life of isolation of electric cars traction rolling stock thermal radiation [Osnovy lokal'nogo metoda prodlenija resursa izoljicii jelektricheskikh mashin tjagovogo podvizhnogo sostava teplovym izlucheniem]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 1 (17), pp. 26 – 30.

УДК 621.791

В. В. Меликов, Ш. С. Файзибаев, Э. С. Набиев

## ШИРОКОСЛОЙНАЯ НАПЛАВКА ГРЕБНЯ ЦЕЛЬНОКАТАНОГО КОЛЕСА МНОГОЭЛЕКТРОДНЫМ СПОСОБОМ

*В работе представлены результаты экспериментального исследования термического цикла многоэлектродной наплавки гребня цельнокатаного колеса и его влияния на структурообразование в зоне термического воздействия.*

К началу обвального износа колес и рельсов перед ГАЖК «Узбекистон темир йуллари» встала проблема приобретения вагонных колес и рельсов для замены износившихся до предела.

За счет проведения на дорогах бывшего СССР сужения рельсовой колеи дорожки катания колес и рельсов сместились внутрь колеи. Это привело к увеличению колебания фрикционных возможностей между колесами одной колесной пары на прямых участках пути и в еще большей степени – при прохождении ею по кривым малого радиуса, способствуя дополнительному скольжению и износу колес.

За последние два – три десятилетия по мере увеличения мощности локомотивов и массы поездов изменилось отношение и к допустимому избыточному скольжению колес относительно рельсов. За это время скольжение повысилось с 2 – 3 до 5 – 10 % от скорости движения поезда [1]. Избыточное скольжение колес относительно рельсов является источником значительной энергии, выделяющейся в относительно малом объеме зоны трения колеса и рельса. Достаточно сказать, что в ряде случаев при трогании и движении по лимитирующему подъему локомотив расходует на тепло, выделяющееся в зоне трения его колес с рельсами, до 20 – 25 % своей мощности. Эта энергия идет на разогрев поверхностного слоя материала колес и рельсов, достигающий нескольких сотен, а иногда и тысячи градусов Цельсия, в результате чего ухудшаются механические свойства этого материала. Тем самым только за счет знания исходного состояния дорожек трения колес и рельсов и дозированного регулирования тепла, выделяющегося в зоне трения, представляется возможность как увеличить, так и уменьшить силу трения между колесом и рельсом, а также уменьшить или увеличить интенсивность их изнашивания.

Немаловажное значение в данном вопросе имеют материал поверхности колес, его физико-химические свойства при трении о рельс. Наиболее простым и перспективным направлением является создание биметаллических колес и рельсов, у которых будет правильно подобран максимальный коэффициент трения как при малых, так и при больших скоростях движения. Для решения этой глобальной проблемы необходимо качественно и с высокой производительностью наплавлять колеса.

Наплавка колесной стали, имеющей повышенное содержание углерода, затруднена вследствие возможности образования в металле шва и зоны термического влияния (ЗТВ) закалочных структур и холодных трещин. И поскольку колесо является одним из наиболее нагруженных и ответственных за безопасность движения элементов ходовой части, то получение благоприятных структур, гарантирующих надежность и прочность наплавленного металла, является одной из актуальных задач восстановительной наплавки.

Получение требуемых структур в существующих технологиях по одно- и двухдуговой наплавках обеспечивается регулированием температуры предварительного подогрева колеса с последующим медленным охлаждением в термостате. Предварительный подогрев колеса весом более 300 кг требует времени и затраты энергии, что повышает стоимость восстановительной операции и является недостатком указанных технологий.

В наплавочной лаборатории Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта выполнен комплекс исследований по разработке и применению высокопроизводительной технологии многоэлектродной наплавки гребней цельнокатаных вагонных колес без предварительного подогрева. Данный способ позволяет восстановить изношенную поверхность гребня за один оборот колеса. Наплавка одним слоем значительно уменьшает вероятность появления сварочных дефектов, обеспечивает высокую химическую однородность и плотность наплавленного металла [2].

Другим немаловажным преимуществом однослойной наплавки, помимо экономической целесообразности ее использования, является отсутствие зон высокотемпературного отжига (ЗТВО). Известно [3], что ЗТВО образуется при многослойной наплавке в местах перекрытия одного слоя другим и металл, подвергнутый высокотемпературному отжигу, имеет значительную пористость, являющуюся причиной образования усталостных трещин раньше, чем в остальной части наплавленного слоя.

В существующем каскадном способе наплавка гребня выполняется при горизонтальном положении оси колесной пары. При многоэлектродной наплавке это невозможно из-за больших размеров ванны жидкого металла, поэтому была предложена новая технология.

Отличие предлагаемой технологии от существующей состоит в том, что наплавляемая поверхность гребня располагается горизонтально, а ось колесной пары – под углом  $60^\circ$  к горизонту. Это позволяет вести наплавку в нижнем положении одновременно четырьмя электродами диаметром 2 мм, обеспечивая при этом хорошее формирование наплавленного металла.

При разработке технологии многоэлектродной наплавки гребня колеса была поставлена цель: получить металл, который был бы менее склонен к закалке от тепла трения и обладающий высокой сопротивляемостью появлению трещин и отслаиванию поверхностных слоев наплавки. Достижение цели осуществлялось решением двух задач: выбора параметров термического воздействия, определяющих образование той или иной структуры в материале колеса, и параметров режима наплавки, влияющих на качество формирования наплавляемого слоя.

Решение первой задачи предусматривало поиск благоприятного термического цикла многоэлектродного процесса выбором такого режима нагрева-охлаждения, который обеспечивал бы необходимые прочностные свойства наплавляемого металла в пределах рабочих параметров наплавки.

Основными параметрами режима наплавки, влияющими на степень термического воздействия, являлись напряжение, сила тока и скорость наплавки. Первоначально по математической модели [4] для произвольного диапазона параметров теплового воздействия рассчитывали термические циклы и определяли скорость охлаждения колеса. Согласно диаграмме анизотермического распада аустенита и структурной диаграмме для колесной стали марки 2 [5] в зависимости от полученных скоростей охлаждения определяли возникающие структуры и свойства металла. Таким образом, установили, что наиболее благоприятные термические циклы для получения доэвтектоидных структур создаются в диапазоне значений силы тока 650 – 700 А и напряжения 28 – 32 В с использованием четырех электродов при скорости наплавки 16 – 18 м/ч.

Для установления достоверности прогнозируемых структур в наплавленном металле, на расчетных режимах были проведены эксперименты по определению термического цикла в точке, расположенной на глубине 5 мм от поверхности гребня. Чтобы оценить динамику нарастания и убывания теплоты в точке по длине обода при ее приближении, непосредственном нахождении и постепенном удалении от места наплавки, колесо условно раз-

били на три плоскости под углом  $120^\circ$ . Для ожидаемого диапазона наблюдаемых температур выбрали хромельалюмелевые термопары, изготовленные из проволоки диаметром 0,5 мм. Для регистрации показаний термопар использовали универсальный самопишущий прибор К10-51. Запись этой регистрации велась на фотобумагу при скорости протяжки 5 мм/с. Тарировку прибора выполняли согласно градуировочной таблице термопар по температуре путем задания определенного напряжения от специального источника. Запись начинали в момент прохождения источника через плоскость с термопарой и заканчивали после окончания всего процесса наплавки по истечении 5 мин. Кривые изменения температуры приводились к общей нулевой линии и общему началу. Так как при наплавке температурное поле начинает распространяться по обе стороны от дуги, процесс наплавки начинали посередине – между первой и третьей плоскостями. По мере приближения к источнику фиксировали прирост температуры как в точке первой, так и в точке третьей плоскости.

Результаты исследований показали, что в среднем по сечениям трех плоскостей наблюдается интенсивный подъем температуры до максимального значения  $680^\circ\text{C}$  (рисунок 1). При нагреве градиент температуры у поверхности достигает  $136^\circ\text{C}/\text{мм}$ , а скорость нагрева составляет  $34^\circ\text{C}/\text{с}$ . Распределение тепла в массу колеса в первые 20 с приводит к быстрому снижению максимальной температуры в среднем до  $412^\circ\text{C}$ . Максимальная скорость изменения температуры составила  $13,4^\circ\text{C}/\text{с}$ . При такой скорости охлаждения превращение аустенита должно происходить с образованием промежуточных структур.

В интервале температур мартенситного превращения скорость охлаждения составила около  $3^\circ\text{C}/\text{с}$ . При такой скорости охлаждения изменений в структуре материала колеса не должно быть.

При многоэлектродной наплавке гребня вагонного колеса существенное значение для качественного формирования наносимого слоя имеют его геометрические размеры. Связано это с тем, что при широкопослойной наплавке возрастают объем жидкой ванны и вероятность ее стекания. Одновременно с этим наплавка колесной стали с повышенным содержанием углерода ставит задачу уменьшения глубины проплавления основного металла для избежания появления трещин. При этом воздействующими факторами, влияющими на формирование и размеры наплавляемого слоя, являются вылет и смещение электродов относительно зенита, скорость их подачи, расстановка и расположение электродов по направлению к наплавке [6].

Указанные параметры режима наплавки могут варьироваться в широком диапазоне и связаны с большим объемом предварительных экспериментальных исследований. Поэтому для определения степени влияния этих факторов на формирование слоя использовали один из методов статистического планирования экстремальных экспериментов – метод крутого восхождения [7].

Опытные наплавки выполняли электродной проволокой марки Св-10НМА под флюсом АН-348А. Считали, что применение указанной проволоки, близкой по содержанию марганца и кремния к химическому составу колесной стали, позволит получить наплавленный металл с повышенной прочностью и вязкостью ( $Ni = 1 - 1,5\%$ ,  $Mo = 0,4 - 0,55\%$ ), что обеспечит его надежность при взаимодействии с рельсом. Пониженное содержание углерода в металле

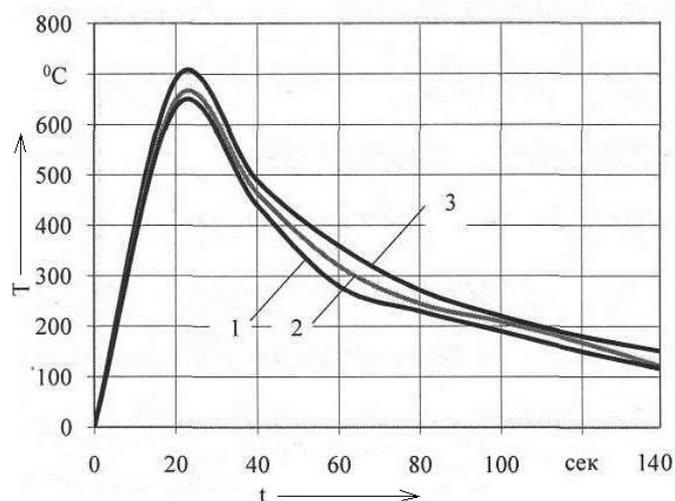


Рисунок 1 – Термические циклы в точке, расположенной на глубине 5 мм от поверхности наплавки:  
1 – первая плоскость; 2 – вторая; 3 – третья

наплавки будет способствовать повышению температуры структурных превращений при нагреве в процессе скольжения гребня по рельсу и тем самым затруднит образование мартенситных структур при охлаждении.

В результате выполненных опытов были скорректированы параметры режима наплавки, принятые при определении термических циклов. Так, в частности, величина напряжения была повышена до 35 В, так как меньшие значения (28 – 32 В) не обеспечивали необходимой ширины слоя и приводили к ухудшению качества наплавки. При силе тока 700 А увеличиваются геометрические размеры шлаковой ванны, и в результате медленной кристаллизации, не удерживаясь, шлак начинает течь с поверхности гребня. При небольших скоростях подачи электродов (менее 180 м/ч для принятого термического режима наплавки) разворот их под углом 45° относительно направления наплавки увеличивает глубину проплавления до 2,5 мм, уменьшает толщину наплавляемого слоя до 3 мм и не влияет на его ширину. Разворот электродов фронтом снижает глубину проплавления до 2 мм и увеличивает толщину слоя до 4 мм. С увеличением скорости подачи (более 200 м/ч) независимо от расположения электродов глубина проплавления становится больше (3 мм), а формирование слоя улучшается. Вылет



Рисунок 2 – Макроструктура наплавленного гребня цельнокатаного колеса

электродов менее 40 мм повышает глубину проплавления до 4 мм и уменьшает ширину слоя до 32 мм. При вылете более 50 мм наблюдается снижение глубины проплавления (2 мм) и увеличение ширины слоя (37 мм). Наплавленный слой приобретает наиболее благоприятную форму при смещении электродов в сторону, противоположную вращению колеса, на 50 мм от зенита.

На основании этих данных был выбран наиболее благоприятный режим, обеспечивающий высокое качество наплавляемого металла, без трещин и шлаковых включений. На рисунке 2 показан макрошлиф валика, наплавленный со скоростью 18 м/ч на токе 600 А и напряжении 35 В при вылете электродов 40 мм. При скорости пода-

чи электродных проволок 230 м/ч и расстоянии между их осями 10 мм толщина и ширина валика в среднем составляют соответственно 3,5 и 36 мм.

Структуры для металлографических исследований были изучены на поперечных образцах в наплавленном слое, зоне термического влияния и в основном металле.

Микроскопический анализ показал, что структура наплавленного металла представляет собой нижний бейнит с твердостью HV 4850 – 5010 МПа и тонкие прослойки феррита (рисунок 3, а). Это можно объяснить тем, что скорректированный режим наплавки способствовал уменьшению величины погонной энергии, в результате чего увеличилась скорость охлаждения колеса. Согласно диаграмме термокинетического распада [8] превращение переохлажденного аустенита в интервале низких температур происходит при скорости охлаждения свыше 16,6 °С/с. Хрупкая структура мартенсита, судя по данным источников [5, 8], возникает при скорости охлаждения свыше 30 °С/с. На этой основе можно утверждать, что наплавленный на поверхность гребня металл со структурой бейнита и без трещин имеет высокие прочностные свойства, а предлагаемые технологические решения оптимальны.

Структура на границе перехода наплавленного металла в ЗТВ состоит из мелкозернистого феррита и бейнита. На участках перегрева и перекристаллизации структура представляет собой мелкозернистую феррито-перлитную смесь с твердостью до HV 3400 МПа (рисунок 3, б). Наличие в ЗТВ феррито-перлитной смеси показывает, что структурных изменений в материале колеса не происходит.

Таким образом, предлагаемая технология автоматической многоэлектродной наплавки изношенных гребней цельнокатаных вагонных колес положительно влияет на структуру как

наплавленного металла, так и ЗТВ. Установленная тепловая мощность многоэлектродной наплавки обеспечивает необходимый подогрев колеса и тем самым исключает возможность получения хрупких закалочных структур и интенсивный рост зерна в околошовной зоне.

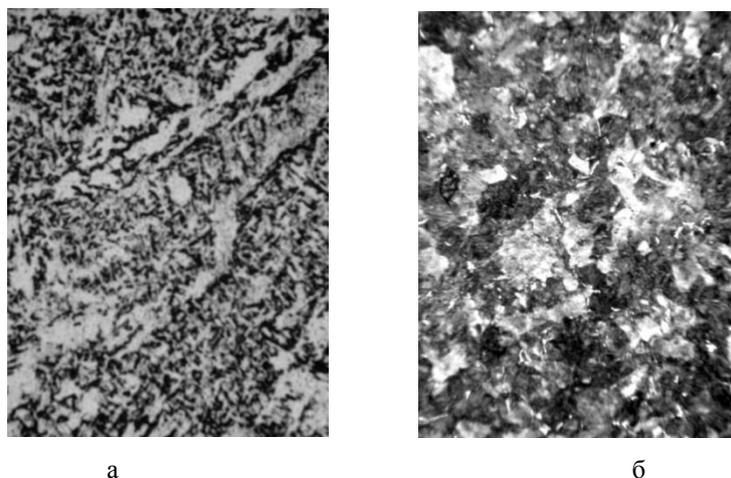


Рисунок 3 – Структуры в околошовной зоне, х500:  
а – металл наплавки; б – металл в зоне термического влияния

Однако для внедрения в производство предлагаемой технологии многоэлектродной наплавки необходимо исследовать напряженно-деформационное состояние колеса. Нагрев тонкого обода мощным источником тепла может способствовать появлению температурных напряжений, как достигающих, так и превышающих предел прочности материала колеса. Численные исследования температурных напряжений [9, 10] выявили наличие изменения пределов прочности, когда создаются условия для образования трещин. Результаты расчета напряжений, возникающих по длине  $\sigma_{LM}$  и ширине  $\sigma_{YM}$  обода колеса, представлены в таблице.

Расчетные значения напряжения в зависимости от толщины наплавляемого обода  $Z_k$

$Z_k$ , м	Напряжение, МПа	Температура $T_n$ , °С				
		300	400	500	600	700
0,04	$\sigma_{LM}$	949	1335	1777	2078	2017
	$\sigma_{YM}$	380	538	712	833	809
0,06	$\sigma_{LM}$	890	1252	1667	1947	1890
	$\sigma_{YM}$	376	528	704	822	798
0,08	$\sigma_{LM}$	835	1174	1562	1825	1772
	$\sigma_{YM}$	371	521	694	810	766
0,1	$\sigma_{LM}$	778	1094	1456	1701	1651
	$\sigma_{YM}$	359	505	652	785	762

Данные таблицы показывают, что изменение диаметра обода модели колеса  $2R_k$  значительно сказывается на максимальном напряжении  $\sigma_{LM}$  по длине дуги радиуса  $R_k$ . Снижение толщины  $Z_k$  по поверхности катания способствует увеличению растягивающих напряжений, причем их значения смещаются в область средних температур. Максимальные значения напряжений при этих температурах существенно превышают прочность материала колеса. Для колес с предельным износом толщины обода колеса ниже 0,04 м следует смещать зону высоких значений напряжения в область более высоких температур варьированием тепловой мощностью наплавочной установки или предварительным подогревом. С целью снижения вероятности появления трещин от температурного напряжения многоэлектродную наплавку гребней без предварительного подогрева целесообразно производить для колес с  $Z_k > 0,04$  м.

### Список литературы

1. Лужнов, Ю. М. Причины интенсивного износа колес и рельсов на железных дорогах России и пути решения этой проблемы [Текст] / Ю. М. Лужнов // Тезисы докл. междунар. конф. «Передовые технологии на пороге XXI века» / НИЦ «Инженер». – М., 1998. – С. 7 – 12.

2. Меликов, В. В. Многоэлектродная наплавка [Текст] / В. В. Меликов. – М.: Машиностроение, 1988. – 140 с.
3. Клименко, Ю. О ремонте деталей наплавкой [Текст] / Ю. Клименко // Техника в сельском хозяйстве. – 1996. – № 9. – С. 12 – 14.
4. Методика расчетной оценки скоростей движения тепловых волн в материале колесных дисков грузовых вагонов при их наплавке и торможении поездов [Текст] / А. Д. Глущенко, Э. С. Набиев и др. // Сб. тр. республиканской науч.-техн. конф. с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии по эксплуатации и ремонту подвижного состава, динамика и прочность систем» / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2006. – С. 187– 191.
5. Effect of preheating When hardfacing all rolled Wagon Wheels on residual Stresses and Straius [Text] // S. N. Kiselev, A. V. Savrukhn and others // Welding International. – 1996. – № 10 (6). – P. 480 – 483.
6. Меликов, В. В. Оптимизация режимов многоэлектродного процесса при восстановительной наплавке вагонных колес [Текст] / В. В. Меликов, Э. С. Набиев // Тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы механики и сейсmodинамики сооружений» / Ин-т механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз. – Ташкент, 2004. – С. 536, 537.
7. Новик, Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении [Текст] / Ф. С. Новик / МИСИС. – М., 1972. – Ч. 1. – 106 с.
8. Влияние технологических факторов на структуру и свойства металл ЗТВ при ремонтно-восстановительной наплавке цельнокатаных вагонных колес [Текст] / В. А. Саржевский, А. А. Гайворонский и др. // Автоматическая сварка. – 1996. – № 3. – С. 22 – 27.
9. Набиев, Э. С. Оценка температурных напряжений в материале цельнокатаного вагонного колеса при его многоэлектродной наплавке [Текст] / Э. С. Набиев, Д. Н. Заирова, В. Г. Бабина // Вестник ТашИИТа / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2006. – № 3/4. – С. 91 – 96.
10. Набиев, Э. С. Исследование температурных напряжений в модели материала колеса грузового вагона при его восстановительной наплавке [Текст] / Э. С. Набиев, Д. Н. Заирова / Вестник ТашИИТа // Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2007. – № 3/4. – С. 59 – 62.

## References

1. Luzhnov Iu. M. Causes severe wear of wheels and rails the Railways of Russia and ways of solving this problem [Prichiny intensivnogo iznosa koles i rel'sov na zheleznykh dorogakh Rossi i puti resheniia etoi problemy]. *Tezisy докладov Mezhdunarodnoi konferentsii «Peredovye tekhnologii na poroge XXI veka»* (Abstracts of the Int. conference «Advanced technologies on the threshold of the XXI century»). – Moscow, 1998, pp. 7 – 12.
2. Melikov V. V. *Mnogoelektrodnaia naplavka* (Multielectrode surfacing). – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988, 140 p.
3. Klimenko, Iu. About the repair of welding parts [O remonte detalei naplavkoi]. *Tekhnika v sel'skom khoziaistve – Technology in agriculture*, 1996, no. 9, pp. 12 – 14.
4. Glushchenko A. D., Nabiev E. S., Zairova D. N., Kosimov O. T. Methodology for calculation of speed of heat waves in the material wheels of freight cars in their surfacing and braking trains [Metodika raschetnoi otsenki skorostei dvizheniia teplovykh voln v materiale kolesnykh diskov gruzovykh vagonov pri ikh naplavke i tormozhenii poezdov]. *Sbornik trudov Respublikanskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s uchastiem zarubezhnykh uchenykh «Resursosberegaiushchie tekhnologii po ekspluatatsii i remontu podvizhnogo sostava, dinamika i prochnost' sistem»* (Proc. of the Republican scientific-technical conference with participation of foreign scientists «Resource-Saving technologies for maintenance and repair of rolling stock, dynamics and stability of systems»). Tashkent, 2006, pp. 187 – 191.
5. Kiselev S. N., Savrukhn A.V., Kuzmina G. D., Kiselev A. S. Effect of preheating When hardfacing all rolled Wagon Wheels on residual Stresses and Straius, *Welding International*, 1996, no. 10 (6), pp. 480 – 483.

6. Melikov V. V., Nabiev E. S. Optimization of modes multielectrode process after welding of car wheels [Optimizatsiia rezhimov mnogoelektrodnogo protsessa pri vosstanovitel'noi naplavke vagonnykh koles]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Problemy mekhaniki i seismodinamiki so-oruzhenii»* (Abstracts of international scientific-technical conference «Problems of mechanics and seismodynamic structures»). Tashkent, 2004, pp. 536 – 537.

7. Novik, F. S. *Matematicheskie metody planirovaniia eksperimentov v metallovedenii* (Mathematical methods of planning of experiments in metallography). Moscow, Ch. 1, 1972, 106 p.

8. Sarzhevskii V. A., Gaivoronskii A. A., Gordonnyi V. G., Gorb V. F. The influence of technological factors on the structure and properties of HAZ metal in repair welding of solid-rolled railroad wheels [Vliianie tekhnologicheskikh faktorov na strukturu i svoistva metall ZTV pri remontno-vosstanovitel'noi naplavke tsel'nokatanykh vagonnykh koles]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 1996, no. 3, pp. 22 – 27.

9. Nabiev E. S., Zairova D. N., Babina V. G. Evaluation of thermal stresses in the material of solid-rolled railroad wheels when it multielectrode surfacing [Otsenka temperaturnykh napriazhenii v mate-riale tsel'nokatanogo vagonnogo kolesa pri ego mnogoelektrodnoi naplavke]. *Vestnik TashIIT – Bulletin Of ToshTYMI*, 2006, no. 3/4, pp. 91 – 96.

10. Nabiev E.S., Zairova D.N. Investigation of thermal stresses in the material model of the wheel of a freight car at his recovery surfacing [Issledovanie temperaturnykh napriazhenii v modeli materiala kolesa gruzovogo vagona pri ego vosstanovitel'noi naplavke]. *Vestnik TashIIT – Bulletin Of ToshTYMI*, 2007, no. 3/4, pp. 59 – 62.

УДК 621.336.2

О. А. Сидоров, В. М. Филиппов, С. А. Ступаков

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ПАР УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА

*В статье приведено описание построения математической модели электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. Созданная математическая модель позволяет учесть тепловые процессы, возникающие в скользящем контакте при пропускании электрического тока через скользящий контакт. Приведено сравнение результатов расчетов и экспериментальных исследований износа контактных пар.*

Контактная пара системы токосъема электрического транспорта (контактная вставка – контактный провод) представляет собой электрический скользящий контакт, элементы которого функционируют в условиях износа, обусловленного механической и электрической составляющими процесса токосъема, а также многими другими факторами условий эксплуатации: родом и силой тока, температурой элементов контактной пары, параметрами внешней среды и т. п. Одним из путей повышения срока службы элементов контактных пар устройств токосъема является подбор наиболее отвечающих требованиям качества токосъема материалов. В Омском государственном университете путей сообщения разработана методика [1] экспериментальных исследований изнашивания контактных пар устройств токосъема.

Реализация методики требует наличия специализированных экспериментальных комплексов, а также значительных затрат времени и ресурсов. Для сокращения объема экспериментальных исследований может быть использован комбинированный способ – совокупность необходимого минимума экспериментальных исследований реальных объектов (или их аналогов) и методов расчета, основанных на математическом моделировании процессов, происходящих в контактных парах устройств токосъема.

Необходимый объем исследований выполняется с помощью специализированного комплекса, а полученные результаты служат входными данными для выполнения расчетов износа с помощью математических моделей и прогнозирования ресурса контактных пар. Фрикционное взаимодействие элементов трибосистемы «токоприемник – токопровод» представляет собой нелинейный процесс, который определяется большим количеством взаимосвязанных факторов – как внешних (параметры внешней среды, динамические нагрузки, наличие электрического тока в контакте и др.), так и внутренних (физико-химические свойства материалов пары трения), поэтому степень сложности триботехнической модели системы повышается по мере поступления дополнительной информации об объекте исследования.

Контактная пара устройств токосъема как монорельсового, так и магистрального электрического транспорта представляет собой узел, который функционирует в условиях электромеханического изнашивания. В соответствии с этим развитие математической модели взаимодействия элементов контактной пары «контактный элемент – токопровод» (КЭ – Т) и «контактная вставка – контактный провод» (КВ – КП) осуществлялось по двум направлениям [2, 3]: для моделирования механического износа (от нажатия в контакте) и для моделирования электрического износа (от токовой нагрузки).

Ввиду неоднородности составляющих процесса электромеханического изнашивания контактных пар устройства токосъема электрического транспорта необходимо составлять соответствующие модели для механического (от нажатия в контакте) и электрического (от токовой нагрузки) изнашивания [4]. Это позволит исследовать влияние на изнашивание отдельно каждой составляющей трибологического процесса, определить оптимальные уровни факторов и прогнозировать работоспособность контактной пары.

Уравнение для решения задачи об оптимальных условиях механического изнашивания при поиске области оптимума приведено в работе Э. Д. Брауна, Ю. А. Евдокимова, А. В. Чичинадзе [5]. В этом уравнении в соответствии с положениями теории подобия в комплексы и симплексы были объединены следующие факторы:

- 1) нажатие в контакте, удельная теплоемкость, теплопроводность – комплекс;
- 2) скорость скольжения, время испытания – комплекс;
- 3) твердости элементов пары трения – симплекс.

Кроме этого уравнение, приведенное в работе [5], содержит симплекс, учитывающий процентное содержание в элементе контактной пары основного материала. Например, для случая исследования контактных пар устройств токосъема таким материалом может быть медь или графит. В качестве параметра оптимизации принята интенсивность механического изнашивания  $I_M$ .

Функциональная зависимость между  $I_M$  и факторами модели имеет вид:

$$I_M = \Psi_2(P, v, t, r, Cu, H_1 / H_2, \lambda_1, \lambda_2, c_1, c_2), \quad (1)$$

где  $P$  – нажатие в контакте;  $v$  – скорость скольжения;  $t$  – время испытаний;  $r$  – характерный линейный размер;  $Cu$  – содержание меди в КЭ;  $H_1/H_2$  – безразмерный симплекс (отношение твердости материала КЭ к твердости материала токопровода);  $\lambda_1, \lambda_2$  – теплопроводность материалов КЭ и токопровода соответственно;  $c_1, c_2$  – удельная теплоемкость КЭ и токопровода.

Зависимость (1) может быть использована и для контактной пары КВ – КП. В этом случае факторы модели отражают физико-механические параметры контактной вставки и контактного провода.

Для каждого фактора в уравнении (1) определяются показатели степени, а затем факторы с одинаковыми степенями объединены в комплексы [5]:

$$I_M = \Psi_3 \left[ \left( \frac{Ptc_2}{r^2 \lambda_1} \right)^{\alpha_m} \left( \frac{vt}{r} \right)^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^{\varepsilon_m} \right]. \quad (2)$$

Из уравнения подобия (2) можно получить расчетное уравнение, коэффициенты которого определяются экспериментально. Уравнение (2) можно представить как сплошной ряд, рассматривая только первый член этого ряда:

$$I_M(P) = a_0 \left( \frac{Ptc_2}{r^2 \lambda_1} \right)^{\alpha_m} \left( \frac{vt}{r} \right)^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^{\varepsilon_m}, \quad (3)$$

где  $a_0$  – функционал, отражающий влияние на процесс неучтенных факторов;  $\alpha_m$  – функционал, логарифмически зависящий от нажатия в контакте;  $\beta_m$ ,  $\gamma_m$ ,  $\varepsilon_m$  – коэффициенты, определяемые экспериментально;  $Ptc_2 / (r^2 \lambda_1)$  – комплекс (мера отношения удельной мощности трения к способности токопровода накапливать, а контактного элемента – передавать тепло);  $vt / r$  – комплекс (отношение пути трения к характерному линейному размеру элемента).

Сравнение результатов расчета (уравнение (3)) интенсивности механического изнашивания КЭ монорельсового транспорта и КВ магистрального электроподвижного состава (ЭПС) с экспериментальными данными, полученными при нормальных условиях окружающей среды, показывает, что расхождение составляет 9 %. Изменение параметров окружающей среды (увеличение относительной влажности воздуха до 98 %, а запыленности – до 200 мг/м<sup>3</sup>) повышает значение относительной погрешности до 20 % [1].

Для повышения точности расчета износа КЭ и КВ в модель были внесены критерии, позволяющие учитывать изменение влажности и запыленности окружающей среды. Кроме этого многие авторы (Крагельский И. В., Viesenack Н., Браун Э. Д., Чичинадзе А. В. и др.) доказали влияние температуры элементов контактной пары на их твердость и, как следствие, на фактическую площадь контакта. В связи с этим в уравнение (3) также добавлен критерий, позволяющий учитывать влияние силы трения в скользящем контакте на износ элементов контактной пары.

В связи с этим уравнение (3) примет вид:

$$I_M(P) = a_0 \left( \frac{Ptc_2}{r^2 \lambda_1} \right)^{\alpha_m} \left( \frac{vt}{r} \right)^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^{\varepsilon_m} \times \left( \frac{T_1 \lambda_1}{rf_T Pv} \right)^{\delta_m} \left( \frac{\varphi_0}{\varphi} \right)^{\lambda_m} \left( \frac{\kappa_0}{\kappa} \right)^{\omega_m}, \quad (4)$$

где  $Me \equiv \frac{T_1 \lambda_1}{rf_T Pv}$  – критерий Мейера;  $Pv$  – мощность трения,  $f_T$  – коэффициент трения;  $\varphi_0 / \varphi$  – отношение среднего значения относительной влажности окружающей среды за пять лет к значению относительной влажности на момент исследований,  $\kappa_0 / \kappa$  – отношение среднего значения запыленности окружающей среды за пять лет к значению ее запыленности на момент исследований.

Дальнейшее развитие модели обусловлено необходимостью учитывать в модели влияние температуры элементов контактной пары на их твердость и на фактическую площадь контакта. Таким образом, уравнение (4) с учетом температуры элементов контактной пары можно записать в виде:

$$I_M(P) = a_0 \left( \frac{Ptc_2}{(r(T_{I_h}))^2 \lambda_1} \right)^{\alpha_m} \left( Bi \frac{vt}{r(T_{I_h})} \right)^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left( \frac{H_1(T_{I_h})}{H_2(T_{I_h})} \right)^{\varepsilon_m} \times \left( \frac{T_1 \lambda_1}{r(T_{I_h}) f_T(T_{I_h}) Pv} \right)^{\delta_m} \left( \frac{\varphi_0}{\varphi} \right)^{\lambda_m} \left( \frac{\kappa_0}{\kappa} \right)^{\omega_m}, \quad (5)$$

где  $T_{I_h} = aT_n^{\alpha_T} + b \left( \frac{\partial T_n}{\partial z} \right)^{\beta_T}$  – коэффициент влияния температурного градиента на интенсивность изнашивания ( $a, b$  – коэффициенты, характеризующие тепловые свойства материалов;  $\alpha_T, \beta_T$  – коэффициенты, характеризующие тепловые процессы при взаимодействии элементов контактной пары; определяются экспериментально);

$T_n$  – температура исследуемого  $n$ -го тела;

$\partial T_n / \partial z$  – градиент температуры элемента контактной пары по нормали  $z$  к его поверхности.

Теплопроводность материала КЭ

$$\lambda_1 = \rho_1 c_1 \chi, \quad (6)$$

где  $\rho_1, \chi$  – плотность и температуропроводность материала соответственно.

Тогда

$$I_M(P) = a_0 \left( \frac{Ptc_2}{r(T_{I_h})^2 \rho_1 c_1 \chi} \right)^{\alpha_m} \left[ Bi \left( \frac{vt}{r(T_{I_h})} \right) \right]^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \times \left( \frac{H_1(T_{I_h})}{H_2(T_{I_h})} \right)^{\varepsilon_m} \left( \frac{T_1 \lambda_1}{r(T_{I_h}) f_T(T_{I_h}) Pv} \right)^{\delta_m} \left( \frac{\varphi_0}{\varphi} \right)^{\lambda_m} \left( \frac{\kappa_0}{\kappa} \right)^{\omega_m}, \quad (7)$$

где  $H_i(T_{I_h}) = H_{0i} \left\{ m_1 + \frac{m_2}{[m_3 (T_{I_h} - T'_m)]^2 + 1} \right\}$  – твердость материала элемента контактной пары

в зависимости от его температуры [6];

$H_{0i}$  – то же при нормальной температуре;

$m_1, m_2, m_3$  – константы материала;

$T'_m$  – температура, при которой  $H_i(T_{I_h})$  принимает максимальное значение;

$Bi = \frac{r \nabla T_1}{\Delta T_{1в}}$  – критерий Био, устанавливающий соответствие между интенсивностью теплообмена и распределением температуры в твердом теле;

$r \nabla T_1$  – перепад температуры по объему КЭ;

$\Delta T_{1в} = T_1 - T_в$  – температурный напор (разность температур материала КЭ и окружающей среды).

Номограммы и диапазоны изменения коэффициентов и функционалов для расчета по модели (7) приведены в работе [1].

На рисунках 1 и 2 приведены графики механического изнашивания контактных элементов, полученные экспериментально и в результате расчета на модели (уравнение (7)): рисунки 1, а, б – графики для контактных элементов из ПМГ и металлокерамики на железной основе МК-Ж токоприемников монорельсового транспорта; рисунки 2, а, б – графики для контактных вставок из графита и металлокерамики токоприемников магистрального ЭПС. Графики получены при нормальных условиях окружающей среды [7] (температура окружающего воздуха + 23 °С, относительная влажность 50 %, запыленность 3 мг/м<sup>3</sup>).

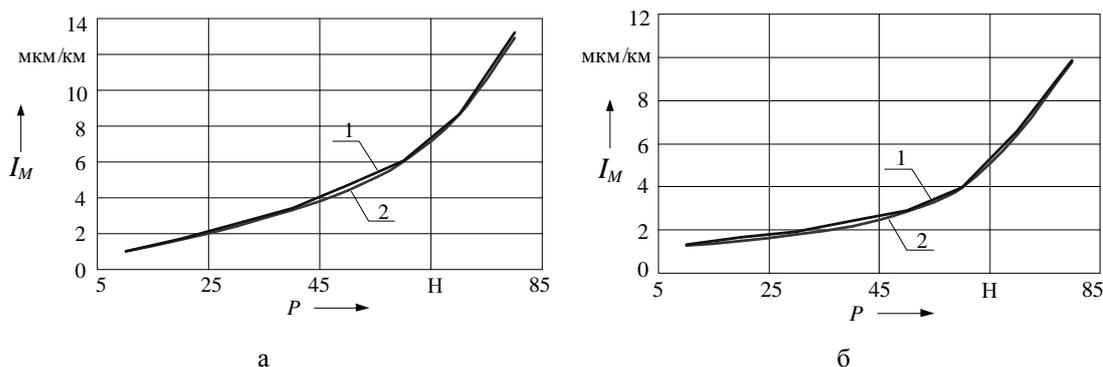


Рисунок 1 – Интенсивность изнашивания КЭ монорельсового транспорта:  
а – КЭ из ПМГ; б – КЭ из графита; в – КЭ из МК-Ж

На рисунках 1 и 2 приняты обозначения: 1 – результаты эксперимента; 2 – результаты расчета по формуле (7). Расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет 6 %.

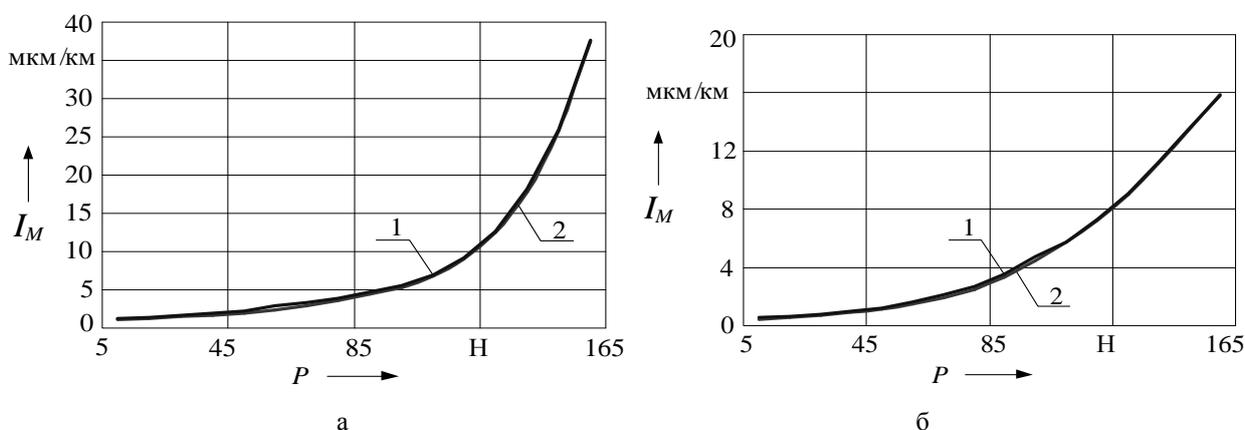


Рисунок 2 – Интенсивность изнашивания КВ магистрального ЭПС: а – КВ из графита; б – КВ из МК-Ж

Анализ графиков на рисунках 1 и 2 позволяет сделать заключение о возможности использования формулы (7) для моделирования механической составляющей изнашивания КЭ и КВ. Однако заключение о трибосовместимости и задиростойкости материалов контактной пары можно сделать только на основании результатов экспериментальных исследований.

Таким образом, на основании анализа особенностей условий эксплуатации контактных пар устройств токосъема, экспериментальных данных и существующих математических моделей изнашивания обоснована возможность разделения модели электромеханического изнашивания на две модели (модель механического изнашивания (от нагрузки в контакте) и модель электрического изнашивания (от токовой нагрузки), и разработана математическая модель механического изнашивания элементов контактной пары устройств токосъема монорельсового и магистрального электрического транспорта, которая позволяет учитывать влияние на механическую составляющую износа параметров окружающей среды (влажности и запыленности), а также температуры материалов элементов контактной пары.

### Список литературы

1. Ступаков, С. А. Моделирование электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта [Текст] / С. А. Ступаков, О. А. Сидоров, В. М. Филиппов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – М.: Машиностроение, 2012. – № 4. – С. 23 – 30.
2. Biesenack, H. Kontakt zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste–Ausgangspunkte zur Bestimmung des elektrischen Verschleißes [Text] / H. Biesenack, F. Pintscher // Elektrische Bahnen. – München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2005. – № 3. – P. 138 – 146.

3. Кончиц, В. В. Триботехника электрических контактов [Текст] / В. В. Кончиц, В. В. Мешков, Н. К. Мышкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 260 с.
4. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 499 с.
5. Браун, Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах [Текст] / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
6. Чичинадзе, А. В. Трение, износ и смазка [Текст] / А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
7. ГОСТ 8.050-73. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 14 с.

## References

1. Stupakov S. A., Sidorov O. A., Philippov V. M. Modeling of electromechanical devices wear contact pairs current collection electric vehicles [Modelirovanije elektromekhanicheskogo iznashivaniya kontaktnykh par ustrojstv tokosjoma elektricheskogo transporta]. *Trienije i smazka v mashinakh i mekhanizmax – Friction and lubrication in machinery*, 2012, no. 4, pp. 23 – 30.
2. Biesenack H., Pintscher F. Kontakt zwischen Fahrdraht und Schleifleiste–Ausgangspunkte zur Bestimmung des elektrischen Verschleißes. *Elektrische Bahnen*. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2005, no. 3, pp. 138 – 146.
3. Konchits V. V., Miesikov V. V., Myshkin N. K. *Tribotechnics electrical contacts* [Tribotiekhnika elektricheskikh kontaktov]. Minsk, 1986, 260 p.
4. Kragielskij I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. *Basics calculations on friction and wear* [Osnovy raschiotov na trienije i iznos]. Moscow, 1977, 499 p.
5. Braun E. D., Jevdokimov Ju. A., Chichinadze A. V. *Modelling of friction and wear in machines* [Modelirovanije trienija i iznashivaniya v mashinakh]. Moscow, 1982, 191 p.
6. Chichinadze A. V. *Friction, wear and lubrication* [Trienije, iznos i smazka]. Moscow, 2003, 576 p.
7. *Normalnyje uslovija vypolnienija liniejnykh i uglovykh izmierenij, GOST 8.050-73*. [State system for ensuring the uniformity of measurements. Reference conditions for linear and angular measurements]. Moscow, Standarty, 1988, 14 p.

УДК 629.488

О. П. Супчинский, М. Ф. Капустьян, А. В. Обрывалин

## ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ КОРРЕКТИРОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ЛОКОМОТИВОВ

В статье отражены основные положения оптимизированной системы технического обслуживания и ремонта электровозов, а также результаты эксперимента по увеличению межремонтных пробегов электровозов на Восточном полигоне. Рассмотрен вопрос влияния технологической подготовки производства на качество ремонта и число отказов при переходе на оптимизированную систему. Предложена методика расчета стоимости корректировки и разработки технологической документации, которая является неотъемлемой частью технологической подготовки производства. Расчет стоимости осуществляется на основе уровня квалификации и заработной платы инженеров-технологов, сложности и объемов разрабатываемой (корректируемой) технологической документации.

Представлен пример расчета стоимости корректировки и разработки технологической документации в условиях депо. Экономический эффект от внедрения данной методики и оптимизированной системы ремонта в целом показал их эффективность и состоятельность. За счет корректировки технологических процессов ремонта электровозов снизится количество отказов в ходе эксплуатации, которые были обнаружены в ходе эксперимента, проводившегося на Восточном полигоне. Затраты на внедрение оптимизированной системы

*ремонта покроемся за счет выгоды от увеличения межремонтных пробегов и снижения трудоемкости работ на отдельных видах ремонта.*

В настоящее время на железнодорожном транспорте осуществляется переход на оптимизированную систему ремонта и технического обслуживания электровозов.

Оптимизированная система ремонта в отличие от действующей характеризуется увеличенными межремонтными пробегами. В частности, текущий ремонт в объеме ТР-1 предполагается проводить с периодичностью 50 тыс. км пробега, тогда как по действующей системе работы в объеме ТР-1 проводились через каждые 27,5 тыс. км [1]. Помимо этого по оптимизированной системе ремонта предполагается перенос части работ с ТР-1 и ТР-2 на ТР-3. Сравнение нормативов трудоемкости показало, что для всех видов электровозов общие затраты времени на ремонт по действующей системе больше, чем по оптимизированной системе. Минимальная разница наблюдается при техническом обслуживании и ремонте электровозов ВЛ-85, приписанных к депо Нижнеудинское – 4045,34 чел.-ч. Максимальная разница при техническом обслуживании и ремонте электровозов ВЛ 80р, приписанных к депо Боготол-Сибирский – 12671,6 чел.-ч. Для электровозов ВЛ-80с, приписанных к ремонтным депо Чита и Дальневосточное, разница составляет 10211,3 чел.-ч.

Основная цель системы технического обслуживания и ремонта, при котором изъятие локомотива из эксплуатируемого парка осуществляется в зависимости от действительного фактического состояния его оборудования, – не допустить потери работоспособности того оборудования, состояние которого можно оценить, изучая динамику изменения его контролируемых параметров [2].

Одновременно такая система является плановой, так как объемы ремонтов определены заранее, т. е. различные восстановительные операции рассчитаны таким образом, что суммарные затраты на восстановление и поддержание работоспособного состояния локомотива сведены к минимуму.

Основной экономический эффект от внедрения данной системы достигается за счет снижения количества плановых ремонтов и увеличения пробега между ТО и Р, однако при этом есть вероятность увеличения отказов в пути следования. Снижения вероятности появления данных отказов можно добиться за счет повышения качества ремонта, которое в свою очередь в значительной степени зависит от технологической подготовки производства.

Технологическая подготовка производства (ТПП) – совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность предприятия к выпуску продукции необходимого качества при установленных сроках, объеме производства и затратах [3]. Содержание и объем ТПП зависят от типа производства, конструкции и назначения изделия.

Под технологической готовностью понимается наличие полного комплекта технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для производства. Уровень технологической готовности ремонтного производства в депо находится на достаточно высоком уровне, однако при переходе на оптимизированную систему технического обслуживания и ремонта (СТОП) будет необходимо провести значительную по объемам и трудоемкости корректировку технологических процессов. С учетом большого количества различных серий электровозов и широкой номенклатуры работ по ремонту корректировка действующих и разработка новых технологических процессов повлечет за собой значительные финансовые затраты. Поэтому необходимо определить, покроет ли полученный эффект от внедрения оптимизированной системы ремонта затраты, связанные с возможным увеличением отказов в пути следования, и затраты, направленные на развитие технологической подготовки производства, в том числе на разработку новых и корректировку действующих технологических процессов.

Расчет стоимости разработки и корректировки технологической документации осуществляется на основе уровня квалификации и заработной платы инженеров-технологов, сложности и объемов разрабатываемой (корректируемой) технологической документации [4].

В таблице представлены нормы времени на выполнение работ по разработке и корректировке технологической документации.

Нормы времени рассчитываются по формуле:

$$H_{(вр)} = T_{(оп)} \left(1 + \frac{K}{100}\right), \quad (1)$$

где  $T_{(оп)}$  – время оперативной работы, ч;

$K$  – сумма времени на подготовительно-заключительные работы, отдых, личные потребности и обслуживание рабочего места, % от оперативного времени.

Нормами времени учитываются подготовительно-заключительное время, время обслуживания рабочего места, время на отдых и личные потребности в размере 8 % от оперативного времени.

Время разработки технологической документации

$$T_p = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6, \quad (2)$$

где  $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$  – норма времени на отработку конструкции сборочной единицы на технологичность с внесением предложений по улучшению, разработку маршрутной карты, операционных карт, карты эскизов, операционных карт для типового технологического процесса, маршрутной карты для типового технологического процесса соответственно.

Время разработки и корректировки технологической документации общего назначения

$$T_k = H_7 + H_8 + H_9, \quad (3)$$

где  $H_7, H_8, H_9$  – норма времени на заполнение и оформление титульного листа, технологической инструкции и карты эскизов.

В связи с тем, что нормативы трудозатрат выражены в часах, расчет затрат на разработку технологической документации будет производиться на основе повременной системы оплаты труда специалистов различной квалификации.

Приняв уровень зарплаты инженера-технолога второй категории как базовый ( $ЗП_б$ ), определим относительный уровень оплаты труда специалистов различной квалификации, выполняющих разработку технологической документации.

Оценка сроков и стоимости выполнения работ:

определение количества наименований деталей и узлов по чертежу, установление нормы времени на выполнение работ;

расчет общей продолжительности работ  $T$ ;

расчет основной заработной платы:

$$ЗП_о = ЗП_б \cdot K_k \left(\frac{T}{8 \cdot 21}\right), \quad (4)$$

где  $ЗП_б$  – базовая заработная плата инженера-технолога второй категории;

$K_k$  – квалификационный коэффициент заработной платы;

$T$  – общая продолжительность работ; (продолжительность рабочего дня – 8 ч; в каждом месяце 21 рабочий день);

расчет дополнительной заработной платы:

$$ЗП_д = ЗП_о \cdot K_d, \quad (5)$$

где  $K_d$  – коэффициент дополнительной заработной платы;

расчет амортизации технических средств в срок амортизации пять лет:

$$A_{т.с} = T \left( \frac{Ц_{т.с}}{12 \cdot 5} \right), \quad (6)$$

где  $Ц_{т.с}$  – стоимость технического средства;  
расчет амортизации программного обеспечения при сроке амортизации три года.

$$A_{п.о} = T \left( \frac{Ц_{п.о}}{12 \cdot 3} \right), \quad (7)$$

где  $Ц_{п.о}$  – стоимость программного обеспечения;  
расчет накладных расходов:

$$H = 3П_о \cdot K_{н.р}, \quad (8)$$

где  $K_{н.р}$  – коэффициент накладных расходов;  
расчет общей стоимости выполнения работ по разработке технологической документации:

$$C = 3П_о + 3П_д + H + A_{т.с} + A_{п.о}. \quad (9)$$

Расчет проводился для четырех депо Восточного полигона, на базе которых внедряется оптимизированная система ремонта.

Для определения общих затрат на разработку и оформление технологической документации в рамках локомотивного ремонтного депо расчет необходимо проводить исходя из сложности разрабатываемого документа и квалификации специалиста, осуществляющего разработку.

Анализ действующей технологической документации показал, что корректировки подлежат порядка 85 технологических процессов. Ввиду того, что сложность технологических процессов разная, для расчетов примем,

– что количество наименований деталей и узлов по чертежу максимальное (от 41 до 45);

– работы по разработке (корректировке) и оформлению технологической документации будут вестись ведущим технологом.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Стоимость разработки и корректировки технологической документации общего назначения ведущим технологом

Наименование показателя	Количество наименований деталей и узлов по чертежу										
	1 – 2	3 – 5	6 – 7	8 – 10	11 – 14	15 – 20	21 – 25	26 – 30	31 – 35	36 – 40	41 – 45
Общее время разработки	1,8	2,7	4,18	5,14	6,58	8,5	11,3	13,8	16,2	18,6	20,9
Основная заработная плата	275,4	424,0	646,9	795,5	1018,3	1315,4	1761,2	2132,6	2504,0	2875,4	3246,9
Дополнительная заработная плата	55,1	84,8	129,4	159,1	203,67	263,1	352,2	426,5	500,8	575,1	649,4
Амортизация оборудования	5,9	9,1	13,8	17,1	21,77	28,1	37,7	45,6	53,5	61,5	69,4
Амортизация программного обеспечения	13,8	21,2	32,4	39,8	51,00	65,9	88,2	106,8	125,4	144,0	162,6
Накладные расходы	82,6	127,2	194,1	238,6	305,50	394,6	528,4	639,8	751,2	862,6	974,1
Итоговая стоимость выполнения работ	432,9	666,3	1016,5	1250,1	1600,5	2067,2	2767,6	3351,3	3935,0	4518,6	5102,4

Стоимость разработки (корректировки) и оформления технологической документации ведущим технологом составит 5102,4 р.

Общая стоимость разработки (корректировки) и оформления технологических процессов в условиях депо

$$C = C_p \cdot N_{т.п}, \quad (10)$$

где  $C$  – общая стоимость разработки (корректировки) и оформления технологических процессов в условиях депо;

$C_p$  – стоимость корректировки технологического процесса определенной сложности, конкретным исполнителем;

$N_{т.п}$  – количество технологических процессов, требующих корректировки.

Общая стоимость разработки (корректировки) и оформления 85 технологических процессов в условиях депо составит

$$5102,4 \cdot 85 = 433704 \text{ р.}$$

Общая стоимость разработки (корректировки) и оформления технологических процессов в условиях нескольких депо

$$C_n = C \cdot n, \quad (11)$$

где  $C_n$  – Общая стоимость разработки (корректировки) и оформления технологических процессов в условиях нескольких депо;

$n$  – количество депо.

Общая стоимость разработки (корректировки) и оформления технологических процессов в условиях четырех депо Восточного полигона

$$433,704 \cdot 4 = 1734,82 \text{ тыс. р.}$$

Таким образом, затраты на разработку (корректировку) и оформление технологической документации по оптимизированной системе ремонта для четырех депо Восточного полигона составят 1734,82 тыс. р.

По результатам испытаний, проводившихся в 2012 – 2013 гг. на Восточном полигоне ОАО «РЖД» для электровозов, ремонт которых осуществлялся по действующей СТОР число случаев неплановых ремонтов в среднем на 20 % меньше, чем у электровозов, обслуживаемых по оптимизированной СТОР, в абсолютных величинах разница составляет 14,4 случая, т. е. увеличение составило 1,44 случая на электровоз. С учетом приписного парка локомотивов общее увеличение количества неплановых ремонтов по всем депо составит 1241 случай.

Затраты от увеличения числа ННР складываются из потерь от простоя электровозов на неплановых ремонтах; потерь, возникающих вследствие задержки грузового поезда, связанных с неграфиковой остановкой грузового поезда, с отправлением резервного локомотива.

Таким образом, суммарные затраты от увеличения числа ННР на 20 % для четырех локомотивных ремонтных депо составили 625777,28 тыс. р.

Притоки денежных средств для четырех ремонтных локомотивных депо Восточного полигона рассчитывались по двум показателям: снижение трудоемкости выполнения работ по циклам ремонта и снижение затрат, связанных с уменьшением числа неплановых ремонтов на 5 % за счет внедрения предложений по совершенствованию организации системы технологической подготовки ремонтного производства.

Суммарные притоки денежных средств для четырех локомотивных ремонтных депо составили 652 279,02 тыс. р.

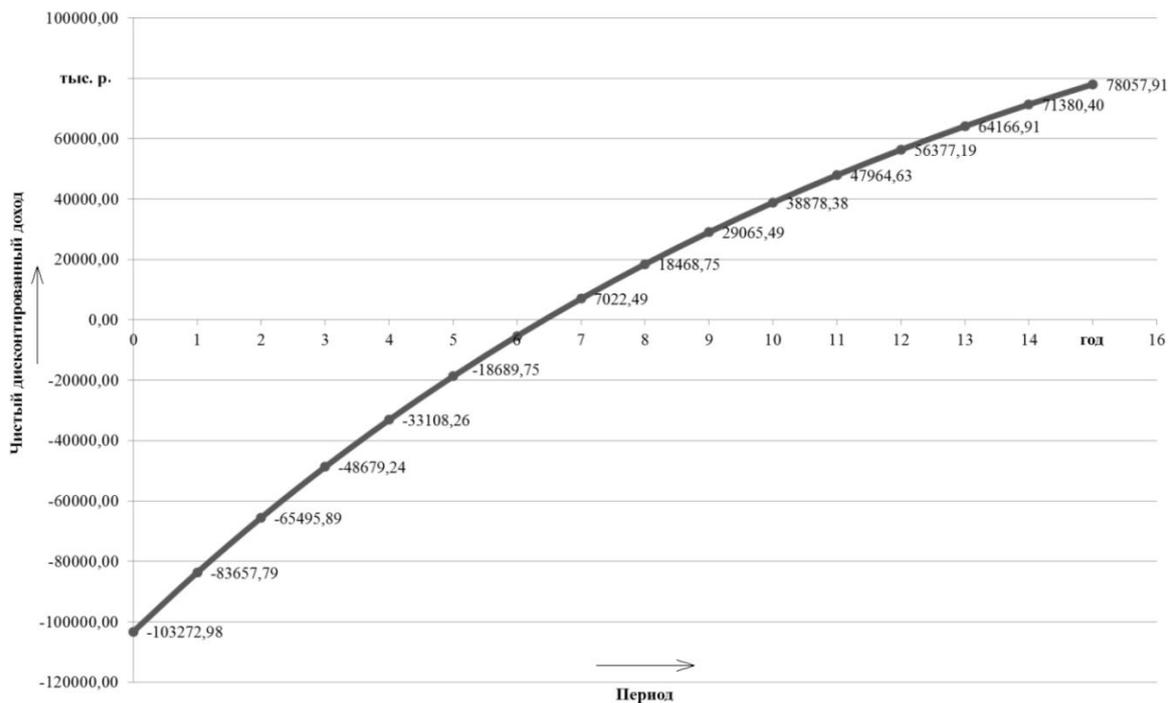
За счет корректировки технологических процессов ремонта электровозов снизится количество отказов в ходе эксплуатации, которые были обнаружены в ходе эксперимента, прово-

дившегося на Восточном полигоне. Затраты на внедрение оптимизированной системы ремонта покрываются за счет выгоды от увеличения межремонтных пробегов и снижения трудоемкости работ на отдельных видах ремонта (рисунок). Чистый дисконтированный доход за пятнадцатилетний период составляет 78057,91 тыс. р.

Срок окупаемости капитальных вложений с учетом дисконтирования затрат определяется как сумма числа лет, предшествующих году окупаемости ( $N_{Г.о}$ ), и отношения невозмещенной стоимости на начало года окупаемости ( $C_H$ ) к дисконтированному денежному потоку в год окупаемости ( $ДДП_{Г.о}$ ).

$$T_{ок} = N_{Г.о} + C_H / ДДП_{Г.о}. \quad (12)$$

Срок окупаемости капитальных вложений с учетом дисконтирования затрат составит 6,43 года.



Чистый дисконтированный доход от корректировки технологического цикла системы технического обслуживания и ремонта электровозов серий ВЛ-80, ВЛ-85, представленной в руководстве по ТО и Р ПКБ ЦТ

Таким образом, проведенный расчет технико-экономической эффективности для Восточного полигона от корректировки технологического цикла системы технического обслуживания и ремонта электровозов серий ВЛ-80, ВЛ-85, представленной в руководстве по ТО и Р ПКБ ЦТ, с учетом мероприятий по совершенствованию организации системы технологической подготовки ремонтного производства, в том числе корректировки и разработки технологических процессов, показал, что среднегодовой экономический эффект за пятнадцатилетний период составит 12088,73 тыс. р. из расчета на четыре локомотивных ремонтных депо Восточного полигона, т. е. оптимизированная система ремонта является экономически выгодной, поскольку снижение себестоимости ремонта и увеличение межремонтных пробегов приведут к снижению затрат и увеличению прибыли даже несмотря на некоторое увеличение отказов электровозов в пути следования.

### Список литературы

1. Эксплуатационные испытания оптимизированной системы ремонта. Программа и методика испытаний ПКБ ЦТ.06.0056 [Текст] / Проектно-конструкторское бюро локомотивного хозяйства. – М., 2012. 43 с.

2. Капустьян, М. Ф. Оптимизация локомотиворемонтного комплекса [Текст] / М. Ф. Капустьян, А. Т. Осяев, С. Г. Шантаренко // Железнодорожный транспорт. – М., 2013. – № 8. – С. 49 – 51.

3. Шантаренко, С. Г. Технологический аудит как инструмент обеспечения эксплуатационной надежности локомотивов [Текст] / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустьян // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 4. – С. 63 – 69.

4. Методические рекомендации по расчету экономической эффективности новой техники и технологии, объектов интеллектуальной собственности и рационализаторских предложений [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2009. – 85 с.

## References

1. *Jekspluatacionnye ispytaniya optimizirovannoj sistemy remonta. Programma i metodika ispytanj, PKB CT.06.0056* (Operational tests optimized system repair. Program and methods of testing PKB TST.06.0056). Moscow, Proektno-konstruktorskoe bjuro lokomotivnogo hozjajstva, 2012, 43 p.

2. Kapust'jan M. F., Osjaev A. T., Shantarenko S. G. Locomotive optimization complex [Optimizacija lokomotivoremontnogo kompleksa]. *Zheleznodorozhnyj transport – Rail transport*, 2013. no.8, pp. 49 – 51.

3. Shantarenko S. G., Kapust'jan M. F. Technology audit as a tool to ensure the operational reliability of locomotives [Tehnologicheskij audit kak instrument obespechenija jekspluacionnoj nadezhnosti lokomotivov]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2011, no. 4. pp. 63 – 69.

4. *Metodicheskie rekomendacii po raschetu jekonomicheskoj jeffektivnosti novoj tehnik i tehnologii, obektov intellektual'noj sobstvennosti i racionalizatorskih predlo-zhenij. Rasporjazhenie ОАО «RZhD» ot 10.11.2009, № 2288r* (Guidelines for calculating cost-effectiveness of the new tech-ki and technology, intellectual property and rationalization proposals. / Order of JSC "Russian Railways" from 10.11.2009 № 2009 2288r), Moscow, 2009.

УДК 621.436-7:62-50

В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МЕТОДАМИ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Выполнено системное описание сложной технической системы (системы топливоиспользования дизельной установки). Модель представлена в форме конечного графа, позволяющего описать физическую природу процессов на принятом уровне детализации. Определены динамические свойства системы: управляемость, устойчивость, состояние – на основе основных положений теории автоматического управления (ТАУ).*

Последовательное и поэлементное описание структуры и функции дизельных систем топливоиспользования (СТИ) транспортных средств, рассматриваемых как сложные технические системы на основе предложенной ранее обобщенной модели [1, 2], позволило установить, что для исследований на выбранном уровне детализации с помощью математического моделирования необходимо обоснованно выбрать вид математической модели системы.

Под понятием «дизельная СТИ» будем понимать сложную (в смысле схемотехники) техническую систему, состоящую из подсистем: собственно дизельный двигатель (линия «цилиндр – поршень»), линий низкого и высокого давления топлива, воздухообеспечения, смазки и охлаждения, отбора мощности, регулирования и управления, т. е. как целенаправленную сложную техническую систему [3].

Установлено [2], что процессы функционирования дизельной СТИ как динамической системы могут быть интерпретированы тремя видами (из числа многих) моделей: непрерывной линейной стационарной детерминированной; непрерывной нелинейной стационарной детерминированной; непрерывной нелинейной стационарной стохастической.

Наиболее полно математический аппарат разработан для первой из названных моделей. Причем эффективным математическим описанием этого вида моделей являются линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами.

Для наглядности и в соответствии с поставленной задачей на данном этапе модель представлена в форме графа, как подграфа обобщенной модели [4]. Эта модель является функционально более общей по сравнению с ранее предложенной, имеет методологическое и теоретическое обоснование [1 – 4].

В графовой модели (рисунок) циклы, определяющие преобразование топлива  $f_0, f_1, \dots, f_{21}$  и воздуха  $b_0, b_1, \dots, b_{20}$ , являются главными, существенными для преобразования химической энергии горючего и окислителя в механическую работу. Другие пять циклов –  $m_1, m_2, \dots, m_{13}$ ;  $t_1, t_2, \dots, t_5$ ;  $y_1, y_2, \dots, y_4$ ;  $r_1, r_2, r_3$ ;  $q_1, q_2$  – являются вспомогательными.

В составе предлагаемой модели описание вершин и связей имеет следующее содержание:  $b_0$  – состояние атмосферы в районе воздухозабора дизеля;  $b_1$  – поступление воздуха в турбокомпрессор;  $b_2$  – сжатие воздуха в компрессоре;  $b_3$  – поступление воздуха в воздухоохладитель;  $b_4$  – поступление воздуха в ресивер;  $b_5$  – процесс наполнения воздухом цилиндров;  $b_6$  – сжатие рабочего вещества в цилиндре;  $b_7$  – теплообмен в цилиндре при сжатии;  $b_8$  – процесс расширения;  $b_9$  – процесс выпуска газа из цилиндра и его движение по выпускной системе;  $b_{10}$  – движение газа в сопловом аппарате газовой турбины;  $b_{11}$  – движение газа через лопатки турбины;  $b_{12}$  – движение газа по газопроводу;  $b_{13}$  – движение газа через нейтрализатор;  $b_{14}$  – движение газа через утилизационный котел;  $b_{15}$  – процесс теплообмена в турбокомпрессоре;  $b_{16}$  – движение газа по выпускной системе;  $b_{17}$  – теплообмен газа со стенками канала;  $b_{18}$  – выход газа в атмосферу;  $b_{19}$  – расширение газа в турбине;  $b_{20}$  – работа газа в турбине;  $f_0$  – состояние топлива в расходной цистерне;  $f_1$  – процесс фильтрации в фильтре грубой очистки;  $f_2$  – движение топлива в шестеренном насосе;  $f_3$  – фильтрация топлива в фильтре тонкой очистки;  $f_4$  – поступление топлива к ТНВД;  $f_5$  – движение топлива в топливном коллекторе;  $f_6$  – процесс нагнетания топлива в трубопроводе высокого давления;  $f_7$  – подъем иглы в форсунке;  $f_8$  – заполнение топливом предсопловой камеры форсунки;  $f_9$  – истечение топлива через сопловые отверстия;  $f_{10}$  – распыливание топлива в камере сгорания;  $f_{11}$  – образование топливного факела;  $f_{12}$  – нагрев капель;  $f_{13}$  – испарение топлива;  $f_{14}$  – диффузия топливных паров;  $f_{15}$  – образование горючей смеси;  $f_{16}$  – предпламенные цепочно-тепловые реакции;  $f_{17}$  – воспламенение горючей смеси в отдельных зонах камеры сгорания;  $f_{18}$  – распространение пламени по горючей смеси;  $f_{19}$  – диффузионное горение распыленного топлива;  $f_{20}$  – образование конечных продуктов сгорания;  $f_{21}$  – диссоциация продуктов сгорания;  $m_1$  – образование механической энергии за счет работы газов в цилиндрах,  $m_2$  – в турбине;  $m_3$  – передача механической энергии на вал турбокомпрессора;  $m_4$  – работа сжатия в турбокомпрессоре;  $m_5$  – передача механической энергии на вал газораспределения;  $m_6$  – передача механической энергии на вал газораспределения;  $m_7$  – затраты работы на привод клапанов газораспределения;  $m_8$  – работа топливopодающей системы;  $m_9$  – передача механической энергии на коленчатый вал,  $m_{10}$  – потребителю,  $m_{11}$  – насосам системы охлаждения,  $m_{12}$  – насосам системы смазки,  $m_{13}$  – вспомогательным агрегатам;  $t_1$  – теплообмен со стенками в цилиндре дизеля;  $t_2$  – передача тепла в систему охлаждения,  $t_3$  – в масло и затем в окружающую среду,  $t_4$  – в детали и затем в окружающую среду,  $t_5$  – от турбокомпрессора;  $y_1$  – движение привода всасывающих клапанов;  $y_2$  – открытие всасывающих клапанов;  $y_3$  – движение привода выпускных клапанов;  $y_4$  – открытие выпускных клапанов;  $r_1$  – состояние всережимного регулятора;  $r_2$  – воздействие на топливную рейку;  $r_3$  – отсечка топливоподачи;  $q_1$  – тепло, воспринятое от условного горючего источника;  $q_2$  – тепло, отданное окружающей среде (холодильному источнику).

Вершинами графовой модели являются входные величины СТИ, характеристики, параметры процесса, вспомогательные и собственные параметры.

Параметры процесса функционирования СТИ – это характеристики подпроцессов, составляющих основной процесс, позволяющие системе выполнить то задание, для которого она разрабатывается. Вспомогательные параметры – это те величины подпроцессов или характеристики вспомогательных процессов, которые не участвуют в реализации главного процесса.

К собственным параметрам относятся физико-химические свойства топлива, геометрические размеры деталей, их вес, масса и т. д.

Характеристики процесса – это те элементы главного подмножества, которые характеризуют основные функции и результаты процесса.

Таким образом, на основе обобщенной модели СТИ ДЭТУ, используя принцип ее декомпозиции, системные критерии выбора и методы математического моделирования, можно методологически и теоретически обосновать вид разрабатываемой модели функционирования и описывать различные функциональные подсистемы СТИ соответствующими моделями [1 – 3] исходя из достигнутых возможностей процесса моделирования. Методологически научной основой моделирования процессов функционирования СТИ является системотехнический подход на базе предложенной обобщенной модели [4].

Учитывая чрезвычайно сложный механизм (взрывное периодическое турбулентное горение) преобразования энергии жидкого углеводородного топлива в механическую работу в цилиндре дизеля, не позволяющего пока точно описать математически эти процессы и управление ими, допустимо для численного моделирования и их интерпретации использование различных подходов, в том числе методов современной теории автоматического управления (ТАУ) и применяемого в ней математического аппарата.

Представляя систему «топливо – дизель – топливная внешняя система» как сложную динамическую, воспользуемся одним из эффективных методов ТАУ – описанием этой системы в пространстве состояний [4 – 8].

Состояние сложной системы можно представить как точку с координатами  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  в некотором пространстве  $n$  измерений (фазовом пространстве).

При его построении добиваются взаимно однозначного и непрерывного соответствия между состояниями системы и точками фазового пространства, т. е. каждому состоянию системы должна соответствовать одна и только одна точка фазового пространства, а каждой точке – одно и только одно состояние системы.

Представляя дизельную СТИ как динамическую систему для ее описания в пространстве состояний, выделим вектор состояний

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – внутренние переменные, совокупность которых полностью характеризует свойства системы и которые являются результатом суммарного воздействия всех других параметров, рассматриваемых ниже.

Таковыми внутренними переменными состояния дизельной СТИ являются критерии, определяющие экономичность, уровень механических и тепловых нагрузок. Достаточно полный перечень их предложен в работе [6] и составляет:  $g_i$  – индикаторный расход топлива;  $P_i$  – среднее индикаторное давление;  $P_z$  – максимальное давление горения;  $(dP/d\phi)_{\max}$  – максимальная скорость нарастания давления;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $T_{cp}$  – средняя температура газов по теплопередаче;  $\alpha_r$  – средний коэффициент теплоотдачи от газа к стенке цилиндра;  $T_{гт}$  – средняя температура газов перед турбиной;  $T_b$  – температура в цилиндре в момент открытия выпускного клапана;  $T_{\max}$  – максимальная температура газа в цилиндре;  $\Delta\phi_{в пр}$  – продолжительность высокотемпературного периода.

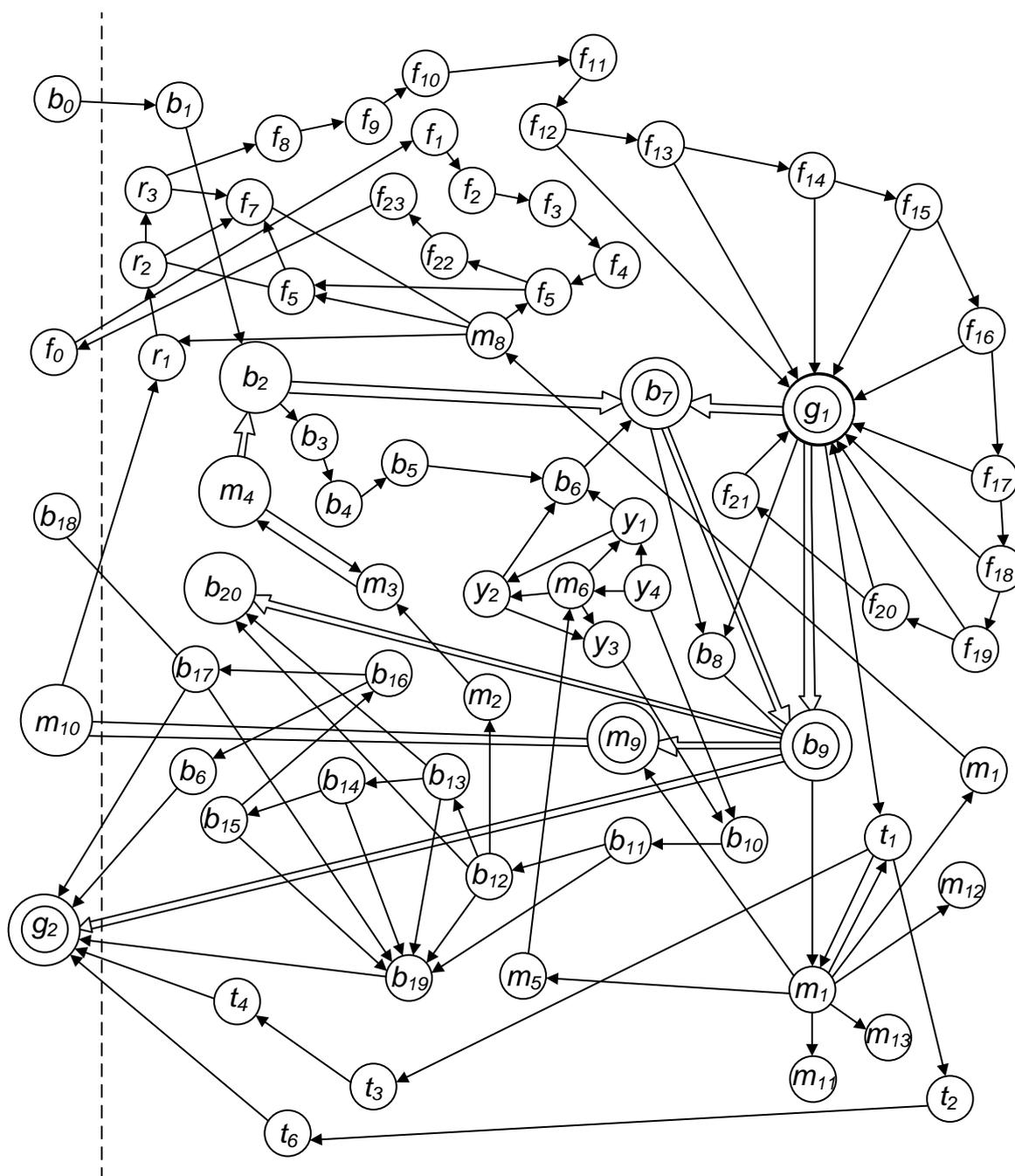
Обычно число значимых компонентов (факторов) невелико. Если учесть, что большинство систем подчиняется принципу Парето, который состоит в утверждении о том, что с точ-

ки зрения характеристик системы существенны лишь некоторые факторы из всех и что в большинстве систем 20 % факторов определяют 80 % свойств системы, а остальные 80 % определяют лишь 20 % свойств, то для последующего анализа выделим из названных параметров наиболее значимые компоненты:  $g_i(t)$ ,  $P_z(t)$ ,  $P_i(t)$ ,  $\alpha(t)$ ,  $(dP/d\varphi)_{\max}(t)$ ,  $T_{\max}(t)$ ,  $T_{ГТ}(t)$ .

Вектор управляющих параметров

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_m), \quad (2)$$

где  $y_1, y_2, \dots, y_m$  – управляющие параметры, на которые можно оказывать прямое воздействие с предъявленными требованиями к системе. К ним можно отнести  $g_{ц}(t)$  – изменение режима цикловой подачи топлива;  $G_b(t)$  – изменение режима подачи воздуха;  $t_{охл}(t)$  – изменение режима охлаждения дизеля;  $Q_{см}(t)$  – изменение режима смазки и т. д. Наиболее значимыми здесь будут первые два параметра.



Графовая модель функционирования системы топливоиспользования дизельной энергетической установки

Вектор возмущающих параметров

$$z = (z_1, z_2, \dots, z_k), \quad (3)$$

где  $z_1, z_2, \dots, z_k$  – возмущающие параметры, значения которых случайным образом изменяются с течением времени и которые недоступны для непосредственного измерения. К ним относятся изменение скорости преобразования топлива (в смеси с воздухом) в тепло как полезно использованное, так и потерянное; общего тепла топлива  $Q_T(t)$ ; полезной работы  $Q_e(t)$ ; унесенного с охлаждающей водой  $Q_B(t)$ , с выхлопными газами  $Q_{вг}(t)$ ; неучтенных потерь  $Q_{ост}(t)$ ; потерь от неполноты сгорания  $Q_{н.с}(t)$ ; изменение режима суммарных потерь тепла топлива  $Q_{с.п}(t)$ .

Отметим также, что качественным факторам отвечает дисперсионный анализ, количественным – регрессионный, а смешанным – ковариационный.

Отображая процесс энергопреобразования в дизельной СТИ в форме блочно-иерархической структуры, выделим три существенных блока: преобразование энергии топлива и воздуха в тепло в цилиндре дизеля, преобразование механических нагрузок, преобразование тепловых нагрузок.

Тогда, группируя переменные состояния и учитывая лишь основные существенные зависимости, составим для них упрощенные математические модели, описывающие динамику преобразований в выбранных структурах.

Так, динамика экономичности СТИ будет характеризоваться системой уравнений баланса:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} [g_i(t) P_i(t)] = Q_e(t) - Q_{сн}(t) P_i(t) + G_B(t) P_{i0} - g_{и}(t) P_i(t); \\ \frac{d}{dt} [g_i(t) \alpha(t)] = Q_{сн}(t) - g_{i0} \alpha(t) + G_B(t) \alpha_0 - g_i(t) \alpha(t); \\ \frac{dg_i(t)}{dt} = g_{и}(t) - Q_{сн}(t), \end{cases} \quad (4)$$

где соответствующие параметры с нулевыми индексами означают их начальные значения.

Динамика изменения механических нагрузок отображается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} [g_i(t) P_z(t)] = Q_e(t) - Q_{сн0}(t) P_z(t) + G_B(t) P_{z0} - g_{и0} P_z(t); \\ \frac{d}{dt} \left[ g_i(t) \left( \frac{dP}{d\phi} \right)_{\max}(t) \right] = Q_e(t) - Q_{сн0} G_B(t) + G_B(t) \left( \frac{dP}{d\phi} \right)_{\max0} - g_{и}(t) \left( \frac{dP}{d\phi} \right)_{\max}(t); \\ \frac{dg_i(t)}{dt} = g_{и}(t) - Q_{сн}(t). \end{cases} \quad (5)$$

Динамика изменения тепловых нагрузок в СТИ характеризуется системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} [g_i(t) T_{\max}(t)] = Q_e(t) - Q_{сн0} T_{\max}(t) + G_B(t) T_{\max0} - g_{и}(t) T_{\max}(t); \\ \frac{d}{dt} [g_i(t) T_{гг}(t)] = Q_e(t) - Q_{сн0} T_{гг}(t) + G_B(t) T_{гг0} - g_{и}(t) T_{гг}(t); \\ \frac{dg_i(t)}{dt} = g_{и}(t) - Q_{сн}(t), \end{cases} \quad (6)$$

где  $T_{\max0}, T_{гг0}$  – начальные значения максимальной температуры газов в цилиндре и перед газовой турбиной.

Раскроем смысловое содержание каждого из уравнений систем (4) – (6), учитывая, что параметры этих уравнений являются функциями.

В системах уравнений (4) – (6) первые уравнения будут соответственно: уравнение связи скорости преобразования индикаторного расхода топлива и среднего индикаторного давления, уравнение связи скорости преобразования индикаторного расхода топлива и максимального давления горения, уравнение связи скорости преобразования индикаторного расхода топлива и максимальной температуры газов в цилиндре.

Вторые уравнения систем (4) – (6) будут: уравнение связи скорости преобразования индикаторного расхода топлива и воздуха в цилиндре дизеля, уравнение связи скорости преобразования индикаторного расхода топлива и максимальной скорости изменения давления в цилиндре, уравнение связи скорости преобразования индикаторного расхода топлива и средней температуры газов перед турбиной. Третье уравнение систем (4) – (6) есть скорость преобразования индикаторного расхода топлива в тепло в цилиндре дизеля при его работе.

Анализ математических моделей (4) – (6) позволяет получить качественные выводы о динамических свойствах: управляемости, наблюдаемости и устойчивости, т. е. рассматривать модели подсистем как обладающие системными свойствами и отражающими процессы в СТИ как в сложной технической системе. Выполнение такого анализа с большой степенью общности возможно с использованием матричного представления систем уравнений, линеаризацией отклонений переменных состояния, управляющих и возмущающих параметров от установившегося состояния, принимая параметры переменными, что делает системы нелинейными.

Известны обширные фундаментальные исследования двигателей внутреннего сгорания как регулируемых объектов, которые можно интерпретировать как подсистемы дизельных СТИ, выполненные Крутовым В. И. [9].

Настоящее исследование допустимо считать более общим подходом, который базируется на предложенной ранее обобщенной модели дизельной СТИ [2, 3].

Рассматривая систему (4) как подсистему СТИ, выполним процедуру линеаризации параметров системы уравнений (4).

Вводя малые отклонения переменных, получим:

$$P_i(t) = P_{i0} + \xi_1(t); \quad (7)$$

$$g_i(t) = g_{i0} + \xi_2(t); \quad (8)$$

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \xi_3(t); \quad (9)$$

$$g_{ц}(t) = g_{ц0} + \mu_1(t); \quad (10)$$

$$G_{в}(t) = G_{в0} + \mu_2(t); \quad (11)$$

$$Q_e(t) = Q_{e0} + \nu_1(t); \quad (12)$$

$$Q_{сп}(t) = Q_{сп0} + \nu_2(t). \quad (13)$$

Таким образом, векторами состояний, управлений и возмущений приняты соответственно

$$\vec{\xi}(t), \vec{\mu}(t), \vec{\nu}(t). \quad (14)$$

В качестве примера анализа рассмотрим систему (4), подставляя в которую формулу (9), после преобразований, выполненных ниже, получим:

$$\vec{\xi}(t) = A\vec{\varphi}(t) + B\vec{\mu}(t) + C\vec{\nu}(t), \quad (15)$$

где  $A, B, C$  – матрицы.

Если ввести уравнение переменных состояния в результате их измерения в форме

$$\vec{y}(t) = D\vec{\xi}(t) + \vec{W}(t), \quad (16)$$

где  $D$  – матрица измерений;  $\vec{W}(t)$  – вектор помех при измерениях, то системы (14) и (15) представляют собой динамическую математическую модель процесса преобразования топлива и воздуха в тепло в цилиндре дизеля, учитывающую переменный характер параметров (как функций времени).

Итак, после подстановки формулы (9) в (4) и последующих преобразований получим линейризованные уравнения состояния:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_2(t) P_{i0} + \dot{\xi}_1(t) g_{i0} = v_1(t) - v_2(t) \xi_1(t) + \mu_2(t) P_{i0} - \mu_1(t) \xi_1(t); \\ \dot{\xi}_2(t) \alpha_0 + \dot{\xi}_3(t) g_{i0} = v_2(t) - g_{i0} \xi_3(t) + \mu_2(t) \alpha_0 - \mu_1(t) \xi_3(t); \\ \dot{\xi}_2(t) = \mu_1(t) - v_2(t). \end{cases} \quad (17)$$

Проводя замену  $\vec{\xi}_2(t)$  и группируя составляющие уравнений, систему (17) приводим к виду:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1(t) = -\frac{v_2(t) + \mu_1(t)}{g_{i0}} \xi_1(t) - \frac{P_{i0}}{g_{i0}} \mu_1(t) + \frac{P_{i0}}{g_{i0}} \mu_2(t) + \frac{1}{g_{i0}} v_1(t) - \frac{P_{i0}}{g_{i0}} v_2(t); \\ \dot{\xi}_2(t) = \mu_1(t) - v_2(t); \\ \dot{\xi}_3(t) = -\frac{1}{g_{i0}} \mu_1(t) \xi_3(t) - \frac{\alpha_0}{g_{i0}} \mu_1(t) - \frac{\alpha_0}{g_{i0}} \mu_2(t) + v_2(t) \frac{\alpha_0 - 1}{g_{i0}}. \end{cases} \quad (18)$$

Тогда в уравнении (14) с учетом (18) будем иметь матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{G_{в0} + g_{ц0}}{g_{i0}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1 + g_{ц0}}{g_{i0}} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{P_{i0}}{g_{i0}} & \frac{P_{i0}}{g_{i0}} & \frac{1}{g_{i0}} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{\alpha_0}{g_{i0}} & -\frac{\alpha_0}{g_{i0}} & 0 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} -\frac{P_{i0}}{g_{i0}} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ \frac{\alpha_0 - 1}{g_{i0}} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Представление модели процесса, описанного системой уравнений (4), в матричной форме позволяет заключить, что процесс управляем (ранг матрицы управляемости равен трем); подсистема асимптотически устойчива (по критерию Гурвица); процесс является стохастическим, так как содержит возмущающие параметры, флуктуирующие под влиянием изменения режима работы дизельной СТИ.

Проверка адекватности подобных моделей предполагает широкую постановку экспериментальных исследований с учетом процессов, имеющих случайную природу.

Такие исследования связаны с определением характеристик нагружения дизеля (выходных параметров) в составе СТИ и их связи со стохастичностью переменных состояния при использовании разных по свойствам видов топлива (входных переменных) и режимными факторами (управляющими переменными), что предполагает решение задачи анализа на основе формирования и реализации вероятностных моделей, например, связи закона подачи топлива и процесса горения. Отдельные результаты в этом направлении имеются, а исследования проводятся.

Другим направлением исследований является изучение возможности оптимального управления дизельной СТИ на основе принципа максимума, когда техническим воплощением результата будет, например, оптимальный регулятор системы по выбранному критерию (по расходу топлива).

Таким образом, предложенный подход базируется на самых общих (формальных) представлениях и является системным в отношении взаимосвязей рассматриваемых параметров дизельной СТИ как целенаправленной сложной технической системы.

## Список литературы

1. Ведрученко, В. Р. Повышение эффективности топливоиспользования дизельных транспортных средств применением системной методологии исследований [Текст] / В. Р. Ведрученко // Двигателестроение. – Санкт-Петербург, 1991. – № 1. – С. 47, 48.
2. Ведрученко, В. Р. Методология выбора системной модели функционирования систем топливоиспользования дизельных транспортных средств [Текст] / В. Р. Ведрученко // Совершенствование быстроходных дизелей: Межвуз. сб. науч. тр. / Алтайский политехн. ин-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 1991. – С. 110 – 120.
3. Ведрученко, В. Р. Ресурсные модели систем топливоиспользования дизельных транспортных средств [Текст] / В. Р. Ведрученко // Изв. вузов. Машиностроение. – М., 1993. – № 1. – С. 81 – 85.
4. Ведрученко, В. Р. Топливоиспользование в тепловозных дизелях. Системные методы исследований: Учебное пособие [Текст] / В. Р. Ведрученко / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 1990. – 89 с.
5. Двойрис, Л. И. Математическое моделирование процесса массообмена в системах смазки судовых ДВС в пространстве состояний [Текст] / Л. И. Двойрис // Двигателестроение. – Санкт-Петербург, 1984. – № 6. – С. 25, 26.
6. Липчук, В. А. Неформальный метод поиска оптимального решения рабочего процесса дизеля [Текст] / В. А. Липчук // Двигателестроение. – Санкт-Петербург, 1979. – № 8. – С. 9, 10.
7. Квакернаак, Х. Линейные оптимальные системы управления [Текст] / Х. Квакернаак, Р. Сиван. – М.: Мир, 1977. – 650 с.
8. Деруссо, П. Пространство состояний в теории управления (для инженеров) [Текст] / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз. – М.: Наука, 1970. – 620 с.
9. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1968. – 535 с.

## References

1. Vedruchenko V. R. Improving fuel efficiency of diesel vehicles using a systematic methodology of research [Povyshenie effektivnosti toplivoispol'zovaniia dizel'nykh transportnykh sredstv primeneniem sistemnoi metodologii issledovaniia]. *Dvigatellestroenie – Engine building*, 1991, no. 1, pp. 47, 48.
2. Vedruchenko V. R. Methodology selection system model systems functioning toplivoispol'zovaniia diesel vehicles [Metodologiya vybora sistemnoi modeli funktsionirovaniia sistem toplivoispol'zovaniia dizel'nykh transportnykh sredstv]. *Improved speed diesel engines – Sovershenstvovanie bystrohodnykh dizelej*, 1991, pp. 110 – 120.
3. Vedruchenko V. R. Resource model systems of diesel fuel use of vehicles [Resursnye modeli sistem toplivoispol'zovaniia dizel'nykh transportnykh sredstv]. *Proceedings of the universities. Engineering – Izvestija vuzov. Mashinostroenie*, 1993, no. 1, pp. 81 – 85.
4. Vedruchenko V. R. *Toplivoispol'zovanie v teplovozykh dizeliakh. Sistemnye metody issledovaniia: Uchebnoe posobie* (Fuel usage in diesel engines. System research methods). Omsk: Omskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniia, 1990, 89 p.
5. Dvojris L. I. Mathematical modeling of mass transfer in marine engine lubrication systems in the state space [Matematicheskoe modelirovanie protsessa massoobmena v sistemakh smazki sudovykh DVS v prostranstve sostoianii]. *Engine building – Dvigatellestroenie*, 1984, no. 6, pp. 25 – 26.
6. Lipchuk V. A. informal method of finding the optimal solution workflow diesel [Neformal'nyi metod poiska optimal'nogo resheniia rabochego protsessa dizelia]. *Engine building – Dvigatellestroenie*, 1979, no. 8, pp. 9, 10.

7. Kvakernaak Kh., Sivan R. *Lineinye optimal'nye sistemy upravleniia* (Linear optimal control systems). Moscow: Mir, 1977, 650 p.
8. Derusso P., Roj R., Klouz Ch. *Prostranstvo sostoianii v teorii upravleniia (dlia inzhenerov)* (The state space in control theory (for engineers)). Moscow: Nauka, 1970, 620 p.
9. Krutov V. I. *Avtomaticeskoe regulirovanie dvigatelei vnutrennego sgoraniia* (Automatic control of internal combustion engines). Moscow: Mashinostroenie, 1968, 535 p.

УДК 621.336.2

М. Н. Емельянова

## ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПРОВОДА КОНТАКТНОЙ СЕТИ

*Рассмотрены условия работы проводов контактной сети в части термомеханических нагрузок. Проанализированы результаты испытаний проводов контактной сети с целью определения относительной скорости удлинения провода.*

*Представлены результаты испытаний контактных проводов и несущих тросов по определению разрывного усилия при различной температуре. Предложены допустимые значения температуры нагрева для медных и бронзовых проводов в условиях эксплуатации и коэффициенты запаса прочности для них.*

Провода контактной сети для подвесок различного типа могут нагреваться током до 100 – 120 °С, при этом механическая нагрузка составляет от 10 до 21 кН. По существующим нормативам допустимая температура нагрева проводов контактной сети в течение 1 мин должна быть не более 140 °С [1]. Кратковременный или длительный нагрев вызывает также снижение прочности проводов, что приводит к значительному уменьшению коэффициента запаса прочности. В связи с повышением натяжения и увеличением нагрузок на провода контактной сети возникает необходимость исследовать величину усилия, при котором разрушаются провода контактной сети – контактный провод и несущий трос. Несмотря на существенную роль несущего троса в контактной подвеске было проведено очень мало исследований по обоснованию выбора для этого троса термомеханических нагрузок. В труде специалистов компании Siemens [2] термин «несущий трос» упоминается только четыре раза.

В соответствии с требованиями документа [1] коэффициенты запаса прочности проводов контактной сети должны быть не менее: для стальных тросов компенсаторов – 4; для продольных и фиксирующих тросов – 3; для контактных проводов – 2,5; для несущих тросов – 2. Провода и тросы, которые испытывают в процессе эксплуатации только механическую нагрузку, имеют коэффициент запаса 4 или 3, а провода, по которым протекает электрический ток и вызывает их нагрев, имеют коэффициент запаса 2. Контактный провод, который подвергается механической и термической нагрузке и изнашивается в процессе токосъема, имеет коэффициент запаса 2,5. В результате анализа условий работы проводов контактной сети было установлено, что больше всего нагрузок (от подвешенных к тросу проводов контактной сети, от ветра и гололеда) приходится на несущий трос. При тепловых расчетах несущий трос первым достигает предельной температуры и является лимитирующим по токовой нагрузке. В эксплуатации несущий трос подвержен значительным термомеханическим нагрузкам. Количество повреждений несущего троса не снижается и является одной из частых причин нарушения нормальной работы устройств контактной сети.

Были проведены исследования зависимости прочности контактных проводов от нагрузки [3]. Для исследования на полигоне контактной сети ОАО «ВНИИЖТ» был создан стенд по определению низкотемпературной ползучести проводов. При сочетании механической и термической нагрузок в медных и бронзовых проводах определяли значения установившейся скорости их удлинения.

Результаты относительной скорости удлинения контактных проводов были сопоставлены с предварительно проведенными расчетами по допустимой скорости их удлинения [4]. Значения скорости удлинения по этим расчетам не должны были превышать: медных и низколегированных – не более  $15 \cdot 10^{-9}$  %/ч, бронзовых – не более  $12 \cdot 10^{-9}$ .

Полученные значения относительной скорости удлинения для разных типов контактных проводов приведены на рисунке 1.

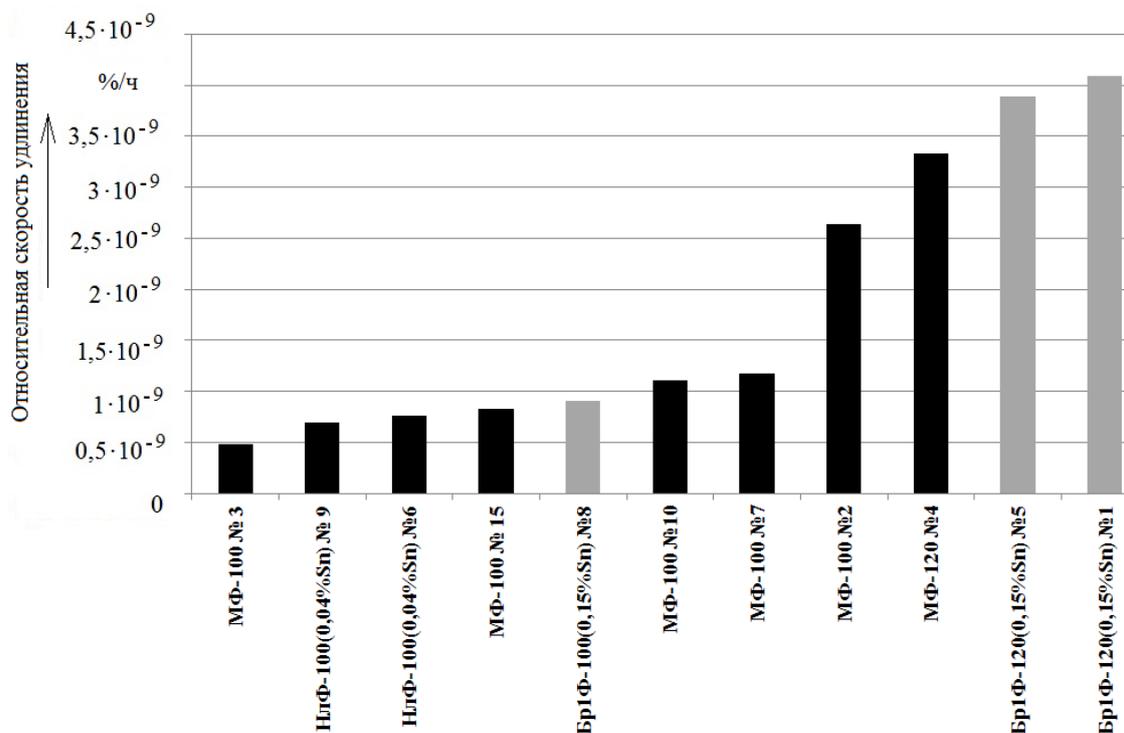


Рисунок 1 – Относительная скорость удлинения контактных проводов

Испытания проводились на стенде по методике, разработанной ранее [3]. Усилие натяжения подбиралось таким образом, чтобы обеспечить напряжение растяжения  $210 \text{ Н/мм}^2$  для бронзовых проводов,  $180 \text{ Н/мм}^2$  для медных и низколегированных. При сочетаниях заданной температуры провода ( $150 \text{ }^\circ\text{C}$  для бронзовых и  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  для низколегированных и медных) и напряжений в проводе определялось его удлинение в течение 720 ч. Реальные значения относительной скорости удлинения контактных проводов оказались не хуже нормативных значений. В то же время удлинение бронзовых проводов происходит быстрее, чем медных, что можно объяснить отличными условиями испытаний.

Для дальнейшего анализа условий работы проводов контактной сети были выполнены испытания с целью определения изменения разрывного усилия контактных проводов и несущих тросов при различной температуре. При этом необходимо отметить, что нагревание проводов до заданной температуры кратковременное. По достижении заданной температуры к проводу прикладывалась нагрузка, приводящая к разрушению, так, что провод находился в нагретом состоянии не более 10 – 15 с. После охлаждения свойства провода восстанавливались.

Были проведены испытания контактных проводов для определения разрывного усилия при различной температуре. Испытания заключались в определении разрывного усилия контактных проводов при нагреве от  $20$  до  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определялась мгновенная потеря прочности при нагреве до заданной температуры. Схема стенда для испытаний по определению разрывного усилия проводов контактной сети приведена на рисунке 2. Объектом испытаний были контактные провода, изготовленные из меди и сплавов на ее основе марки МФ-100, Бр1Ф-100 (0,15 %Sn), МФ-120, Бр1Ф-120 (0,15 %Sn).

На разрывную машину 1 между двумя изоляторами 3 был смонтирован испытуемый образец провода 6. Верхний и нижний концы провода для нагрева были присоединены к источнику питания 7 через питающие зажимы 4. На участке провода 5 были подключены термодатчики для контроля температуры нагрева провода. Участок провода нагревался постоянным током от источника питания. Величина тока подбиралась такой, чтобы достигнуть заданной по условиям испытаний температуры. При достижении необходимой температуры оператор запускал разрывную машину с подачей постепенной нагрузки на образец провода до его разрыва. Значение разрывного усилия определялось с помощью установленного динамометра 2. При достижении заданной температуры оператор с помощью термовизора снимал термограмму нагрева образца контактного провода в момент разрыва. На рисунке 3 приведена термограмма нагрева при разрыве контактного провода марки Бр1Ф-100 (0,15 %Sn). Заданная температура провода – 90 °С.

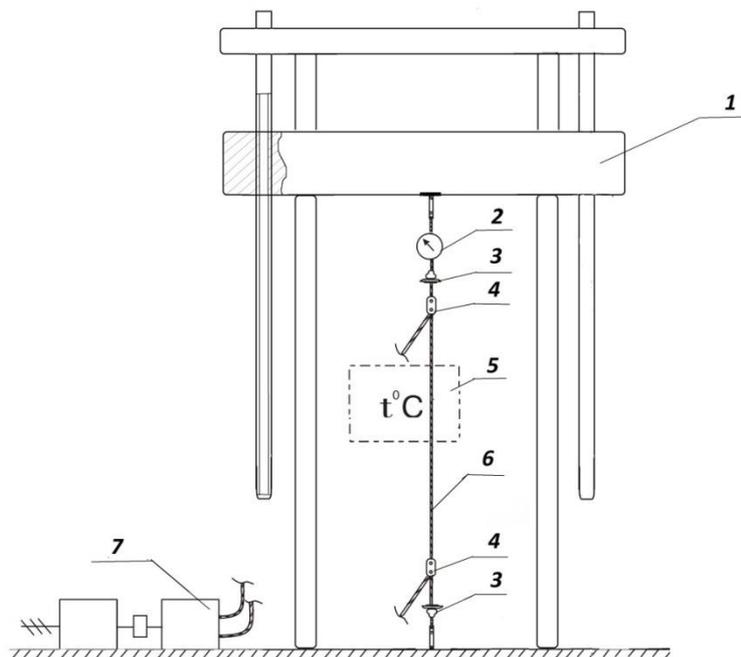


Рисунок 2 – Схема стенда для испытаний по определению разрывного усилия проводов контактной сети при нагреве



Рисунок 3 – Термограмма нагрева при разрыве контактного провода марки Бр1Ф -100 (0,15 %Sn) при температуре 90 °С (в момент разрыва)

На рисунке 4 показаны полученные удельные разрывные усилия для медных и бронзовых проводов при заданной температуре. Получено, что при повышении температуры контактных проводов до 150 °С удельное разрывное усилие медных и бронзовых проводов снижается на 9 %.

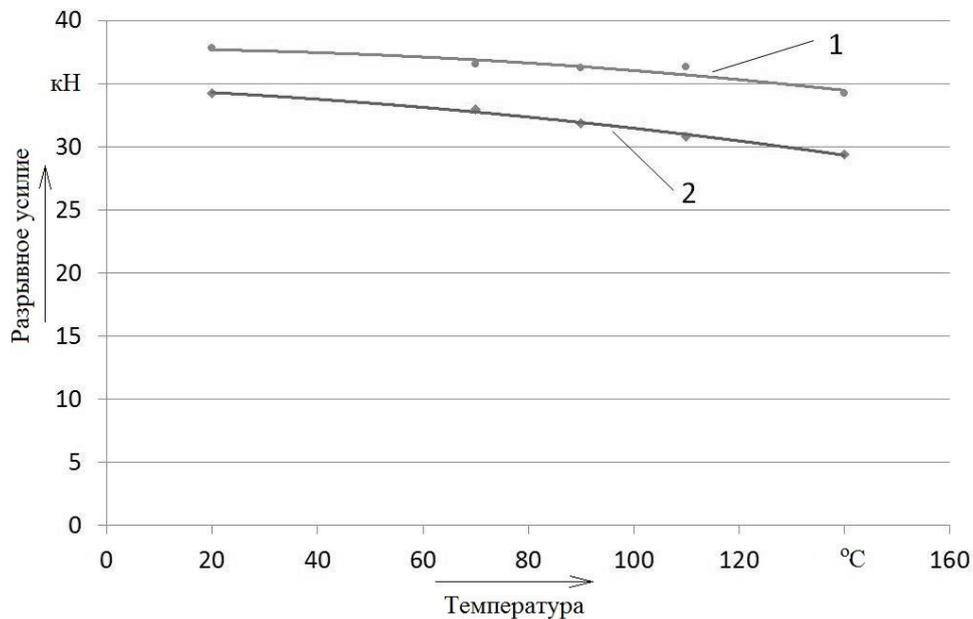


Рисунок 4 – Разрывное усилие бронзовых (1) и медных (2) контактных проводов

Проведены испытания несущих тросов по определению разрывного усилия при различной температуре и по определению разрушающей нагрузки несущих тросов, изготовленных из проволоки меди М-120 и сплава меди с 0,2 % олова Бр1-120 по той же методике, что и для контактных проводов. Значения температуры составляли, °С: 20; 90; 120 и 150. В каждом режиме испытывали по два образца каждого типа провода. На рисунке 5 приведена термограмма при разрыве несущего троса марки М-120 при температуре 150 °С.

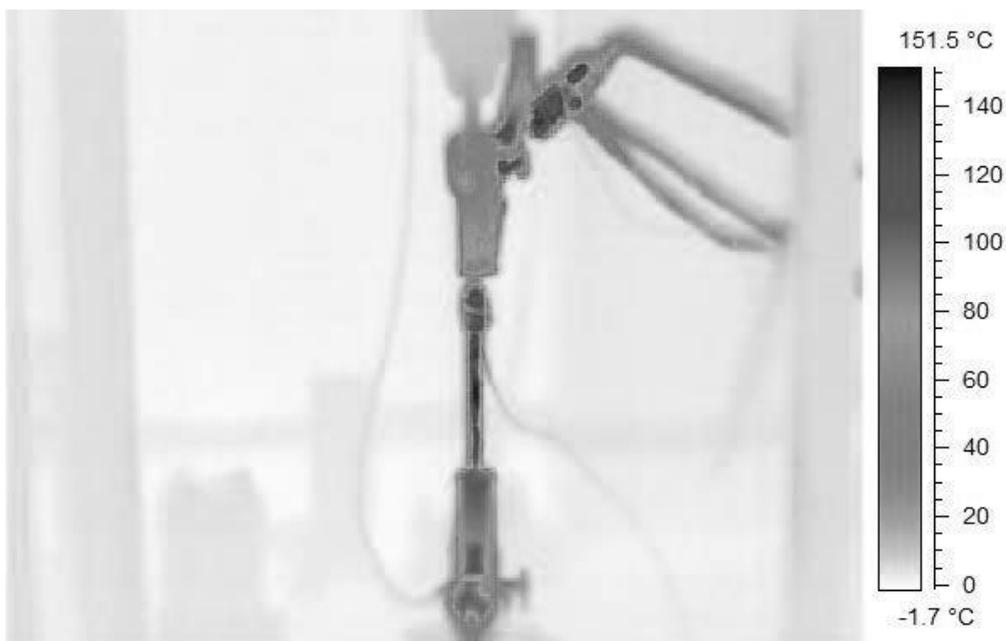


Рисунок 5 – Термограмма при разрыве несущего троса марки М-120 при температуре 150 °С (в момент разрыва)

Полученные разрывные усилия для медных и бронзовых несущих тросов при заданной температуре показаны на рисунке 6.

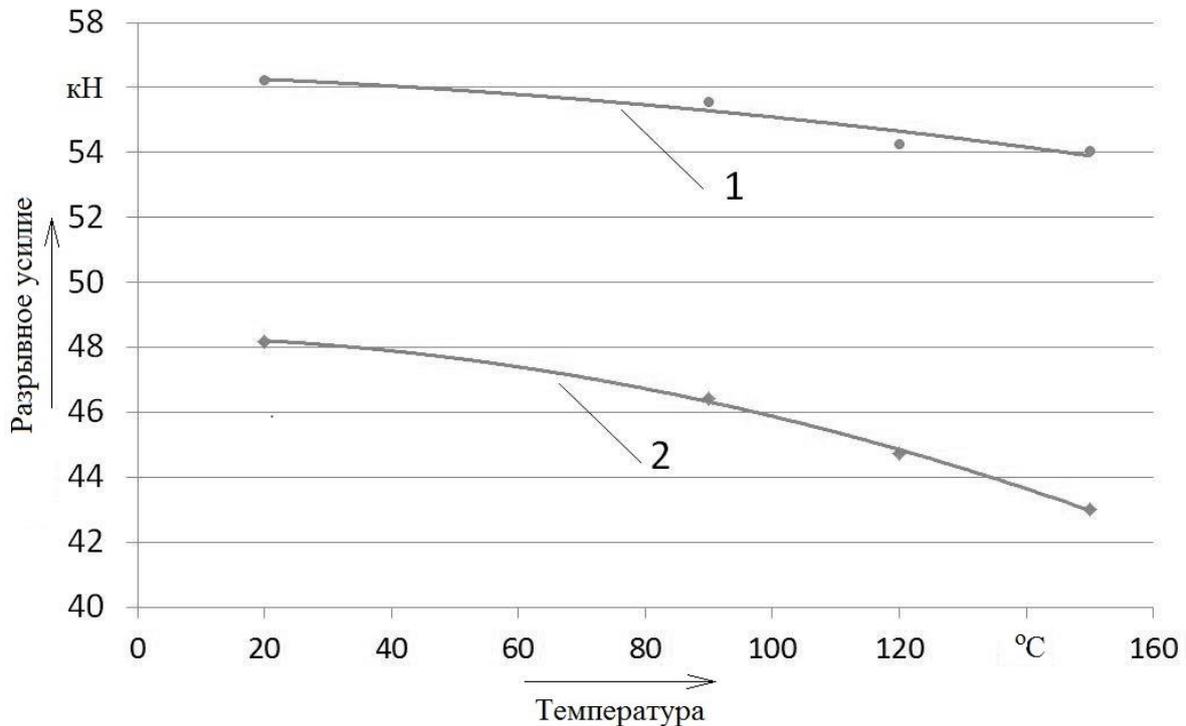


Рисунок 6 – Разрывное усилие бронзового Бр1-120 (1) и медного М-120 (2) несущих тросов

Установлено, что при повышении температуры несущих тросов до 150 °С разрывное усилие медных несущих тросов снижается на 11 %, а бронзовых – на 4.

Проведенные исследования показали, что нагрев медных проводов до температуры выше 90 °С и бронзовых проводов до температуры выше 120 °С приводит к значительному мгновенному снижению прочности проводов. Длительный нагрев проводов при механической нагрузке может вызывать разупрочнение проводов вследствие их ползучести. Причем указанные нагрузки являются допустимыми по существующим нормативам. Учитывая, что в таблице 2.3.1 работы [1] указаны более высокие значения допустимой температуры нагрева при длительности протекания тока в одну минуту, можно предположить, что условия работы проводов близки к критическим и существующего коэффициента запаса прочности недостаточно для их надежной работы с учетом возможных рисков. Предлагается изменить нормативные требования для контактных проводов и несущих тросов по допустимому нагреву и убрать разделение на кратковременный и длительный нагрев, а оставить только допустимый нагрев.

### Список литературы

1. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868) [Текст]. – М.: Трансиздат, 2002. – 184 с.
2. Contact Lines for Electrical Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance, 2nd Edition / F. Kiessling, R. Puschmann and others. – Wiley Publishers, 2012. – 994 p.
3. Миронос, Н. В. К вопросу о допустимой термомеханической нагрузке на контактный провод [Текст] / Н. В. Миронос, П. Г. Тюрнин, И. С. Гершман // Токосъем и тяговое электрообеспечение при высокоскоростном движении на постоянном токе: Сб. науч. тр. – М.: Интекст, 2010. – С. 164 – 172.
4. НБ ЖТ ТМ 03-98 Провода контактные из меди и ее сплавов. Нормы безопасности [Текст] / МПС России. – М., 1998. – 24 с.

## References

1. *Pravila ustroystva i tekhnicheskoi ekspluatatsii kontaknoi seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog (TsE-868)* (The rules of construction and technical exploitation of the contact system of electrified Railways (TsE -868)). Moscow: Transizdat, 2002, 184 p.
2. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E. *Contact Lines for Electrical Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance*, 2nd Edition. 2009, 994 p.
3. Mironos N. V., Tiurnin P. G., Gershman I. S. To the question of valid thermo-mechanical load on the contact wire [K voprosu o dopustimoi termomekhanicheskoi nagruzke na kontaktnyi provod]. *Sbornik nauchnykh trudov OAO «VNIIZhT» «Tokos"em i tiagovoe elektro-snabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoiannom toke»* (Proc. of JSC «All-Russian research Institute of railway transport» «Power collection and traction electricity at high-speed movement on DC»). Moscow: Intekst, 2010, pp. 164 – 172.
4. NB ZhT TM 03-98 *Provoda kontaktnye iz medi i ee splavov. Normy bezopasnosti (NB ZhT TM 03-98 The contact wire of copper and its alloys. Safety standards)*. Moscow, 1998.

УДК 621.316.97

В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, Н. К. Слептерева

## РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НАД КАБЕЛЕМ С ПОВРЕЖДЕНИЕМ

*В статье приведен расчет напряженности магнитного поля над кабелем с повреждением. Представлена схема замещения цепи «жила – оболочка» с повреждением. Жила и оболочка при этом рассматриваются как две однопроводные линии, нагруженные на волновые сопротивления для исключения отражений. Для данной схемы замещения определено изменение синусоидального сигнала по жиле и оболочке кабеля. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в месте повреждения ток в жиле кабеля значительно изменяется, а на оболочке достигает максимального значения. Рассчитаны значения коэффициента экранирования на разных частотах для алюминиевого сплошного трубчатого и стального спирального проводников, представляющие собой оболочку и броню кабеля. Определена напряженность магнитного поля на поверхности земли над кабелем с металлической оболочкой, имеющим повреждение типа «жила – оболочка», с учетом коэффициента экранирования оболочки. Результаты показывают, что в месте повреждения изоляции между токоведущей жилой и оболочкой модуль напряженности магнитного поля и его фаза получают приращение, которое может быть зафиксировано на поверхности земли. Результаты расчета позволят усовершенствовать методы и аппаратные средства поиска мест повреждения изоляции кабелей.*

Преимуществами использования кабелей в полимерном изолирующем покрове является высокое переходное сопротивление металлических элементов кабеля относительно земли, обеспечивающее надежную защиту от всех видов коррозии. При этом полимерный изолирующий покров в процессе транспортировки, укладки и эксплуатации кабеля может быть поврежден. При поиске мест повреждения кабелей приемная часть аппаратуры позволяет определить местоположение повреждения путем обработки информативных относительно повреждения параметров сигнала. При использовании индуктивного метода поиска информативным сигналом является напряженность магнитного поля. Если кабель имеет металлические защитные покровы, для определения напряженности магнитного поля от кабеля на поверхности земли следует учесть коэффициент экранирования. В этом случае необходимо рассмотреть поток энергии от источника возмущения, распространяющегося в радиальном направлении, к трубчатому экрану, представляющему собой металлическую оболочку, далее – через экран в экранированное пространство. Наибольшую значимость имеют затухания в толще экрана и за счет отражения на границах «диэлектрик – оболочка – диэлектрик» [1].

Результирующий коэффициент экранирования сплошного трубчатого проводника

$$S = \frac{1}{ch(kt)} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left( \frac{r_3 \sqrt{j\omega\mu\sigma}}{n} + \frac{n}{r_3 \sqrt{j\omega\mu\sigma}} \right) th(kt)}, \quad (1)$$

где  $r_3$  – внутренний радиус экрана;

$k = \sqrt{j\omega\mu\sigma}$  – волновое число среды;

$t$  – толщина экрана;

$n=1$ ;

$\omega$  – круговая частота;

$\mu$  – магнитная проницаемость;

$\sigma$  – удельная проводимость.

Модуль коэффициента экранирования поглощения показывает степень экранирования, угол – сдвиг фазы, который претерпевает электромагнитное поле, проходя через экран. Экранирование отражения связано с несоответствием волновых характеристик материала экрана и диэлектрика, окружающего экран. Таким образом, чем больше отражение энергии на границе раздела «диэлектрик – металл – диэлектрик», тем выше экранирующий эффект экрана и меньше соответствующий коэффициент.

При рассмотрении кабельных экранов следует учитывать, что экран конструктивно выполняется из спирально намотанных лент или проволок. Экранирующие характеристики спирального и сплошного экрана отличаются на параметр  $\chi$ .

Коэффициент экранирования спирального экрана [1]

$$S = \frac{2\chi n}{r\sqrt{j\omega\mu\sigma} + 2n\chi}, \quad (2)$$

где  $\chi = \frac{1}{2nI_n \left( \frac{2\pi r_3}{h} n \right) K_n \left( \frac{2\pi r_3}{h} n \right)}$  – фактор спиральности экрана;

$I_n, K_n$  – модифицированные функции Бесселя;

$h$  – шаг спиральности.

При  $h \rightarrow \infty$  формулы для экранирующих характеристик аналогичны формулам для сплошного экрана.

В таблице представлены значения коэффициента экранирования на разных частотах для алюминиевого сплошного трубчатого и стального спирального проводников с внутренним радиусом 29 мм и толщиной 1,65 мм.

Коэффициент экранирования трубчатого проводника

Частота $f$ , Гц	Сплошной трубчатый проводник	Спиральный трубчатый проводник
50	0,78	0,93
100	0,78	0,90
500	0,73	0,79
1000	0,62	0,72
5000	0,19	0,52
10000	0,08	0,43

Расчет напряженности магнитного поля над кабелем проводится по следующим формулам [2]:

$$H_y = \frac{I}{2\pi} \left[ \int_0^3 \left[ \frac{\alpha_3 \lambda}{2(\alpha_3 + \alpha_B)} e^{-\alpha_3 h} - \frac{1}{4} \lambda e^{-\lambda h} \right] H_0^{(1)}(\lambda r) d\lambda + \right. \\ \left. + \int_0^3 \left[ \frac{\alpha_3 \lambda}{2(\alpha_3 + \alpha_B)} e^{-\alpha_3 h} - \frac{1}{4} \lambda e^{-\lambda h} \right] H_0^{(2)}(\lambda r) d\lambda + \frac{0,5h}{R^3} \right]; \quad (3)$$

$$H_z = \frac{I}{2\pi} \frac{y}{r} \left[ \int_0^3 \left[ \frac{\lambda^2}{2(\alpha_3 + \alpha_B)} e^{-\alpha_3 h} - \frac{1}{4} \lambda e^{-\lambda h} \right] H_1^{(1)}(\lambda r) d\lambda + \right. \\ \left. + \int_0^3 \left[ \frac{\lambda^2}{2(\alpha_3 + \alpha_B)} e^{-\alpha_3 h} - \frac{1}{4} \lambda e^{-\lambda h} \right] H_1^{(2)}(\lambda r) d\lambda + \frac{0,5}{R} \left( 1 - \frac{h^2}{R^2} \right) \right], \quad (4)$$

где  $r = \sqrt{(x-s)^2 + (y-y')^2}$ ;

$s$  и  $y'$  – координаты элементарного источника;

$x, y, z$  – координаты точки наблюдения;

$H_0^{(1)}, H_0^{(2)}$  и  $H_1^{(1)}, H_1^{(2)}$  – функции Ганкеля первого и второго рода;

$h$  – глубина заделки кабеля;

$\alpha_3 = \sqrt{\lambda^2 + m_3^2}$ ;  $\alpha_B = \sqrt{\lambda^2 + m_B^2}$ ;

$\lambda$  – переменная интегрирования;

$R = \sqrt{r^2 + z^2}$ .

В данном случае кабель расположен вдоль оси  $x$ ,  $z$  – нормаль к поверхности земли, ось  $y$  перпендикулярна направлению кабеля. Для численных расчетов достаточно принять  $\lambda=3$ ,  $\alpha_3 = \alpha_B = \lambda$ . Интервал интегрирования выбран от 0 до 3, так как установлено, что на данном промежутке функция имеет наибольшие значения.

Если кабель имеет повреждение изолирующего покрытия, поле кабеля определяется суперпозицией полей до и после повреждения. Результирующая напряженность магнитного поля определяется по составляющим поля:

$$\vec{H} = \sqrt{H_y^2 + H_z^2}. \quad (5)$$

При расчете напряженности магнитного поля над кабелем с металлическими защитными покровами следует учесть коэффициент экранирования, тогда формула (5) примет вид:

$$\vec{H} = \sqrt{(S \cdot H_y)^2 + (S \cdot H_z)^2}. \quad (6)$$

Рассмотрим распределение напряженности магнитного поля на поверхности земли над кабелем, имеющим замыкание жилы на оболочку. Схема замещения системы «жила – оболочка» представлена на рисунке 1, в таком случае жила и оболочка представляются как две однопроводные линии.

Расчет распределения токов и напряжений по жиле и оболочке следует выполнять с применением уравнений однородной линии с соответствующими им параметрами ( $Z_{н ж}$ ,  $Z_{н об}$ ,  $\gamma_{ж}$ ,  $\gamma_{об}$ ,  $Z_{в ж}$ ,  $Z_{в об}$ ). Величины, входящие в расчетные формулы, понятны из рисунка 1.

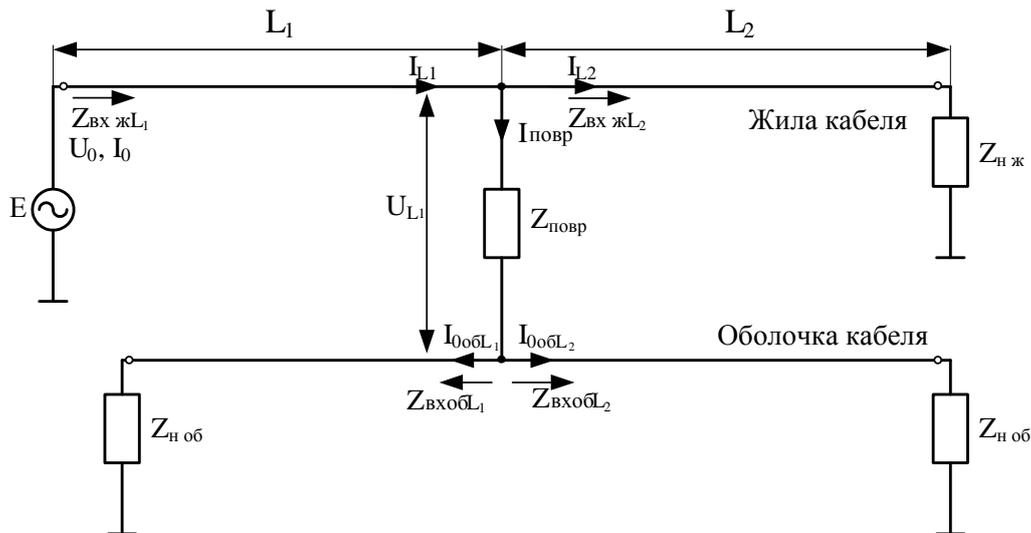


Рисунок 1 – Схема замещения цепи «жила – оболочка» с повреждением

Входные сопротивления участков жилы и оболочки определяются по формуле:

$$Z_{\text{вх}} = Z_{\text{в}} \frac{1 + P e^{-2\gamma L}}{1 - P e^{-2\gamma L}}, \quad (7)$$

где  $Z_{\text{в}}$  – волновое сопротивление линии;

$$P = \frac{Z_{\text{н}} - Z_{\text{в}}}{Z_{\text{н}} + Z_{\text{в}}} \text{ – коэффициент отражения;}$$

$Z_{\text{н}}$  – сопротивление нагрузки.

Сопротивление по отношению к земле, подключенное к жиле в месте повреждения,

$$Z_{\text{п}} = Z_{\text{повр}} + \frac{Z_{\text{вх об}L_1} \cdot Z_{\text{вх об}L_2}}{Z_{\text{вх об}L_1} + Z_{\text{вх об}L_2}}. \quad (8)$$

Сопротивление нагрузки, подключенной к участку  $L_1$ ,

$$Z_{\text{н ж}L_1} = \frac{Z_{\text{п}} \cdot Z_{\text{вх ж}L_2}}{Z_{\text{п}} + Z_{\text{вх ж}L_2}}. \quad (9)$$

Ток в начале линии (жилы)

$$I_0 = \frac{U_0}{Z_{\text{вх ж}L_1}}. \quad (10)$$

Ток через повреждение «жила – оболочка»

$$I_{\text{повр}} = \frac{U_{L_1}}{Z_{\text{п}}}. \quad (11)$$

Потенциал оболочки относительно земли в месте повреждения

$$U_{\text{об}} = I_{\text{повр}} \cdot Z_{\text{вх об}}. \quad (12)$$

Токи в оболочке в начале участков (слева и справа от повреждения)

$$I_0 = \frac{U_0}{Z_{\text{вх}}}; \quad (13)$$

Расчет распределения тока по жиле и оболочке кабеля проведен на частоте 10 кГц, сопротивление повреждения 250 Ом, удельное сопротивление земли 50 Ом·м, длина кабеля 5 км, повреждение расположено на середине участка линии. Для исключения отражений жила и оболочка нагружены на волновые сопротивления. Результаты расчета распределения тока приведены на рисунке 2. Результаты расчета напряженности магнитного поля в окрестности повреждения ( $\pm 10$  м) на поверхности земли над кабелем приведены на рисунке 3.

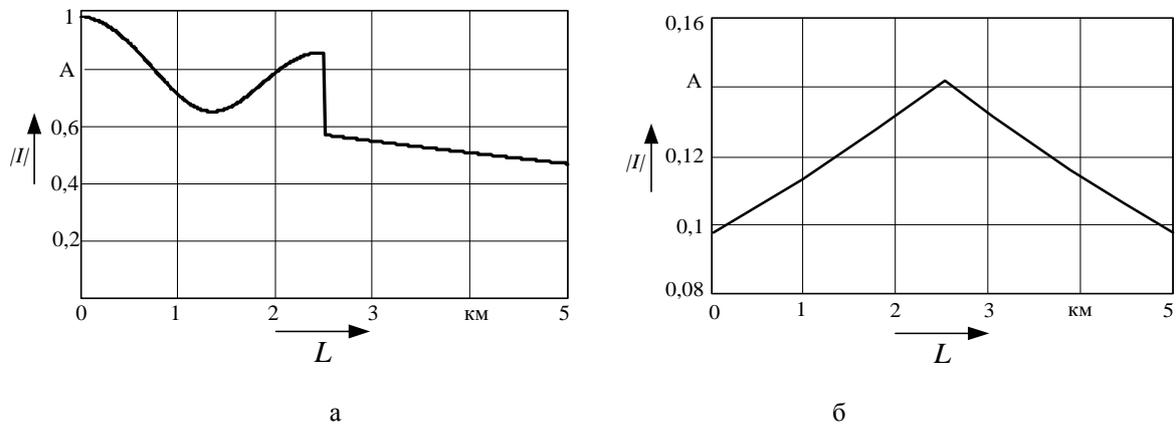


Рисунок 2 – Распределение тока по жиле (а) и оболочке (б) кабеля

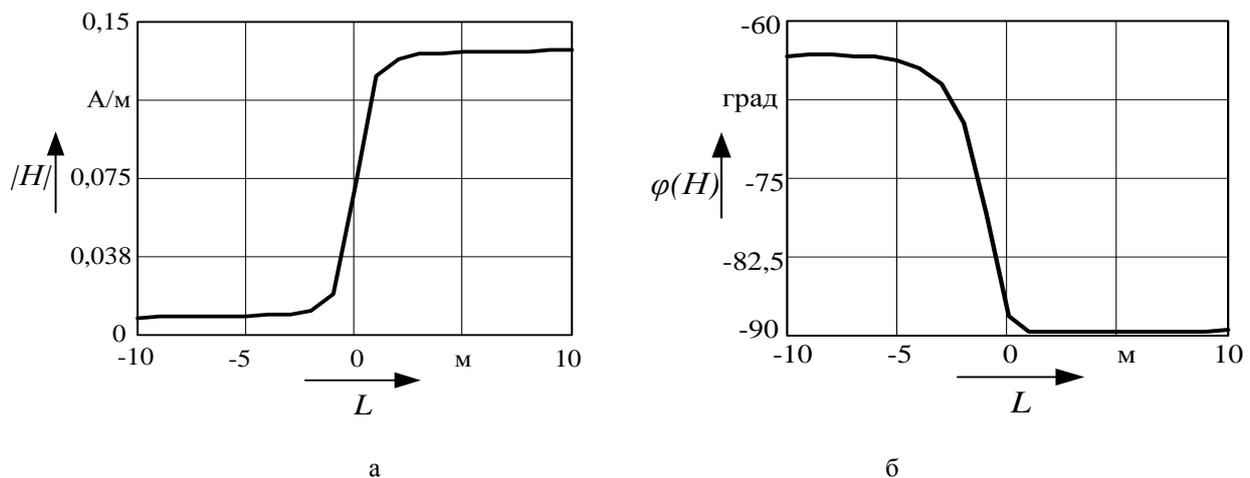


Рисунок 3 – Изменение модуля (а) напряженности магнитного поля и его фазы (б) в окрестности повреждения

Из результатов расчета следует, что на участке  $L_2$  значения тока в жиле кабеля изменяется плавно ввиду отсутствия отражения от конца линии, нагруженной на волновое сопротивление. На участке  $L_1$  наблюдается колебательный процесс из-за суперпозиции, падающей и отраженной от места повреждения волн. Ток в оболочке кабеля изменяется плавно в силу отсутствия отражений от концов линии, также нагруженной на волновое сопротивление. Для определения напряженности магнитного поля над кабелем с металлическими защитными покровами, имеющими повреждение типа «жила – оболочка», необходимо определить значение коэффициента экранирования оболочки. Модуль напряженности магнитного поля и его фаза получают приращение в месте повреждения между токоведущей жилой и оболочкой. Эти приращения имеют значительные величины и могут быть обнаружены с помощью магнитометра.

### Список литературы

1. Гроднев, И. И. Экранирование аппаратуры и кабелей связи [Текст] / И. И. Гроднев, К. Я. Сергейчук. – М.: Радио и связь, 1960. – 316 с.
2. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта:

Монография [Текст] / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. – М., 2013. – 552 с.

## References

1. Grodnev I. I., Sergeichuk K. Ia. *Ekranirovanie apparatury i kabelei sviazi* (Screening equipment and communication cables). Moscow: Radio i sviaz', 1960. 316 p.

2. Kotel'nikov A. V., Kandaev V. A. *Bluzhdaiushchie toki i ekspluatatsionnyi kontrol' korrozionnogo sostoianiia podzemnykh sooruzhenii sistem elektrosnabzheniia zheleznodorozhnogo transporta: Monografiia* (Stray currents and operational control of corrosion of underground structures of power supply systems of rail transport: Monograph). Moscow, 2013. 552 p.

УДК 621.316.993

И. А. Кремлев, Ю. В. Кондратьев, И. А. Терехин

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТОВ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ

*В статье рассмотрен вопрос о возможности использования железобетонных фундаментов опор контактной сети в качестве заземлителей. Выполнен анализ влияния конструкции фундамента на сопротивление растеканию. Представлены результаты расчета сопротивления растеканию анкерного болта фундамента металлической опоры по предложенной формуле.*

В последнее время руководство ОАО «РЖД» все чаще поднимает вопрос о постепенном внедрении на всей сети железных дорог опор контактной сети без непосредственного заземления на рельсовую цепь. Во многом такая позиция обусловлена положительным опытом эксплуатации «пилотных» участков с разземленными железобетонными опорами.

До недавнего времени, как правило, на всех реконструируемых и модернизируемых участках устанавливались железобетонные стойки в силу относительно низкой стоимости по сравнению с металлическими. Однако с 2006 по 2007 г. тенденция резкого увеличения стоимости железобетонных стоек опор контактной сети фактически сократила разницу, которая не послужила сдерживающим фактором применения металлических стоек на объектах новой электрификации и реконструкции контактной сети [1]. К тому же, проведенный технико-экономический анализ применения металлических стоек доказал их бесспорное преимущество по сравнению с железобетонными. В связи с этим департаментом электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» разработано техническое указание № К-04/07 от 01.06.2007 «О применении металлических опор при строительстве и реконструкции контактной сети», согласно которому в дальнейшем необходимо устанавливать только отдельные металлические опоры, а железобетонные применять только в крайних случаях.

В связи с этим возникает множество вопросов, требующих рассмотрения. В первую очередь к ним относится вопрос о способах разземления металлических опор от рельсов.

Для надежной работы существующих систем релейной защиты необходимо обеспечить достаточно низкое сопротивление цепи протекания токов короткого замыкания (КЗ), в которое входит, в том числе, сопротивление заземления опор контактной сети [2]. В связи с этим одним из важнейших вопросов при оценке возможности использования железобетонных фундаментов в качестве заземлителей является определение значения сопротивления растеканию тока железобетонного фундамента металлической опоры.

Условно конструкцию опоры можно разбить на две части:

- верхняя, включающая в себя стойку опоры;
- нижняя, состоящая из фундамента опоры.

Согласно рекомендациям работы [3] у металлических опор при включении в электрическую цепь можно принимать во внимание только фундаментальную часть опоры.

В настоящее время фундаменты для металлических опор изготавливаются в соответствии с проектом № 4182И «Железобетонные трехлучевые фундаменты и анкеры с заострением подземной части для опор контактной сети», на которые с помощью анкерных болтов, забетонированных в фундамент, закрепляются металлические опоры.

Конструкция фундаментов с анкерным креплением опор разделяется на верхнюю и нижнюю части. Верхняя прямоугольная часть армирована двумя горизонтальными и четырьмя вертикальными сетками. Нижняя часть армирована гнутыми сетками, объединенными в один пространственный каркас. Стальные арматурные стержни отделены от земли слоем бетона в 25 мм. В общем случае арматурная сетка не имеет электрического соединения (соприкосновения) с анкерными болтами.

На основании приведенной выше информации составлена электрическая схема замещения фундаментов металлических опор (рисунок 1).

Для определения значения электрического сопротивления фундамента принимается, что анкерный болт, не имеющий преднамеренного соединения с арматурными стержнями фундамента, можно представить в виде стержневого электрода, расположенного в структуре, имеющей горизонтальную неоднородность (рисунок 2).

Сопротивление растеканию такого электрода имеет вид:

$$R_{1\phi} = \frac{\rho_{\phi}}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} - \frac{\rho_{\phi}}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_{\phi}} + \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_{\phi}}, \quad (1)$$

где  $l$  и  $d$  – длина и диаметр электрода, м;

$\rho_{\phi}$  – удельное сопротивление бетона, Ом · м;

$D_{\phi}$  – защитный слой бетона, м.

Металлические опорные стойки крепятся к фундаменту четырьмя анкерными болтами, которые не имеют металлического соединения с арматурой каркаса фундамента. Для более детального анализа необходимо рассмотреть влияние конструкции фундамента, в частности, толщины бетона на сопротивление растеканию.

В соответствии с конструкцией трехлучевого фундамента со скосом типа ТСА расстояние между анкерными болтами  $A$  составляет 500 мм,  $B = 300$  мм (рисунок 3). Основные размеры защитного слоя бетона можно принять в соответствии с указаниями источника [4]. В соответствии с этими рекомендациями  $D_{\phi} = 170$  мм. Анкерные болты в фундаменте на рисунке 3 отличаются от электрода (см. рисунок 2) тем, что слой бетона, защищающий анкерный болт, в действительности в разных направлениях имеет различную толщину. На рисунке 3 показаны четыре сектора; в пределах каждого из них защитный слой принят одинаковым по толщине. Толщина защитного слоя в каждом секторе обозначена  $D_{\phi}, D_{\phi 62}, D_{\phi 63}, D_{\phi 64}$ .

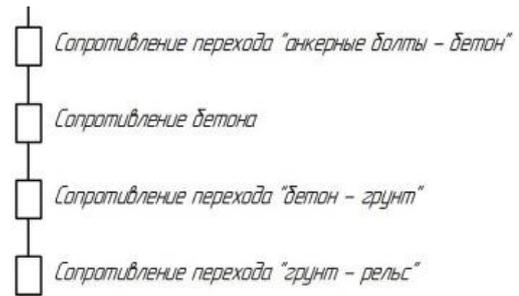


Рисунок 1 – Схема замещения фундамента металлической опоры

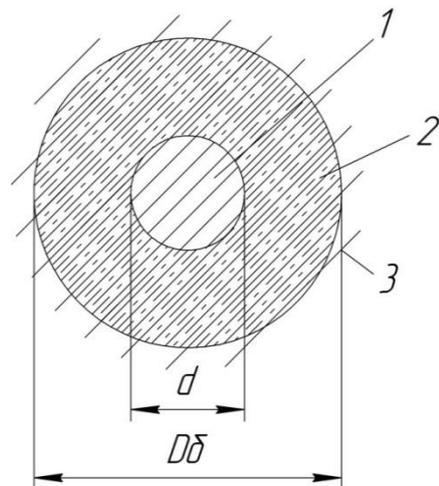


Рисунок 2 – Электрод в структуре с горизонтальной неоднородностью:  
1 – металлический электрод; 2 – бетон;  
3 – грунт

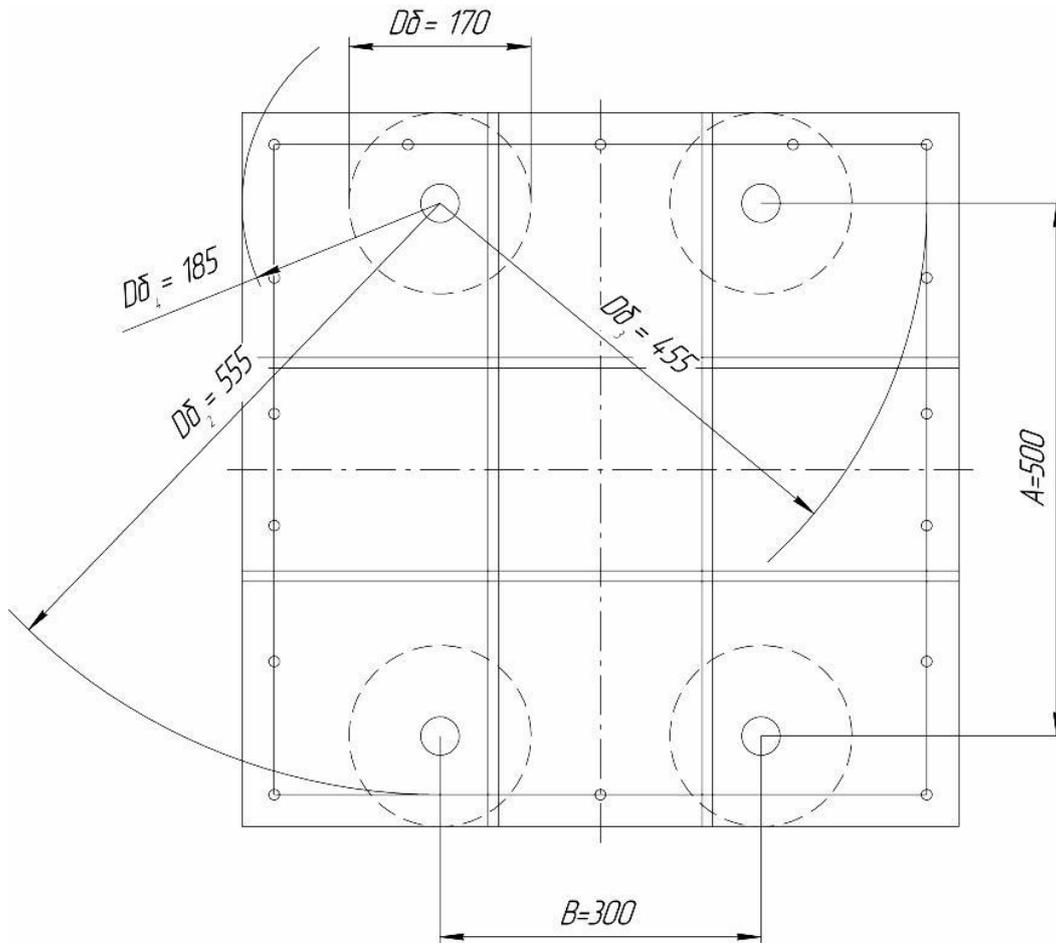


Рисунок 3 – Схема горизонтального разреза железобетонного фундамента типа ТСА

При стекании тока с анкерного болта каждый сектор будет иметь различное сопротивление растеканию, равное соответственно  $R_6, R_{62}, R_{63}, R_{64}$ . Общее сопротивление фундаментального болта, имеющего неравномерный защитный слой бетона, определяется по формуле:

$$R = \frac{R_6 \cdot R_{62} \cdot R_{63} \cdot R_{64}}{R_6 \cdot R_{62} \cdot R_{63} + R_6 \cdot R_{62} \cdot R_{64} + R_6 \cdot R_{63} \cdot R_{64} + R_{62} \cdot R_{63} \cdot R_{64}}, \quad (2)$$

где

$$R_6 = 4 \cdot \left( \frac{\rho_6}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} - \frac{\rho_6}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_6} + \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_6} \right); \quad (3)$$

$$R_{62} = 4 \cdot \left( \frac{\rho_6}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} - \frac{\rho_6}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_{62}} + \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_{62}} \right); \quad (4)$$

$$R_{63} = 4 \cdot \left( \frac{\rho_6}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} - \frac{\rho_6}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_{63}} + \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_{63}} \right); \quad (5)$$

$$R_{64} = 4 \cdot \left( \frac{\rho_6}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} - \frac{\rho_6}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_{64}} + \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_{64}} \right). \quad (6)$$

Расчет общего сопротивления фундаментного болта ( $R_{1ф}$ ) по формуле (2) более правильно отражает физический процесс стекания тока с болта, чем при расчете по выражению (1), однако этот расчет более трудоемок.

Для оценки влияния несимметричности слоя бетона на сопротивление растеканию анкерного болта сравним результаты, полученные по расчетным формулам (1) и (2) для различных значений удельного сопротивления земли ( $\rho$ ). Результаты сравнения сопротивлений, полученных по формулам (1) и (2), сведены в таблицу. В расчетах удельное сопротивление бетона  $\rho_6$  принималось равным 300 Ом·м, глубина заложения анкерного болта  $l = 0,7$  м при диаметре  $d = 0,036$  м.

Результат расчета сопротивления растеканию анкерного болта фундамента металлической опоры

Показатель	Удельное сопротивление земли $\rho$ , Ом						
	50	100	200	400	500	1000	2000
Сопротивление растеканию анкерного болта $R_{1ф}$ , вычисленное по формуле (1), Ом / сопротивление растеканию фундамента, Ом	138 / 35	170 / 43	233 / 58	361 / 90	425 / 106	743 / 186	1381 / 345
Сопротивление растеканию анкерного болта $R_{1ф}$ , рассчитанное по формуле (2), Ом / сопротивление растеканию фундамента, Ом	272 / 68	277 / 69	287 / 72	307 / 77	316 / 79	363 / 91	452 / 113
Расхождение в результатах $\pm \delta$ , %	-97,6	-63,4	-23,1	+15,0	+25,5	+51,1	+67,2

Анализ данных показывает, что сопротивление растеканию анкерного болта, рассчитываемое по формуле (1), значительно увеличивается при повышении удельного сопротивления земли, что связано с относительно небольшой толщиной защитного слоя бетона. Сопротивление растеканию анкерного болта, рассчитываемое по формуле (2), в меньшей степени зависит от сопротивления земли в связи с учетом четырех секторов, имеющих различную толщину. В трех из четырех секторов она больше, чем толщина защитного слоя анкерного болта, представленного в виде электрода (выражение (1)).

Для удельного сопротивления земли  $\rho < 200$  Ом·м расхождение результатов превышает 23,1 %, а при  $\rho > 500$  Ом·м превышает 25,5 %. Таким образом, пренебрежение несимметричностью слоя бетона приводит к возрастанию погрешности расчета в меньшую сторону, что на практике может привести к отказу защиты от замыканий на разземленные опоры. Поэтому в данном диапазоне удельных сопротивлений сопротивление растеканию анкерных болтов необходимо рассчитывать по формуле (2). В пределах  $200 < \rho < 500$  Ом·м расхождение результатов составляет на более 25 %, что находится в пределах погрешности при определении  $\rho$ . Поэтому в данных пределах  $\rho$  можно воспользоваться формулой (1).

Для различных значений удельного сопротивления  $\rho$  по формуле (2) проведены расчеты сопротивления растеканию железобетонного фундамента ТСА. Результаты расчета приведены на рисунке 4.

Анализируя формулы (2) – (6) и рисунок 4, можно отметить, что переходное сопротивление опоры определяется в основном двумя параметрами – удельными сопротивлениями грунта и бетона. Первое во многом определяется погодными и сезонными условиями, а второе – состоянием бетона.

Для окончательной оценки возможного использования железобетонных фундаментов опор контактной сети в качестве заземлителей необходимо подробнее рассмотреть вопросы, связанные с изменением свойств бетона и грунта при различных токах КЗ, а также возможность преднамеренного соединения анкерных болтов с арматурой каркаса фундамента для уменьшения сопротивления растеканию и увеличения чувствительности релейной защиты.

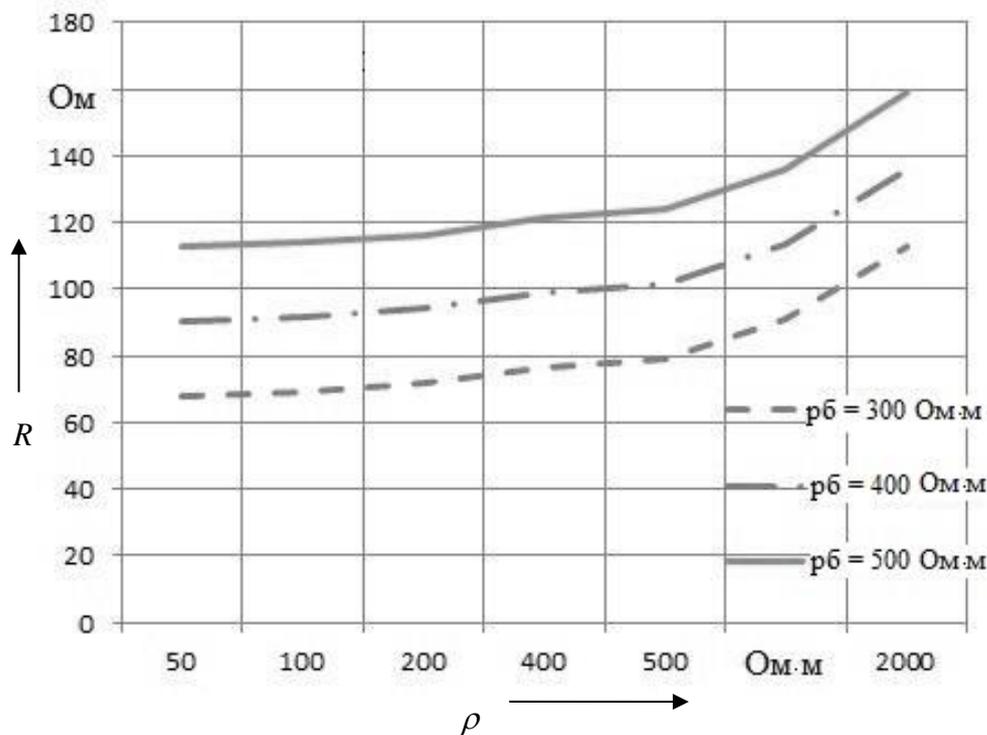


Рисунок 4 – Сопротивление растеканию тока железобетонного фундамента ТСА

### Список литературы

1. Кондратьев, Ю. В. Современное состояние и перспективы развития опорного хозяйства железных дорог в РФ [Текст] / Ю. В. Кондратьев, И. А. Кремлев, И. А. Терёхин // XXVI междунар. заочная науч.-практ. конф. «Технические науки – от теории к практике» / НИ «СибАК». – Новосибирск, 2014. – № 2. – С. 53 – 58.
2. Дынькин, Б. Е. Защита тяговых сетей переменного тока при разземлении опор контактной сети: Монография [Текст] / Б. Е. Дынькин // Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 1999. – 170 с.
3. Селедцов, Э. П. Эксплуатация опор контактной сети [Текст] / Э. П. Селедцов, Е. А. Баранов. – М.: Транспорт, 1977. – 104 с.
4. Рабочие чертежи № 4182И «Железобетонные трехлучевые фундаменты и анкеры с заострением подземной части для опор контактной сети» [Текст] / Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД». – М., 2005.

### References

1. Kondratyev Yu. V., Kremlev I. A., Terekhin I. A. Current state and prospects of development of the reference economy railways in Russia [Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia opornogo khoziaistva zheleznykh dorog v RF]. *Tekhnichskie nauki – ot teorii k praktike – Engineering – From Theory to Practice*, 2014, no. 2, pp. 53 – 58.
2. Dyn'kin B. E. *Zashchita tiagovykh setei peremennogo toka pri razzemlenii opor kontaktnoi seti* (Traction network protection with AC catenary poles not grounded). Khabarovsk, 1999, 170 p.
3. Seledtsov E. P., Baranov E. A. *Ekspluatatsiia opor kontaktnoi seti* (Operation support of a contact network). Moscow: Transport, 1977, 104 p.
4. Rabochie chertezhi № 4182I «Zhelezobetonnye trekhluchevye fundamenty i ankery s zaostreniem podzemnoi chasti dlia opor kontaktnoi seti». Utverzhdeny Departamentom elektrifikatsii i elektrosnabzheniia ОАО «RZhD» prikazom ot 05.10.2005, № 61 (Working drawings number 4182I «Reinforced concrete foundations and anchors three-prong with a sharpened underground part for support of a contact network» Approved by the Department of electrification and power supply JSC "Russian Railways", the order dated 05.10.2005, № 61). Moscow, 2005.

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЫПАДЕНИЙ ДИСКРЕТИЗИРУЕМОГО СИГНАЛА,  
ИМЕЮЩИХ МЕСТО ВО ВРЕМЯ КАЛИБРОВКИ АЦП  
УНИВЕРСАЛЬНОГО СЧЕТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
НА ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

*Рассмотрен алгоритм полиномиальной интерполяции для аналого-цифрового преобразователя с длительностью калибровки 1 мс. Приведен пример восстановления пропущенных значений для обеспечения заданной точности обработки входного сигнала.*

Важнейшей задачей энергетической политики ОАО «РЖД» является эффективный учет использования электрической энергии на тягу поездов. Для этого требуется внедрение счетчиков электрической энергии, обеспечивающих наименьшую погрешность учета. В универсальной измерительной системе учета электрической энергии на подвижном составе постоянного и переменного тока осуществляется преобразование тока, напряжения и мощности в цифровую форму. Однако при работе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в широком диапазоне температур, определяемом спецификой эксплуатации железнодорожного транспорта, его параметры имеют свойство «уходить» с течением времени, что является главной сложностью при разработке систем учета. Для решения данной проблемы АЦП время от времени могут выполнять самотестирование и калибровку. Однако на время этой процедуры аналого-цифровое преобразование сигнала прерывается, что приводит к «выпадениям» в сигнале дискретном, т. е. имеется дилемма – с одной стороны, самотестирование и калибровка увеличивают точность измерения аналогового сигнала, с другой стороны, эта процедура приводит к потере значений аналогового сигнала на некоторых временных отрезках. Решением данной проблемы является восстановление потерянных значений путем их интерполяции по ближайшим известным [1 – 3].

Целью статьи является определение погрешности измерительной системы, вызываемой применением метода интерполяции пропущенных в результате калибровки значений сигнала, с использованием интерполяционного полинома третьей степени.

Задача восстановления аналогового сигнала по его дискретным отсчетам с точки зрения математики это не что иное, как хорошо известная задача интерполяции непрерывной функции  $F(x)$  по конечному числу  $N$  ее точек. Пусть в точках  $t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_N$  таких, что  $a \leq t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_N \leq b$ , известны значения функции  $y = f(t)$ , т. е. на отрезке  $[a, b]$  задана табличная функция. Эти точки, в которых значение функции задано, называются узлами интерполяции. В самих узлах значения аппроксимирующих функций должны совпадать с заданными значениями исходной функции.

При интерполяции тригонометрических функций, которые описывают поведение тока и напряжение в тяговой сети, наиболее подходящим представлением будет аппроксимация гладкой функцией [4]. Такое решение дает, например, метод полиномиальной интерполяции. Идея метода состоит в том, что исходная функция аппроксимируется многочленом третьей степени, т. е. функцией вида [5]:

$$y(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3. \quad (1)$$

При этом значение интерполирующей функции совпадает со значениями рассматриваемой функции в узлах интерполяции. На основании данного условия составляется система линейных уравнений вида:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 t_1 + a_2 t_1^2 + a_3 t_1^3 = y(t_1); \\ a_0 + a_1 t_2 + a_2 t_2^2 + a_3 t_2^3 = y(t_2); \\ a_0 + a_1 t_3 + a_2 t_3^2 + a_3 t_3^3 = y(t_3); \\ a_0 + a_1 t_4 + a_2 t_4^2 + a_3 t_4^3 = y(t_4). \end{cases} \quad (2)$$

При реализации интерполяционной процедуры коэффициенты полинома  $a_k$  находятся решением системы уравнений (2) каким-либо численным методом (например, методом Гаусса).

Теперь рассмотрим аналого-цифровой преобразователь, у которого время, необходимое для калибровки, составляет 1мс. В условиях непрерывной работы аналого-цифрового преобразователя возникает систематическая ошибка, вызываемая внешними воздействиями (например, внешней температурой), величина которой может достичь критических значений и внести значительную погрешность в измерения. В заданных условиях при частоте дискретизации 8 кГц мы имеем потерю восьми отсчетов за время калибровки. В зависимости от того, как часто производить калибровку значений, будет изменяться значение общей погрешности представления сигнала. На рисунке 1 показана основная идея предлагаемого метода: в течение времени  $T_k$  значения сигнала на входе АЦП не фиксируются. В это время происходит калибровка, т. е. автоматическая компенсация ошибок смещения нуля и коэффициента усиления. Интервал между калибровками  $T_c$  может изменяться разработчиком.

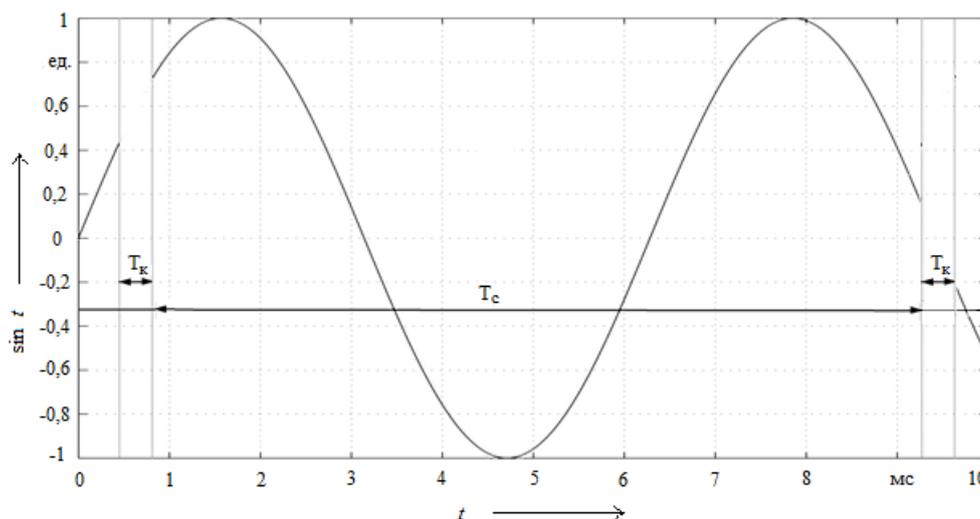


Рисунок 1 – График  $f = \sin t$ ;  $T_k$  – время калибровки АЦП

Изменяя соотношение  $T_c$  и  $T_k$ , мы изменяем скважность процесса калибровки. Очевидно, что если калибровку АЦП делать чаще, уход параметров АЦП, вызванный внешними воздействиями, будет меньше, но, с другой стороны, будут чаще возникать периоды сигнала ( $T_k$ ), на которых измерения не производятся вообще, что также приводит к снижению точности измерительной системы.

Рассмотрим, существенно ли применение интерполяции пропущенных при калибровке АЦП значений снижает величину погрешности представления сигнала.

На вход АЦП подаем сигнал (как показано на рисунке 2):

$$f(t) = \sum_{i=1}^{40} A_i \cdot \sin(2\pi \cdot F \cdot i \cdot t + \varphi_i), \quad (3)$$

где  $A_i$  – амплитуда  $i$ -й гармоники;

$F$  – частота основной гармоники;

$\varphi_i$  – амплитуда  $i$ -й гармоники.

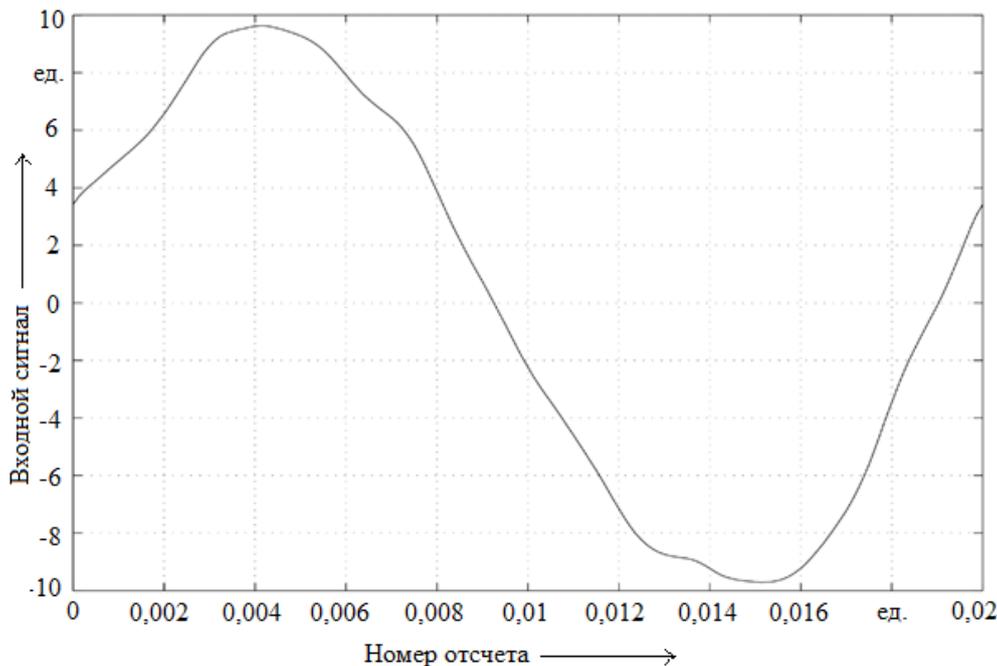


Рисунок 2 – График входного сигнала

Таким образом, входной сигнал представляет собой сумму из 40 синусоид различной амплитуды (в соответствии с требованиями ГОСТ 13109), с различными фазами, частотой основной гармоники 50 Гц, суммарное значение амплитуд неосновных гармоник не превышает 20 % от частоты основной:

$$A_1 \geq 0,2 \sqrt{\sum_{i=2}^{40} A_i^2}. \quad (4)$$

Моделируя калибровку АЦП, исключим значения сигнала  $y(t_3), y(t_4), y(t_5) \dots y(t_9)$ . В соответствии с описанным методом интерполяции полиномом третьей степени для нахождения пропущенных значений воспользуемся известными значениями сигнала  $y(t_1), y(t_2), y(t_{10}), y(t_{11})$ , а также примем во внимание, что значения  $t$  известны. В нашем случае интервал между отсчетами составляет 0,000125. Подставив в матрицу значения  $t_i$ , найдем решение в общем виде для неизвестных коэффициентов матрицы  $A$ :

$$[A] = \begin{pmatrix} y(t_1); \\ -87200/9 y(t_1) + 1000 y(t_2) - 10000/9 y(t_{10}) + 800 y(t_{11}); \\ 128000000/9 y(t_1) - 152000000/9 y(t_2) + 88000000/9 y(t_{10}) - 64000000/9 y(t_{11}); \\ -51200000000/9 y(t_1) + 64000000000/9 y(t_2) - 64000000000/9 y(t_{10}) + \\ + 51200000000/9 y(t_{11}). \end{pmatrix} \quad (5)$$

Тогда для нахождения значения сигнала в произвольной точке требуется вычислить функцию вида:

$$y(t_n) = y(t_1) + (-87200/9 y(t_1) + 1000 y(t_2) - 10000/9 y(t_{10}) + 800 y(t_{11})) \cdot t_n + \\ + (128000000/9 y(t_1) - 152000000/9 y(t_2) + 88000000/9 y(t_{10}) - 64000000/9 y(t_{11})) \cdot t_n^2 + \\ + (-51200000000/9 y(t_1) + 64000000000/9 y(t_2) - 64000000000/9 y(t_{10}) + \\ + 51200000000/9 y(t_{11})) \cdot t_n^3. \quad (6)$$

В результате мы имеем возможность вычислить значения сигнала в момент выпадения измеряемой величины. График входного сигнала без пропущенных значений и график интерполированного сигнала приведены на рисунке 3.

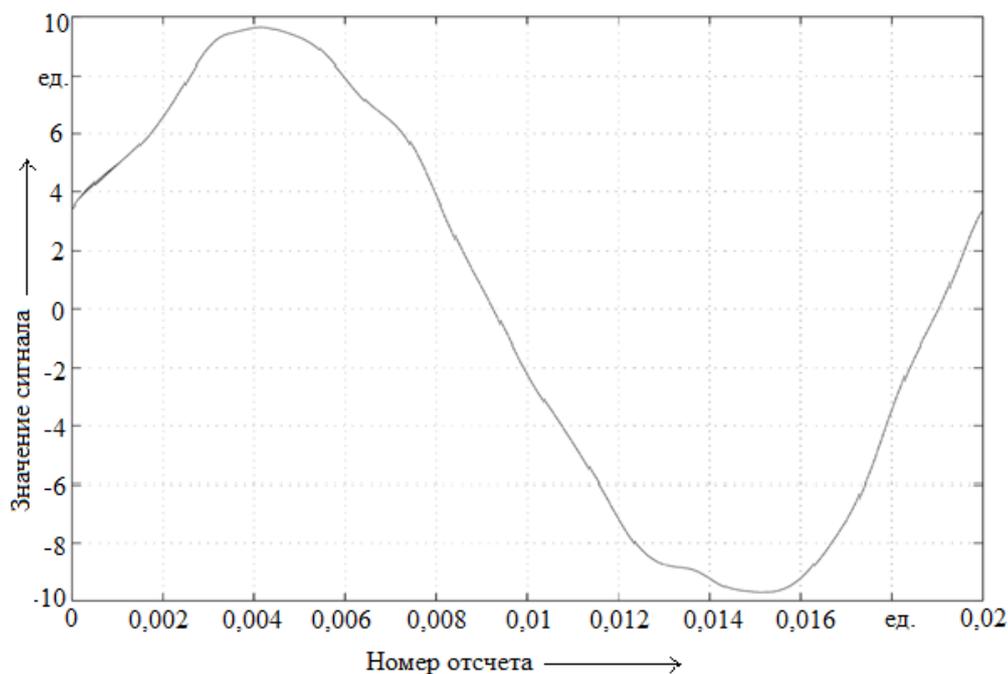


Рисунок 3 – Графики входного и интерполированного сигнала на периоде

Как видно из рисунка 3, отклонение интерполированного сигнала от входного незначительно (графики сливаются), для лучшей наглядности на рисунке 4 показан увеличенный интерполированный участок сигнала.

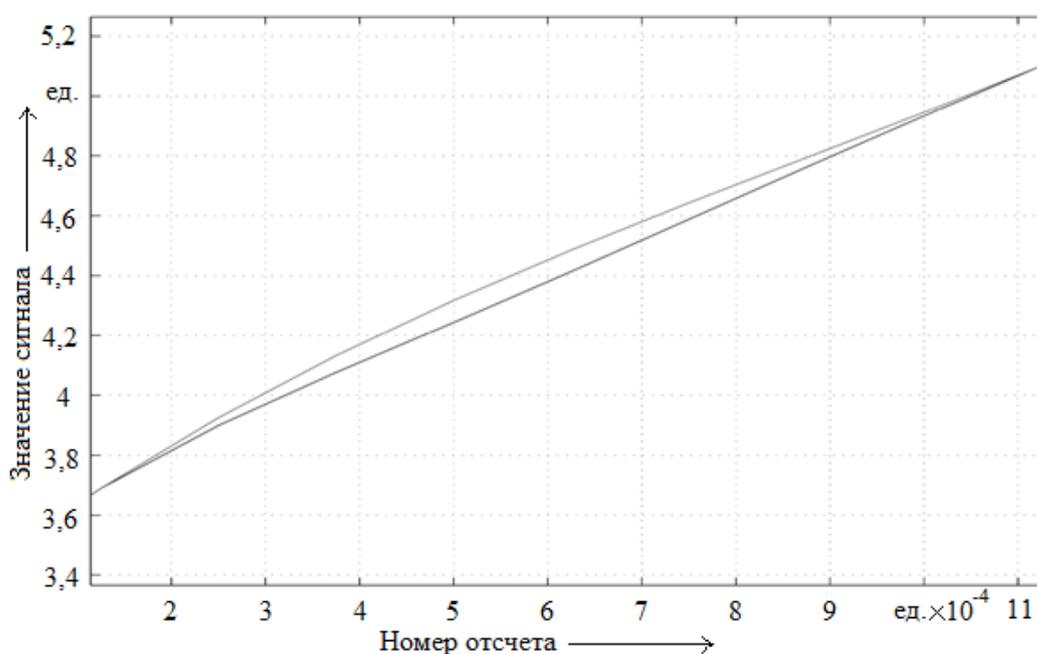


Рисунок 4 – Графики входного и интерполированного сигнала в течение калибровки

Значения  $y(t_n)$  могут быть вычислены в любой точке отрезка  $[a, b]$ , на котором определен сигнал, поэтому можно исследовать качество получающегося приближения, например, найти среднеквадратическое отклонение  $y(t_n)$  от значений функции  $f(t)$ . На качество приближения существенное влияние оказывают количество и расположение узлов и гладкость функции  $f(t)$ .

Так как входной сигнал не нормирован, для определения ошибки интерполяции следует произвести нормирование значений. Для этого найдем квадрат нормы исходного сигнала:

$$\begin{aligned} \|f\|^2 &= \int_0^T \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{40} A_i^2 \cdot \sin^2(2\pi f_i t + \phi_i) dx = \sum_{i=1}^{40} \int_0^T \frac{1}{T} A_i^2 \cdot \sin^2(2\pi f_i t + \phi_i) dx = \\ &= \sum_{i=1}^{40} \int_0^T \frac{1}{T} A_i^2 \frac{1 - \cos 2(2\pi f_i t + \phi_i)}{2} dx = \sum_{i=1}^{40} \left( \int_0^T \frac{1}{2T} A_i^2 dx + \int_0^T \frac{1}{T} A_i^2 \frac{\cos 2(2\pi f_i t + \phi_i)}{2} dx \right) = (7) \\ &= \sum_{i=1}^{40} \frac{1}{2T} A_i^2 (T - 0) = \sum_{i=1}^{40} \frac{A_i^2}{2}. \end{aligned}$$

Для того чтобы проследить изменение среднеквадратичной ошибки интерполяции, в среде MatLab произведем формирование случайного сигнала с учетом заданных параметров 1000 раз [6]. Среднеквадратичную погрешность при каждом повторении рассчитаем по формуле:

$$RMSE_k = \sqrt{\frac{1}{7} \frac{\sum_{n=3}^9 (y(t_n) - f(n))^2}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{40} A_i^2}}, \quad (8)$$

где  $k = \{1, 1000\}$ .

Зависимость среднеквадратичной ошибки от номера повторения приведена на рисунке 5.

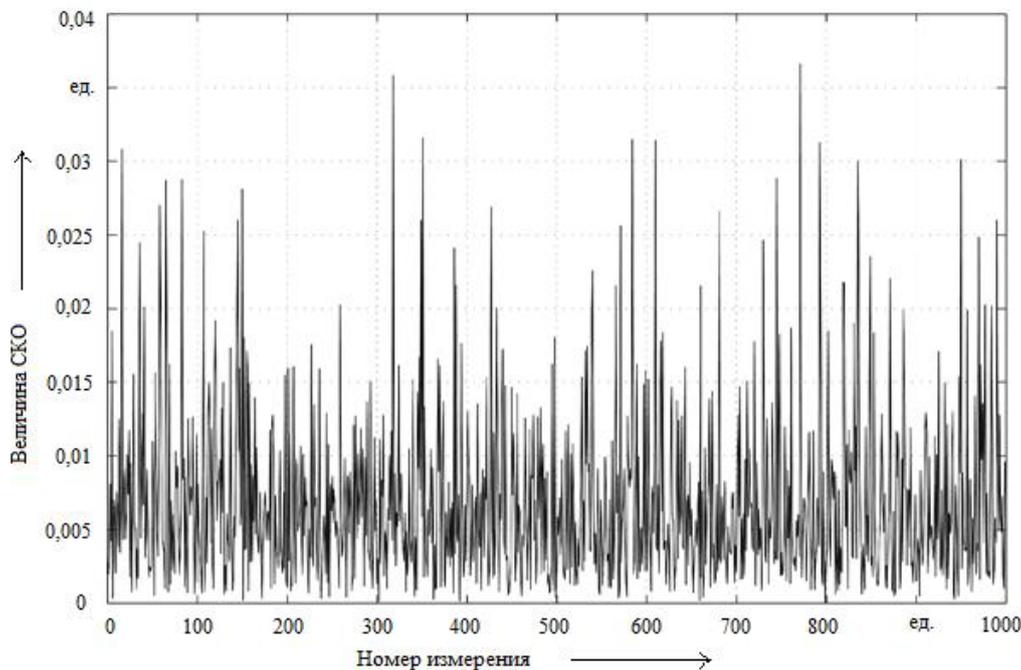


Рисунок 5 – Распределение среднеквадратичной ошибки интерполяции

Среднеквадратичное значение погрешности интерполяции при проведении 1000 повторений в случае, приведенном на рисунке 5, составляет 0,009. Таким образом, вносимая погрешность из-за неточности восстановления пропущенных значений составляет в среднем 0,9 % (максимально – 3,7 %). С учетом того, что скважность калибровки в нашем случае составляет 1:1000, вносимая интерполяцией пропущенных измерительной системой значений

погрешность будет составлять величину в тысячу раз меньшую, а именно 0,0009 %. Такой точности достаточно, чтобы система измерения соответствовала самым высоким требованиям к результатам аналого-цифрового преобразования данных, полученных при проведении измерений электрических параметров на железнодорожном оборудовании.

## Список литературы

1. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
2. Грицутенко, С. С. Адекватность использования аналогий в цифровой обработке сигналов [Текст] / С. С. Грицутенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 2(2). – С. 80 – 86.
3. Грицутенко, С. С. Введение понятия «дельта-вектор» в пространстве Гильберта для корректного представления данных в информационных системах [Текст] / С. С. Грицутенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 1 (1). – С. 73 – 78.
4. Грицутенко, С. С. Метод расширения динамического диапазона при аналого-цифровом преобразовании [Текст] / С. С. Грицутенко, Э. А. Бибердорф, К. А. Фирсанов // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2010. – № 2(90). – С. 200 – 202.
5. Макс, Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях [Текст] / Ж. Макс. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
6. Гончаров, В. Л. Теория интерполирования и приближения функций [Текст] / В. Л. Гончаров. – М.: Гостехтеориздат, 1954. – 328 с.

## References

1. Novitskii P. V. *Otsenka pogreshnostei rezul'tatov izmerenii* (Errors of estimation of results of measuring). Leningrad: Energoatomizdat, 1991, 304 p.
2. Gritsutenko S. S. Adequacy of using analogs in digital signal processing [Adekvatnost' ispol'zovaniia analogii v tsifrovoi obrabotke signalov]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2010, no. 2 (2), pp. 80 – 86.
3. Gritsutenko S. S. Description of term «delta-vector» in Hilbert space for the correct presentation data in informational systems [Vvedenie poniatii «del'ta-vektor» v prostranstve Gil'berta dlia korrektnogo predstavleniia dannykh v informatsionnykh sistemakh]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2010, no. 1 (1), pp. 73 – 78.
4. Gritsutenko S. S., Biberdorf E. A., Firsanov K. A. Method of expansion dynamical range for ADC [Metod rasshireniia dinamicheskogo diapazona pri analogo-tsifrovom preobrazovanii]. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk scientific Herald*, 2010, no. 2 (90), pp. 200 – 202.
5. Maks G. *Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniiakh* (Methods and technics of signal processing for physical measurements). Moscow: Mir, 1983, 450 p.
6. Gontcharov V. L. *Teoriia interpolirovaniia i priblizheniia funktsii* (Theory of interpolation functions). Moscow: Gostehtheorizdat, 1954, 328 p.

УДК 625.12.033.38

Ш. Ш. Абдукамилов

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА БАРХАННЫХ ПЕСКОВ, УЛОЖЕННЫХ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО

Приведены результаты натурных исследований колебательного процесса земляного полотна, отсыпанного барханными песками. Проведен анализ записей колебаний частиц барханных песков на уровне основной площадки, в теле земляного полотна и за его пределами. Даны результаты исследования изменения значения амплитуд колебаний барханных песков в зависимости от скорости поездов. Выявлена аналитическая зависимость определения затухания колебаний в теле земляного полотна из барханных песков и за его пределами.

Поезда, движущиеся по железнодорожному пути, являются источниками возникновения вибродинамических нагрузок, вызывающих колебания земляного полотна. В колеблющихся частицах грунта развиваются инерционные силы, величины которых прямо пропорциональны интенсивности вибродинамического воздействия. Интенсивность вибродинамического воздействия на земляное полотно принято оценивать величиной ускорения частиц грунта, возникающей от движущегося подвижного состава. При определенных значениях ускорения структурные связи в грунтах земляного полотна разрушаются, вследствие чего возникают большие остаточные деформации. В связи с этим возникает необходимость в оценке характера и интенсивности колебаний грунта земляного полотна, возможных пределов их изменений в зависимости от скорости движения и веса поездов, расстояния до исследуемой точки.

Следует отметить, что последствия вибрационных и силовых воздействий поездов зависят не только от их величины, но и от свойств и состояния грунтов земляного полотна. Приведенные факторы оказывают существенное влияние на распространение волн в грунте.

Анализ выполненных работ по изучению распространения волн в грунтах железнодорожного земляного полотна, вызываемых проходящими поездами, [1 – 7] показал, что исследования в этой области не являются достаточными ввиду многообразия грунтов и инженерно-геологических условий. Поэтому нами были произведены наблюдения и исследования колебательного процесса земляного полотна, отсыпанного барханными песками. Натурные испытания производились в летнее время года на 3904 км на участке Бузаубай – Мискен железных дорог Узбекистана, где земляное полотно сооружено в 2002 г. полностью из барханных песков.

Верхнее строение пути представляет собой звеньевой путь с рельсами Р65 на железобетонных шпалах эпюрой 1840 шт./км, скрепления типа КБ. Толщина балластной призмы выбранного участка составляет 30 – 40 см.

Земляное полотно представлено насыпью высотой 1 м и шириной основной площадки 7 м. Участок проведения экспериментов расположен на горизонтальной площадке.

Интенсивность движения поездов в период наблюдений составляла для грузовых 10 поездов в сутки, для пассажирских пять поездов. Установленная максимальная скорость движения по перегону для грузовых поездов составляла 80 км/ч, а для пассажирских – 100 км/ч. Для тяги грузовых и пассажирских поездов использовался тепловоз 2ТЭ10, так как линия пока не электрифицирована.

Для проведения полевых исследований были применены сейсмоприемники СМ-3. Сейсмоприемники СМ-3 предназначены для преобразования в электрический сигнал механических колебаний как сыпучих и вязких сред, так и поверхностей сооружений, машин, конструкций и др. частотой от 5 до 200 Гц, амплитудой от 0,01 до 2 мм при допустимом ускорении до  $10 \text{ м/с}^2$  (рисунок 1).

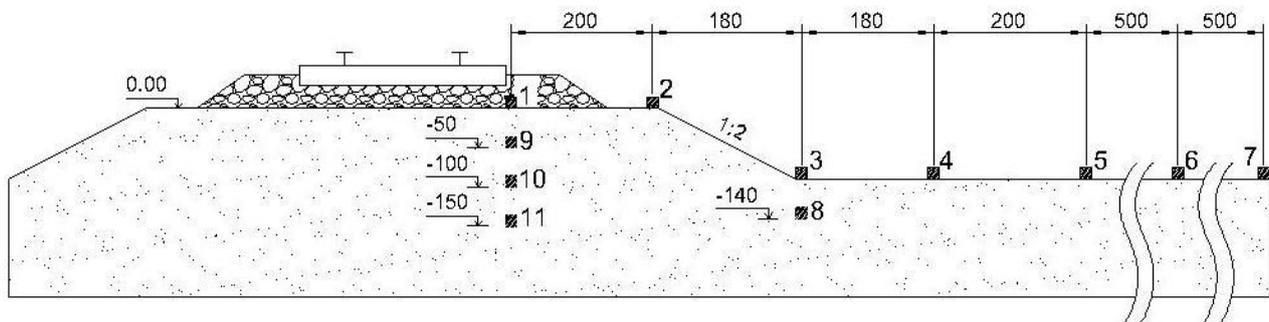


Рисунок 1 – Схема расположения датчиков в теле земляного полотна и за его пределами

Колебания барханных песков земляного полотна регистрировались при проходе поезда через рабочий поперечник. Запись начиналась при подходе локомотива к рабочему поперечнику и заканчивалась после прохода последнего вагона.

Колебательный процесс грунтов земляного полотна имеет ярко выраженный стохастический характер, поэтому для получения достоверных результатов необходима статистическая обработка экспериментальных данных, которая производилась методом сумм. В статистический ряд включались по три наибольших измерений, отобранные от каждой реализации записи колебательного процесса.

Обработке подвергались результаты по каждой составляющей амплитуд колебаний. В результате получались средние и максимальные вероятные значения амплитуд колебаний при определенной скорости движения поездов.

Максимальные вероятные значения амплитуды определялись выражением:

$$A_{\max}^{\text{вер}} = A_{\text{ср}} + 2,5S, \quad (1)$$

где  $S$  – среднеквадратическое отклонение.

Значение результирующей амплитуды колебаний определялось по закону векторной суммы:

$$A = \sqrt{A_z^2 + A_y^2 + A_x^2}, \quad (2)$$

где  $A_z$  – амплитуда колебаний в вертикальной плоскости;  $A_y$  – амплитуда колебаний в горизонтальной плоскости в направлении, перпендикулярном оси пути;  $A_x$  – амплитуда колебаний в горизонтальной плоскости вдоль оси пути.

При выявлении особенностей колебательного процесса барханных песков земляного полотна особое место отводится изучению характера процесса колебаний. Это способствует выяснению причин возникновения колебаний, что важно не только с позиции познания самого явления, но и с точки зрения оценки влияния колебаний на свойства и состояние грунтов. Более того, знание характера колебательного процесса позволяет в дальнейшем смоделировать его в лабораторных условиях для определения степени снижения прочностных характеристик барханных песков под воздействием вибродинамической нагрузки.

Типичный пример записи колебаний барханных песков на уровне основной площадки земляного полотна, записанного при проходе пассажирского и грузового поезда, представлен на рисунке 2. Для исследования характеристик колебательного процесса барханных песков на рисунке 3 представлен пример записи колебаний основной площадки земляного полотна, записанного при проходе пассажирского поезда со скоростью 70 км/ч.

На рисунке 3 отображены три составляющие колебательного процесса: вверху запись горизонтальных колебаний вдоль оси пути, в центре – вертикальные колебания грунта, внизу – горизонтальные колебания в направлении, перпендикулярном оси пути. Как видно из рисунка 3, максимальная амплитуда колебаний регистрируется на вертикальной составляющей колебательного процесса с четкой регистрацией момента прохода осей подвижного состава.

Анализ колебательного процесса барханных песков земляного полотна при движении пассажирских поездов позволяет характеризовать каждую составляющую колебаний.

Горизонтальная составляющая вдоль оси пути (см. рисунок 3, кривая 1) выражается двумя гармониками: основной и наложенной. Амплитуда наложенной гармоники всегда на порядок меньше несущей гармоники, а частота колебаний на порядок выше. Из записей колебаний видно, что наибольшие наложенные колебания барханных песков основной площадки земляного полотна по времени регистрируются в момент прохождения колесных пар тележек локомотива и вагонов, в то время как при их отсутствии над датчиками наложенные колебания фиксируются с низкой по значению амплитудой.

Следует подчеркнуть, что такое положение имеет место только до глубины порядка 50 см от поверхности основной площадки, при большем заглублении наложенная гармоника фиксируется по всей длине основной гармоники. Характер колебаний практически не зависит ни от нагрузки на ось, ни от скорости движения поездов по участку наблюдений. Величина амплитуды колебаний и частоты с изменением скорости и веса поездов изменяется в относительно малом диапазоне.

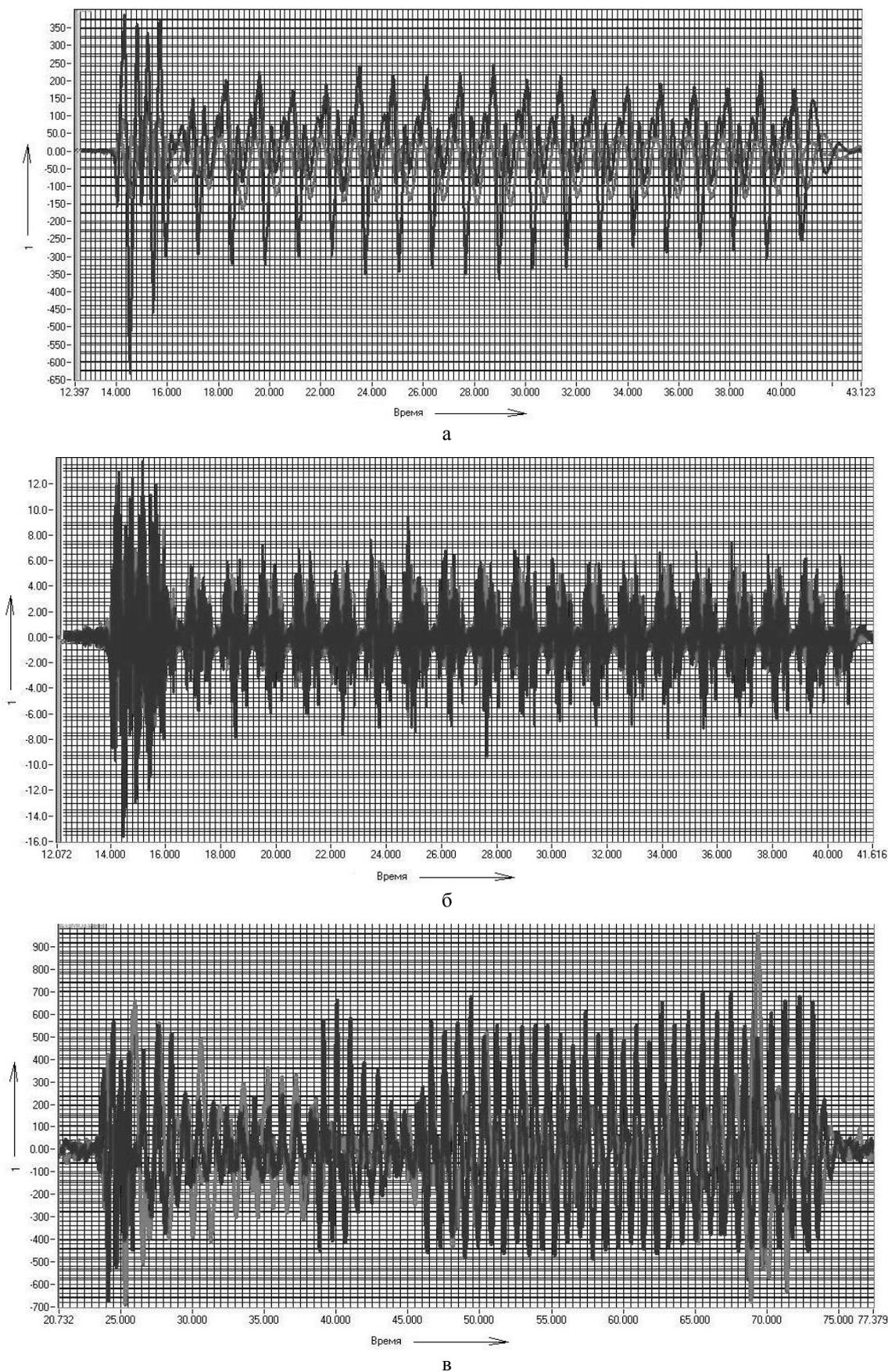


Рисунок 2 – Записи колебаний барханных песков основной площадки земляного полотна: вибросмещение и виброускорение барханных песков при проходе пассажирского поезда со скоростью 70 км/ч (а), (б), вибросмещение барханных песков при проходе грузового поезда со скоростью 50 км/ч (в)

Вертикальная составляющая колебаний (см. рисунок 3, кривая 2) барханных песков основной площадки земляного полотна имеет очень сложный характер с резкими всплесками записи и большими различиями при проходе локомотива и вагонов. Амплитуда и частота колебаний в вертикальном направлении зависят от большого числа факторов и меняются в широком диапазоне. Записи колебаний барханных песков основной площадки земляного полотна показывают, что эта составляющая разлагается на две условные гармоники – несущую и наложенную.

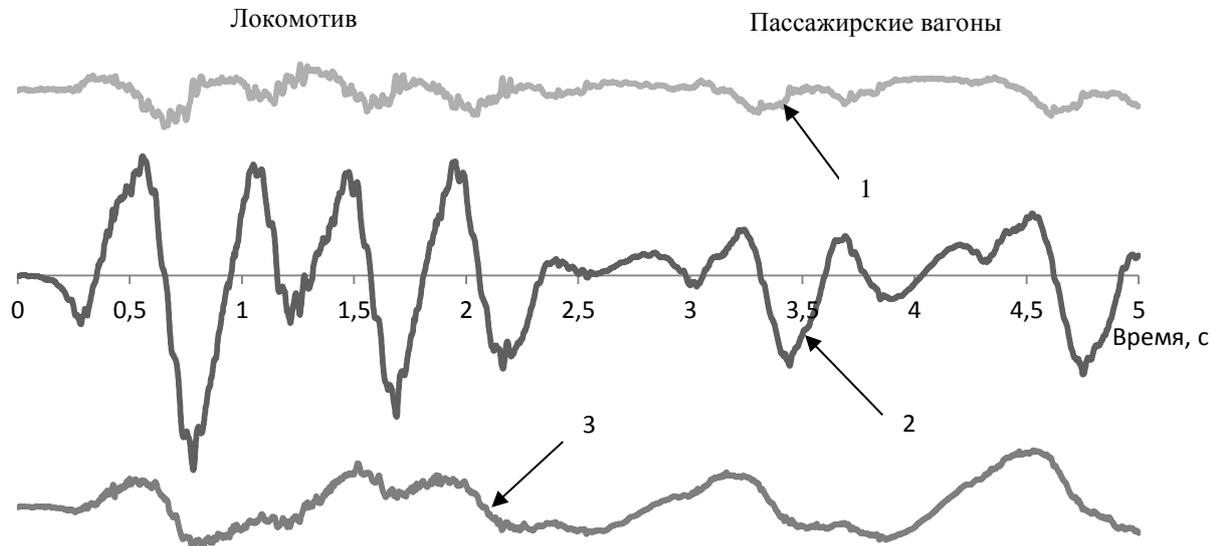


Рисунок 3 – Запись колебаний барханных песков основной площадки земляного полотна при проходе пассажирского поезда со скоростью 70 км/ч: 1 – горизонтальная составляющая вдоль пути; 2 – вертикальная составляющая; 3 – горизонтальная составляющая поперек пути

Несущая гармоника обусловлена проходом осей подвижного состава по участку измерений. Следовательно, возникающие среднечастотные колебания (смещения) барханных песков основной площадки земляного полотна являются функцией прямого силового воздействия подвижного состава на несущие конструкции пути. Амплитуда колебаний этой гармоники определяется существенными величинами и прямо зависит от скорости движения поездов, нагрузки на ось, места расположения рассматриваемой точки, типа и состояния пути и ходовых частей подвижного состава. На всех записях колебаний можно зарегистрировать резкие пики и впадины, почти нет сглаженных участков.

Наши эксперименты проводились с углублением точки измерения до 150 см от поверхности основной площадки земляного полотна. Записи колебаний барханных песков, записанные по всей глубине от уровня основной площадки в пределах ширины рельсошпальной решетки, позволяют выявлять момент прохода осей над датчиками по всплескам записей смещений. Характерно, что записи колебаний глинистых грунтов, записанные на глубине 140 – 150 см от поверхности основной площадки земляного полотна в пределах ширины рельсошпальной решетки, не регистрируют резких всплесков амплитуды смещения и не позволяют выявить момент прохода осей подвижного состава над датчиками. Записи оказываются в значительной степени сглаженными, размытыми [5]. Это свидетельствует о том, что земляное полотно, отсыпанное барханными песками, характеризуется демпфирующими свойствами. Однако при регистрации колебаний на расстоянии 3,5 м от оси пути в перпендикулярном направлении на записях колебаний больше не фиксировались четкие всплески амплитуды смещения, по которым можно было бы выявить момент прохода осей подвижного состава над датчиками. Это свидетельствует о том, что в балластном слое и в верхней части земляного полотна смещение возникает под воздействием силового фактора, в частности, пульсации напряжения по подошвам шпал, а затем распространяются в теле земляного по-

лотна и балластном слое в виде отдельных волн. Следовательно, влияние на грунты колебаний от большого контактного воздействия силового фактора будет существенно отличаться от воздействия в виде обычных колебаний, проявляющихся при обычных волновых процессах.

Вторая гармоника – высокочастотная, проявляется в виде наложенных колебаний на несущую гармонику. Следует отметить, что при регистрации большой амплитуды несущих гармоник высокочастотная составляющая не всегда визуально обнаруживается и замеряется по записям колебаний, так как на многих участках записи она частично или полностью замаскирована. Высокочастотная составляющая вертикальных колебаний возникает от колебания неупругих масс ходовых частей подвижного состава и характеризуется амплитудой в основном 3 – 7 мкм, хотя в отдельных случаях встречаются колебания в 20 – 25 мкм с частотой 40 – 70 Гц [5], что подтверждается результатами наших экспериментов. Для этой составляющей свойственно интенсивное затухание по глубине полотна и с удалением от оси пути.

Горизонтальная составляющая колебаний в направлении, перпендикулярном оси пути (см. рисунок 3, кривая 3) характеризуется двумя гармониками: несущей и наложенной, причем по величине они отличаются больше чем на порядок и обладают определенной стабильностью. По характеру колебаний на основной площадке земляного полотна эта составляющая колебаний соответствует вертикальной составляющей колебаний, что подтверждается записями на рисунке 3. Результаты натурных исследований колебательного процесса земляного полотна, сложенного глинистыми грунтами, проведенных И. В. Прокудиным, показывают, что горизонтальная составляющая колебаний в направлении, перпендикулярном оси пути, существенно зависит от люфта ширины колеи и размера между ребрами колесной пары. Например, осциллограммы, записанные И. В. Прокудиным на пути с шириной колеи 1520 мм при движении пассажирских поездов со скоростью 218 км/ч, свидетельствуют о регистрации колебаний с амплитудой, значительно меньшей, чем у вертикальной составляющей, но превышающей амплитуду колебаний горизонтальной составляющей вдоль пути. Несколько иной характер имеет горизонтальная составляющая колебаний глинистых грунтов при проходе поездов по пути с шириной колеи порядка 1528 – 1530 мм. Основное отличие появляется в том, что наложенные колебания с увеличением скорости пассажирских поездов свыше 70 км/ч начинают проявляться в виде отдельных резких всплесков и пик, отличающихся по амплитуде от соседних колебаний в 7 – 10 раз. Амплитуда колебаний в местах отдельных всплесков, возникающих от действия движущихся пассажирских поездов со скоростью 140 – 160 км/ч, возрастает настолько, что достигает величины амплитуды вертикальных колебаний, а в отдельных случаях превосходит ее [5].

По результатам наших экспериментов записи колебаний на основной площадке земляного полотна, отсыпанного барханными песками, при ширине колеи 1522 мм при проходе пассажирских поездов по участку измерений свидетельствуют о регистрации колебаний с амплитудой, несколько меньшей, чем у вертикальной составляющей, но в несколько раз превышающей амплитуду колебаний горизонтальной составляющей вдоль пути.

С увеличением скорости движения поездов горизонтальная составляющая колебаний в перпендикулярном направлении существенно возрастает, причем на некотором удалении от оси пути вертикальная и горизонтальная составляющие колебаний начинают выравниваться по величине за счет меньшей интенсивности затухания горизонтальных колебаний.

Сравнение характера колебаний грунтов в различных направлениях дает возможность получить качественную картину соотношения амплитуд различных составляющих. Полученные результаты свидетельствуют о том, что колебания в вертикальной плоскости проявляются с амплитудой, в 3,5 раза превышающей колебания в горизонтальной плоскости вдоль пути и почти в два раза превышающей колебания в горизонтальной плоскости в направлении, перпендикулярном оси пути.

Исследования колебаний в зависимости от скорости движения проводились для пассажирских поездов в диапазоне изменения скоростей от 60 до 90 км/ч. Результаты исследования представлены на рисунке 4.

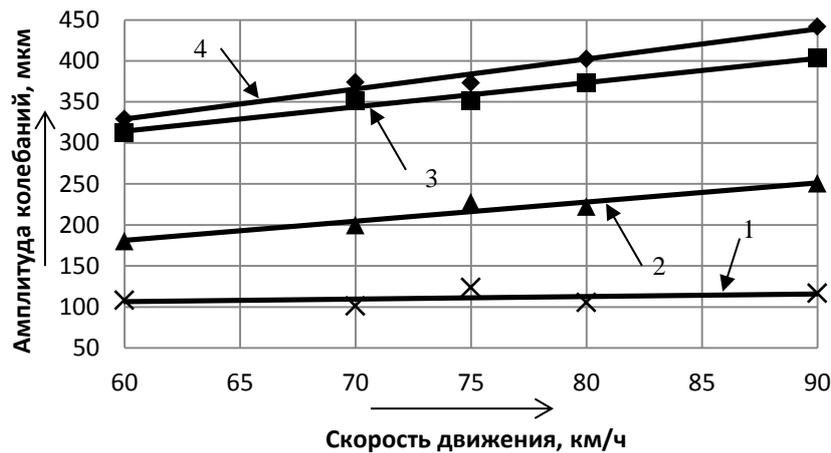


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды колебаний барханных песков от скорости движения пассажирских поездов: × – амплитуда колебаний в горизонтальном направлении вдоль пути; ▲ – то же, в горизонтальном направлении поперек пути; ■ – то же, в вертикальном направлении; ◆ – результирующая максимальной вероятной амплитуды колебаний

Как видно из рисунка 4, все составляющие амплитуды колебаний во всем диапазоне изменения скоростей характеризуются прямолинейными зависимостями. Интенсивность возрастания амплитуды колебаний в горизонтальном направлении вдоль пути (кривая 1) во всем диапазоне скоростей практически не меняется и составляет 4 мкм на каждые 10 км/ч. Кривая 2 на рисунке 4 отображает зависимость изменения амплитуды горизонтальной составляющей колебаний в перпендикулярном к оси пути направлении с увеличением скорости пассажирских поездов. Интенсивность колебаний горизонтальной составляющей практически равняется интенсивности колебаний вертикальной составляющей (кривая 3). Объясняется это тем, что ширина колеи в рабочем поперечнике составляла 1522 мм. Из-за высокой чувствительности барханных песков к вибродинамическим воздействиям увеличение ширины колеи даже на 2 мм значительно влияет на величину амплитуды колебаний горизонтальной составляющей в перпендикулярном оси пути направлении. Следует отметить, что исследования боковых сил взаимодействия между колесом и рельсом, выполненные при движении поездов по рельсовой колее шириной 1530 мм, выявили наличие больших по величине горизонтальных сил, предельные значения которых составляют 80 – 100 кН [8, 9]. Сокращение ширины зазора между гребнями колес и внутренними боковыми гранями рельсов на 4 мм, а значит, и сокращение ширины рельсовой колеи, приводит к снижению боковых сил на 25 – 30 % [5]. Вертикальная составляющая амплитуды колебаний для барханных песков увеличивается с ростом скорости с интенсивностью, в среднем 28 мкм на каждые 10 км/ч. Абсолютные значения максимальной вероятной амплитуды колебаний в вертикальном направлении не превышают 405 мкм.

Кривая 4 на рисунке 4 отображает изменение результирующей максимальной вероятной амплитуды колебаний барханных песков основной площадки земляного полотна с увеличением скорости движения пассажирских поездов. Видно, что амплитуда колебаний практически определяется величиной вертикальной составляющей, имеет такой же характер и увеличивается с ростом скорости с интенсивностью 37 мкм на 10 км/ч.

Следует отметить, что важнейшей особенностью полученных результатов является резкое увеличение амплитуды колебаний земляного полотна, отсыпанного барханными песками. Например, по результатам исследований И. В. Прокудина [5] при скорости движения пассажирских поездов 90 км/ч при ширине колеи 1520 мм результирующая амплитуда колебаний глинистых грунтов основной площадки земляного полотна составляет 125 мкм, а при земляном полотне, отсыпанном барханными песками, она составляет 440 мкм, т. е. возраста-

ет в 3,5 раза. Даже учитывая, что наши эксперименты проводились на участке пути с шириной колеи 1522 мм, эта разница очень существенная. По-видимому, такое увеличение динамики является следствием отличий основных характеристик барханных песков от глинистых (связных) грунтов, таких как логарифмический декремент затухания колебаний, деформативность в зависимости от других факторов, изменение различных физико-механических свойств от влажности и, самое значимое, разные расчетно-реологические модели поведения грунтов разного сложения при вибродинамическом воздействии.

Результаты экспериментальных данных указывают на изменение соотношения между значениями амплитуды различных составляющих с возрастанием скорости движения пассажирских поездов. Расчеты показывают, что во всем диапазоне изменения скоростей влияние амплитуды горизонтальной составляющей вдоль оси пути на величину максимальной результирующей амплитуды определяется величиной, не превышающей 4 %, поэтому при определении результирующей амплитуды колебаний барханных песков, возникающей от прохода пассажирских поездов, для практических расчетов можно не учитывать горизонтальную составляющую амплитуды колебаний вдоль пути.

Приведенные выше данные характеризуют колебания барханных песков основной площадки земляного полотна. Полученные зависимости полностью имеют место для барханных песков, расположенных в теле земляного полотна и за его пределами. Совершенно очевидно, что амплитуда колебаний во втором случае будут значительно меньше по величине из-за их затухания в грунте.

Выявление затухания амплитуды по глубине земляного полотна осуществлялось по данным записей колебаний, зарегистрированных сейсмоприемниками, установленными согласно схеме на рисунке 1 на различной глубине от верха основной площадки земляного полотна. Результаты исследований представлены на рисунке 5. На этом рисунке представлен характер изменения по глубине показателя  $\delta_l$ , которое определяется как отношение амплитуд, зарегистрированных на определенной глубине от верха основной площадки  $A_z$ , к амплитудам, зарегистрированным на основной площадке  $A_0$ :

$$\delta_l = \frac{A_z}{A_0}. \quad (3)$$

Зависимость, представленная на рисунке 5, представляет собой функцию вида  $\delta_l = f(z)$ . На рисунке 5 представлены данные экспериментов, проведенных под пассажирскими поездами с локомотивом 2ТЭ10, следовавшими со скоростью движения 60 – 90 км/ч. Полученные кривые хорошо аппроксимируют экспоненциальную функцию, а имеющиеся отклонения точек от некоторого среднего значения лежат в пределах допустимого для динамических процессов. Исходя из этого на рисунке 5 представлена построенная по осредненным данным кривая, вид которой также близок к экспоненте.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 5, можно сделать следующий вывод: величина  $\delta_l$  существенно больше в верхней части земляного полотна, т. е. в зоне примыкания к основной площадке, чем в нижележащих слоях. Ориентировочно на первом полуметре коэффициент затухания равен 0,66, на втором – 0,46, на третьем – 0,38. Из этого следует, что верхние слои земляного полотна в наибольшей степени рассеивают энергию колебаний, поглощая ее и переводя в тепловую энергию, в результате чего на нижние слои грунта приходится существенно меньшая часть механических колебаний.

Поскольку  $\delta_l$  (в данном случае уже характеризующая интенсивность затухания колебаний) непосредственно из графика не определяется, осредненная кривая перестроена в полулогарифмических координатах и представлена на рисунке 5. В результате получилась линейная зависимость, выражающаяся уравнением прямой с постоянным угловым коэффициентом. Этот коэффициент представляет собой натуральный логарифм  $\delta_l$ , характеризующий за-

тухание амплитуды колебаний на 1 м глубины. В частности, в нашем случае он равен ( $-0,6976$ ), тогда как сам коэффициент  $\delta_1 = 0,4988$ .

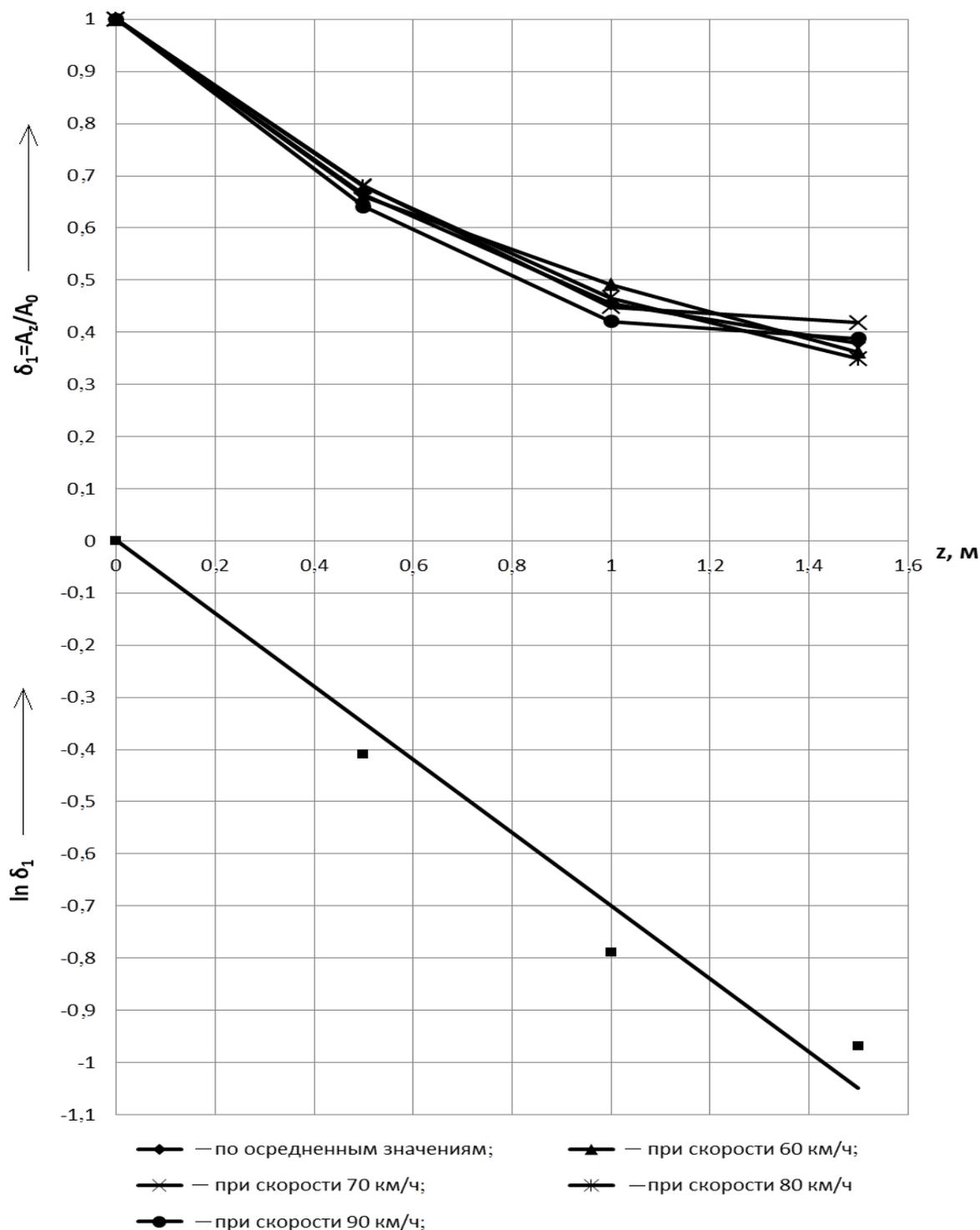


Рисунок 5 – Затухание амплитуды колебаний по глубине земляного полотна, отсыпанного барханными песками

Аналитическое определение амплитуды смещения барханных песков по глубине земляного полотна осуществляется по формуле:

$$A_z = A_0 e^{z \ln \delta_1}, \quad (4)$$

где  $z$  – координата рассматриваемой точки по вертикали, м;

$\delta_1$  – коэффициент затухания барханных песков по глубине, 1/м.

Выявление затухания амплитуды в направлении, перпендикулярном оси пути земляного полотна, осуществлялось по данным записей колебаний при установке датчиков по схеме, изображенной на рисунке 1, на обочине и за пределами полотна в поле. Результаты исследований представлены на рисунке 6, где показано затухание в поперечном направлении осредненных значений максимальной вероятной амплитуды колебаний, полученных при проходе пассажирских поездов через рабочий поперечник при различных скоростях движения.

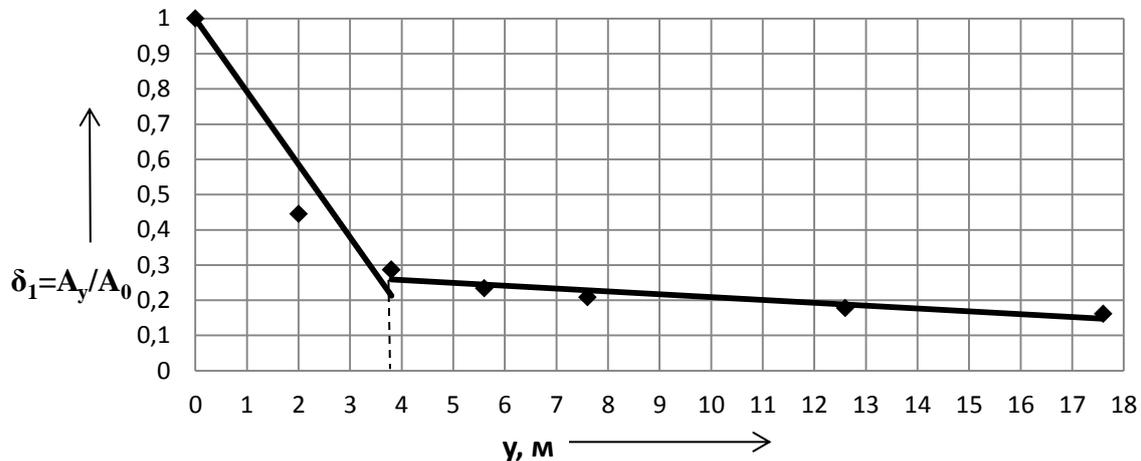


Рисунок 6 – Затухание амплитуды колебаний в перпендикулярном направлении от оси пути в теле земляного полотна, отсыпанного барханными песками, и за его пределами

Характер полученной зависимости соответствует ярко выраженной экспоненте с наличием двух зон по интенсивности затухания амплитуды, а также выявляет влияние откоса насыпи на увеличение амплитуды колебаний. Первая зона находится в диапазоне изменения расстояния от 0 до 3,6 м и соответствует интенсивному затуханию колебаний. В пределах этой зоны проявляется пульсация напряжений и их полное затухание в теле земляного полотна. Вызванные пульсацией смещения частиц барханных песков в последующем распространяются по телу полотна и за его пределами.

Вторая зона затухания колебаний находится в пределах от 3,6 м до расстояний, при которых амплитуда близка к нулю. В этой зоне можно наблюдать крайне слабое затухание амплитуды колебаний, по зависимости, близкой к прямолинейной.

Исследования распространения колебаний в теле земляного полотна и за его пределами выявило, что затухание их происходит одновременно в вертикальной и горизонтальной плоскостях по экспоненциальной зависимости. Поэтому значения амплитуды результирующих колебаний в любой точке земляного полотна определяются выражением:

$$A_{zy} = A_0 e^{z \ln \delta_1 - \delta_2 \cdot \phi(y) - \delta_2''(y-1,35) + \delta_3 h_i}, \quad (5)$$

$$\text{где } \delta_3 = \frac{\ln \delta_1}{1,5 \text{ctg} \alpha_1}; \quad h_i = \begin{cases} 0 & \text{при } y \leq 0,5b_{\text{пл}}; \\ (y - 0,5b_{\text{пл}}) \text{tg} \alpha_1 & \text{при } y > 0,5b_{\text{пл}}; \end{cases} \quad \phi(y) = \begin{cases} (y - 1,35) & \text{при } y \leq y_1; \\ (y_1 - 1,35) & \text{при } y > y_1; \end{cases}$$

$A_0$  – максимальная вероятная результирующая амплитуда колебаний барханных песков на основной площадке земляного полотна, мкм;

$z, y$  – координаты рассматриваемой точки по вертикали и горизонтали при расположении центра координат по оси пути на основной площадке, м;

$y_1$  – расстояние от оси пути до границы первой и второй зон затухания, м,  $y_1 = 3,6$  м для барханных песков;

$\delta_1$  – коэффициент загасания колебаний в вертикальной плоскости, 1/м.  $\delta_1 = 0,497$  1/м;

$\delta_2'$  – то же в горизонтальной плоскости в пределах зоны проявления пульсации напряжений, 1/м,  $\delta_2' = -0,207$  1/м;

$\delta_2''$  – коэффициент загасания поверхностных волн в горизонтальной плоскости, 1/м,  $\delta_2'' = -0,008$  1/м;

$\delta_3$  – коэффициент загасания колебаний в откосе, 1/м;

$\alpha_1$  – угол заложения откоса насыпи;

$b_{пл}$  – ширина основной площадки земляного полотна, м;

1,35 – длина полушпалы, м.

Сопоставление результатов расчета амплитуды колебаний по формуле (5) с осредненными значениями, полученными в экспериментах при различных скоростях движения пассажирских поездов, показывает хорошее их совпадение и пригодность полученной зависимости для вычисления амплитуды смещения. Наибольшее отклонение составляют 16 – 17 мкм, что не превышает 9 %.

Выполненные исследования позволили получить зависимость затухания (а следовательно, и распространение колебаний) в вертикальном и горизонтальном направлениях, что является основой для оценки величины вибродинамического воздействия в любой точке земляного полотна. Кроме того, выражение (5) определяет возможность аналитической связи между амплитудами колебаний барханных песков и их прочностными характеристиками при воздействии вибродинамической нагрузки.

## Список литературы

1. Баркан, Д. Д. Экспериментальное исследование сотрясений грунта, вызываемых паровозом [Текст] / Д. Д. Баркан // Инженерный сборник института механики / Академия наук СССР. – М., 1946. – Т. 3. – Вып. 1. – С. 15 – 88.

2. Ершов, В. А. Устойчивость песчаных насыпей в связи с колебаниями, вызываемыми железнодорожным и автомобильным транспортом [Текст] / В. А. Ершов // Труды ЛИСИ / Ленинградский инженерно-строительный ин-т. – Л., 1962. – № 37. – С. 76 – 94.

3. Ершов, В. А. Колебания песчаных грунтов в откосных призмах железнодорожных насыпей, вызываемых поездами с тепловозной тягой [Текст] / В. А. Ершов, И. И. Костюков // Механика грунтов, основания и фундаменты. Краткое содержание докладов к XXV научной конференции ЛИСИ / Ленинградский инженерно-строительный ин-т. – Л., 1967. С. 18 – 28.

4. Маслов, Н. Н. Условия динамической устойчивости водонасыщенных песков [Текст] / Н. Н. Маслов // Труды ЛИСИ / Ленинградский инженерно-строительный ин-т. – Л., 1954. – Вып. 18. – С. 5 – 83.

5. Прокудин, И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.06 / Прокудин Иван Васильевич. – Ленинград, 1982. – 458 с.

6. Смолин, Ю. П. Полевые исследования динамической устойчивости водонасыщенных песчаных насыпей от поездной нагрузки [Текст] / Ю. П. Смолин, А. С. Дербенцев // Доклады зональной науч.-техн. конф. – Владивосток, 1983. – С. 43 – 48.

7. Абдукамилов, Ш. Ш. Распространение колебаний в железнодорожном земляном полотне, отсыпанном барханными песками [Текст] / Ш. Ш. Абдукамилов, И. В. Прокудин // Проблемы механики / Академия наук РУз. – Ташкент, 2011. – № 3. С. 70 – 73.

8. Андреев, Г. Е. Экспериментальное исследование боковых давлений при высоких скоростях движения [Текст] / Г. Е. Андреев // Новое в технике и технологии. Транспорт. – М., 1969. – С. 24 – 58.

9. Вялов, С. С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния слабого грунта, подстилаемого малосжимаемой толщей [Текст] / С. С. Вялов, А. Л. Миндич // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М., 1977. – № 1. – С. 26 – 30.

## References

1. Barkan D. D. Experimental study of ground shaking caused by a locomotive [Jeksperimental'noe issledovanie sotrasenij grunta, vyzyvaemyh parovozom]. *Inzhenernyj sbornik instituta mehaniki – Engineering the collection of the Institute of mechanics*, 1946, no. 1, pp. 15 – 88.
2. Ershov V. A. Stability of sand embankments due to fluctuations caused by, rail and road [Ustojchivost' peschanyh nasypej v svjazi s kolebanijami, vyzyvaemymi, zheleznodorozhnym i avtomobil'nym transportom]. *Trudy leningradskogo inzhenerno-stroitel'noj institute – Proceedings of the Leningrad engineering construction Institute*, 1962, no. 37, pp. 76 – 94.
3. Ershov V. A., Kostjukov I. I. Fluctuations in the sloping sandy soils prisms railway embankments caused by trains with diesel traction [Kolebanija peschanyh gruntov v otkosnyh prizmah zheleznodorozhnyh nasypej, vyzyvaemyh poezdami s teplovoznnoj tjagoj]. *Kratkie sodержaniya dokladov k XXV nauchnye konferencii LISI «Mehanika gruntov, osnovanija i fundamenty»* (Summaries of the XXV to scientific conferences LISI «Soil Mechanics, bases and foundations»). – Leningrad, 1967. pp. 18 – 28.
4. Maslov N. N. Terms of dynamic stability of saturated sands [Uslovija dinamicheskoj ustojchivosti vodonasyshennyh peskov]. *Trudy LISI – Proceedings of LISI*, 1954, no. 18, pp. 5 – 83.
5. Prokudin I. V. *Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemljanogo polotna iz glinistyh gruntov, vosprinimajushhih vibrodinamicheskih nagruzku* (Strength and deformability of the railway roadbed of clayey soils that receive vibrodynamic load). Doctor's thesis, Leningrad, 1982, 458 p.
6. Smolin Ju. P., Derbencev A. S. Field studies of dynamic stability of water-saturated sand embankments of train load [Polevye issledovanija dinamicheskoj ustojchivosti vodonasyshennyh peschanyh nasypej ot poezdnoj nagruzki]. *Doklady zonal'noj nauchno-tehnicheskoi konferencii* (Reports zonal scientific conference). – Vladivostok, 1983, pp. 43 – 48.
7. Abdukamilov Sh. Sh., Prokudin I.V. Waves propagation in railway subgrade, backfilled with sand dunes [Rasprostranenie kolebanij v zheleznodorozhnom zemljanom polotne, otsypannom barhannymi peskami]. *Problemy mehaniki – Problems of Mechanics*, 2011, no. 3, pp. 70 – 73.
8. Andreev G. E. Experimental study of lateral pressure at high speeds [Jeksperimental'noe issledovanie bokovyh davlenij pri vysokih skorostjah dvizhenija]. *Novoe v tehnike i tehnologii. Transport – New in equipment and technology. Transport*, 1969, pp. 24 – 58/
9. Vjalov S. S., Mindich A. L. Experimental study of stress-strain state of the soft soil, low compressibility of underlying strata [Jeksperimental'noe issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija slabogo grunta, podstilaemogo maloszhimaemoj tolshhej]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov – Foundations, foundations and soil mechanics*, 1977, no. 1, pp. 26 – 30.

УДК 539.4:518.12

Л. А. Адегова, Г. Ф. Рудзей

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ

*Представлена усовершенствованная методика численного прогнозирования усталостной долговечности элементов конструкций с использованием модифицированных кривых усталости, учитывающих влияние конструктивно-технологических особенностей изделий реальной конструкции. Приведены результаты расчетной оценки сопротивления усталости тонкостенных конструкций и сравнение их с экспериментальными данными.*

Традиционная методика расчета усталостной долговечности элементов конструкций основана на использовании кривых усталости типовых образцов (чаще всего с отверстием с

теоретическим коэффициентом концентрации напряжений  $k_t = 2,6$ ). Изданы различные справочные материалы по долговечности гладких образцов и образцов с различными концентраторами напряжений. Однако из-за большого разнообразия возможных конструктивных решений не удается получить базовые кривые усталости для всех расчетных случаев. Кроме того, значимое влияние на долговечность элементов конструкций оказывает технология производства. Поэтому при прогнозировании усталостной долговечности учет влияния конструктивно-технологических факторов осуществляется через введение коэффициентов коррекции, установленных на основании имеющегося опыта и накопленных экспериментальных данных. Коэффициенты коррекции применяются в практике расчета ресурса конструкций отечественными и зарубежными фирмами [1 – 3].

Традиционная методика оценки усталостной долговечности включает в себя следующие этапы [2].

1. Создается конечно-элементная модель (КЭМ).
2. Задаются граничные условия.
3. Задается циклограмма нагружения.
4. Выполняется анализ напряженно-деформированного состояния (НДС). Определяются наиболее нагруженные (критические) зоны конструкции.
5. Для каждой критической зоны проводится обработка циклограмм напряжений методом «полных циклов». Получают спектр напряжений в виде асимметричных циклов с экстремумами  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ .
6. Асимметричные циклы приводятся к эквивалентным по вносимому усталостному повреждению отнулевым циклам:

$$\sigma_{0i} = \begin{cases} \sqrt{\sigma_{\max} \times (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}, & \sigma_m \geq 0; \\ \sqrt{2} \times (0,6 \times \sigma_{\max} - 0,4 \times \sigma_{\min}), & \sigma_m < 0, \quad \sigma_{\max} > 0; \\ 0, & \sigma_{\max} \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$  – среднее напряжение цикла.

Максимальное значение одного отнулевого цикла, эквивалентного по вносимому усталостному повреждению всему блоку нагружения, согласно гипотезе линейного суммирования повреждений определяется зависимостью:

$$\sigma_{0\max} = \sqrt[m]{\sum (n_i \times \sigma_{0i}^m)}, \quad (2)$$

где  $n_i$  – число отнулевых циклов с максимальным значением  $\sigma_{0i}$ ;  $m$  – показатель кривой усталости.

Выбираются базовые кривые усталости стандартных образцов, описываемые уравнением:

$$N\sigma_{\text{бр}}^m = A_{\text{бр}}, \quad (3)$$

где  $A_{\text{бр}}$  – параметр кривой усталости, зависящий от свойств материала и конструктивно-технологических особенностей конструкции;  $\sigma_{\text{бр}}$  – напряжение стандартного образца в сечении брутто.

Расчетная долговечность определяется соотношением:

$$N_p = \frac{A_{\text{бр}}}{\sigma_{0\max}^m} \times k_{\text{кор}}, \quad (4)$$

где  $k_{\text{кор}}$  – коэффициент коррекции, позволяющий учитывать конструктивно-технологические особенности конструкции.

При использовании традиционной методики расчета усталостной долговечности элементов конструкций совпадение прогнозируемой долговечности и долговечности, полученной при стендовых испытаниях конструкции, не всегда бывает удовлетворительным. Поэтому проведены исследования по совершенствованию традиционной методики расчета усталостной долговечности конструкций посредством использования модифицированных кривых усталости, учитывающих конструктивно-технологические решения проектировщиков [4]. Методика модификации основана на следующем.

Экспериментально установлено, что в некотором диапазоне долговечностей ( $\approx$  при  $2 \times 10^4 \leq N \leq 5 \times 10^6$  циклов) функции  $\lg N_i = f(\lg \sigma_i)$  линейны. При расчете усталостной долговечности все циклы нагружения приводятся к отнулевым. В этом случае в двойных логарифмических координатах при отнулевом нагружении уравнение базовой кривой усталости образцов (уравнение регрессии) имеет вид:

$$\lg N_i = a + b \cdot \lg \sigma_{\max i}, \quad (5)$$

где  $N_i$  – число циклов до разрушения на заданном уровне напряжения;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты уравнения регрессии, которые определяются экспериментально на основании результатов усталостного эксперимента и формул линейного регрессионного анализа;  $\sigma_{\max i}$  – максимальное напряжение цикла нагружения.

При усталостных испытаниях на каждом уровне нагружения было испытано от 6 до 30 образцов. Была принята гипотеза о логарифмически нормальном законе распределения усталостной долговечности. Осуществлялся расчет среднего логарифма долговечности, среднего квадратического отклонения, 90 %-ных доверительных интервалов, проверялись статистические гипотезы о равенстве дисперсий и средних [5].

На основании статистической обработки результатов многочисленных усталостных испытаний образцов различного типа (обработаны 54 кривых усталости, испытано более 3000 образцов), изготовленных из конструкционных сплавов Д16АТ, АК4-1АТ1, 1163АТВ, 1201Т1, В95Т1, ВТ1-0, ПТ-7М, стали 12Х18Н10Т, при отнулевых циклах нагружения в диапазоне напряжений, характерных для авиационных конструкций (100...400 МПа) установлены зависимости между коэффициентами линий регрессии. Кроме того, выявлены закономерности изменения параметров функций  $\lg N = f(\lg \sigma_{\max i})$  в зависимости от теоретического коэффициента концентрации напряжений, толщины образцов, температуры испытаний, частоты нагружения и др. Используя установленные закономерности, можно осуществлять расчет параметров уравнений кривых усталости при варьировании указанных факторов, т. е. модификацию кривых усталости [6, 7]. Расчет усталостной долговечности с использованием модифицированных кривых усталости осуществляется по изложенной выше традиционной методике, но для учета конструктивно-технологических факторов осуществляется коррекция кривых усталости на основе зависимостей, полученных ранее при анализе закономерностей изменения параметров уравнений регрессии.

Для оценки НДС в элементах тонкостенных конструкций была разработана КЭМ, предназначенная для проведения статического анализа в линейной постановке. Расчетное нагружение осуществлено в соответствии с Программой стендовых испытаний конструкции. Программа нагружения предусматривала комбинацию из трех типов блоков нагружения: «С», «D» и «E», которые отличаются друг от друга величиной и интенсивностью нагрузок. При конечно-элементном анализе были приняты граничные условия, соответствующие граничным условиям при стендовых испытаниях.

Анализ оценки долговечности проводился для наиболее нагруженных зон конструкции. Их перечень, толщина ( $h$ ), теоретический коэффициент концентрации напряжений ( $k_t$ ) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры наиболее нагруженных элементов

Номер зоны	Конструктивный элемент	Параметр	
		$k_t$	$h$ , мм
1	Зона крепления тонкостенных конструкций	2,6	4,0
2	Люк в тонкостенной конструкции	2,12	9
3	Вырез в тонкостенной конструкции	1,75	4,5

Материал перечисленных элементов конструкций – 1163Т ( $E = 71500$  МПа;  $\mu = 0,33$ ;  $\sigma_b = 450$  МПа).

Несмотря на то, что при стендовых испытаниях натуральных конструкций осмотр наиболее нагруженных зон проводится с определенной периодичностью, не всегда удается зафиксировать момент зарождения разрушений. Для конструкции, представленной в данной статье, только при наработке 8525 лабораторных блоков нагружения удалось обнаружить трещину  $l = 30$  мм от заклепки крепления тонкостенных конструкций (рисунки 1 и 2).

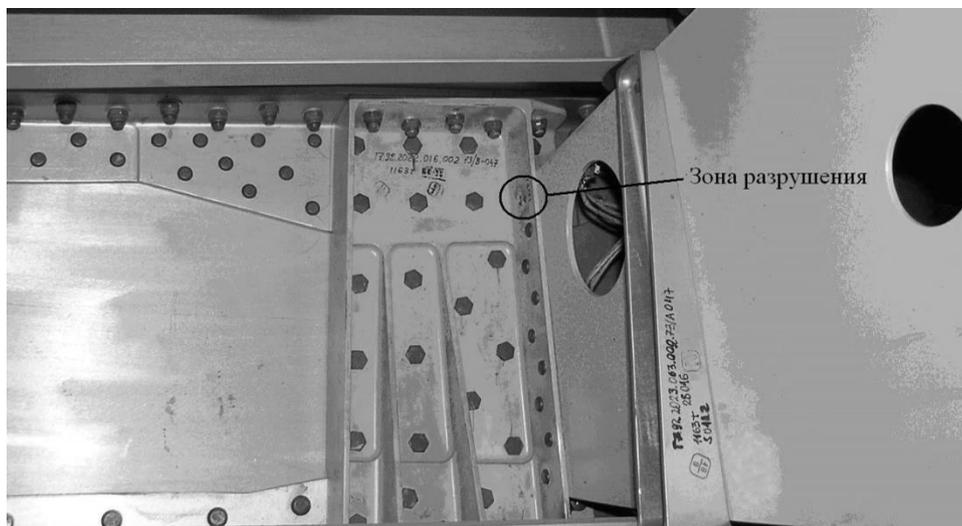


Рисунок 1 – Разрушение в зоне № 1

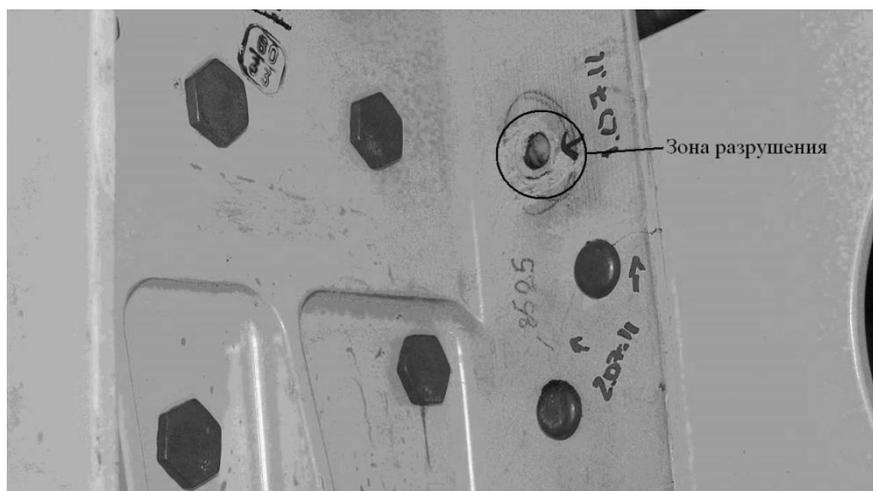


Рисунок 2 – Разрушение в зоне № 1

Численный эксперимент с применением разработанной КЭМ в зоне, где было обнаружено разрушение конструкции, выявил высокий уровень напряжений (рисунок 3).

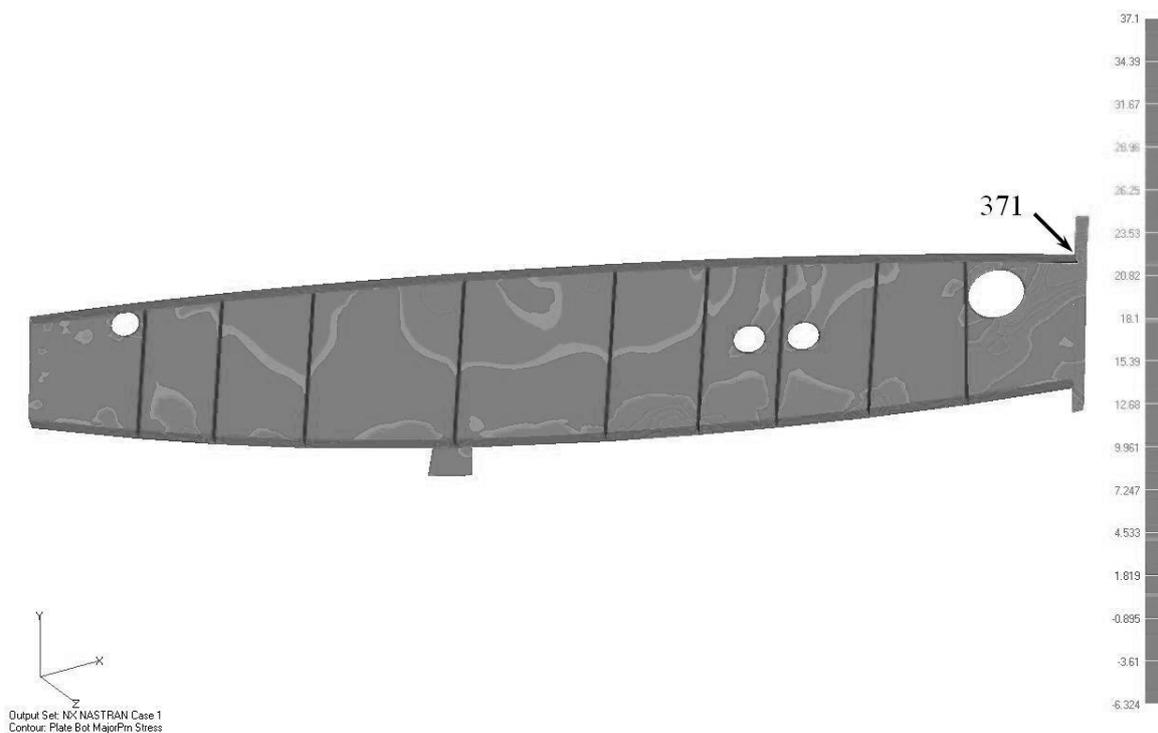


Рисунок 3 – Распределение главных напряжений в зоне № 1, блок нагружения «С», МПа («D» – 303; «E» – 252)

Выявлен высокий уровень напряжений по кромкам вырезов под люки в тонкостенной конструкции (рисунок 4).

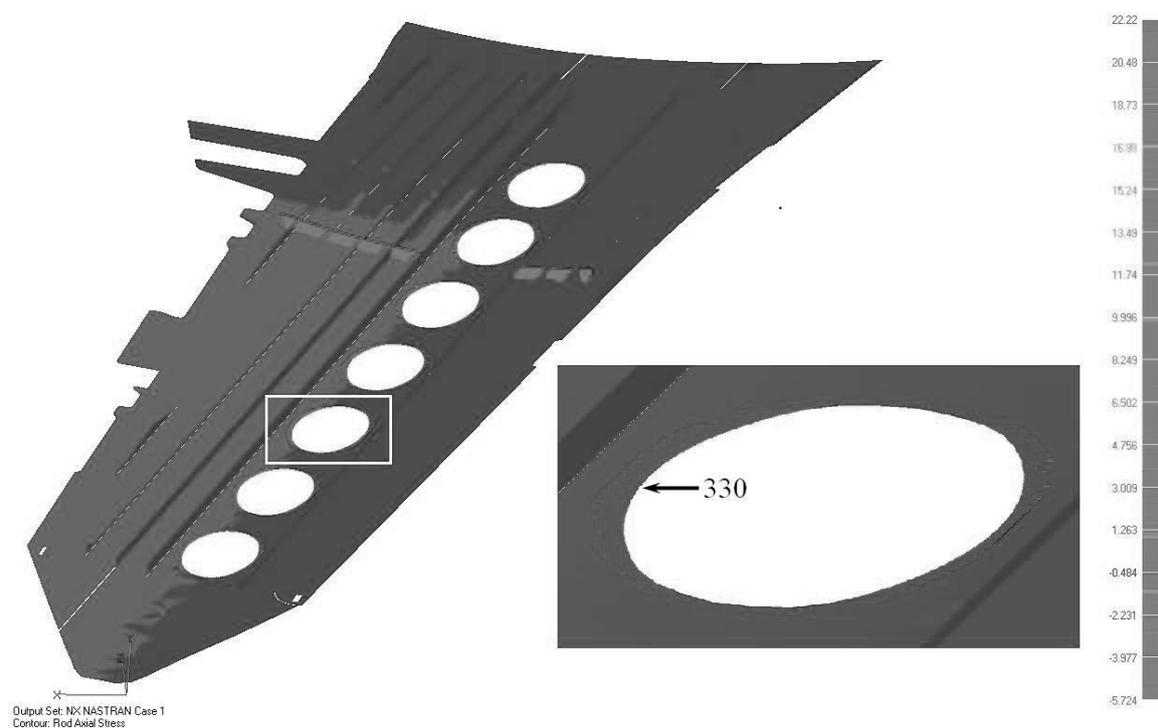


Рисунок 4 – Распределение главных напряжений в зоне № 2, блок нагружения «С», МПа («D» – 270; «E» – 222)

Выявлен высокий уровень напряжений по кромке выреза в тонкостенной конструкции (рисунок 5).

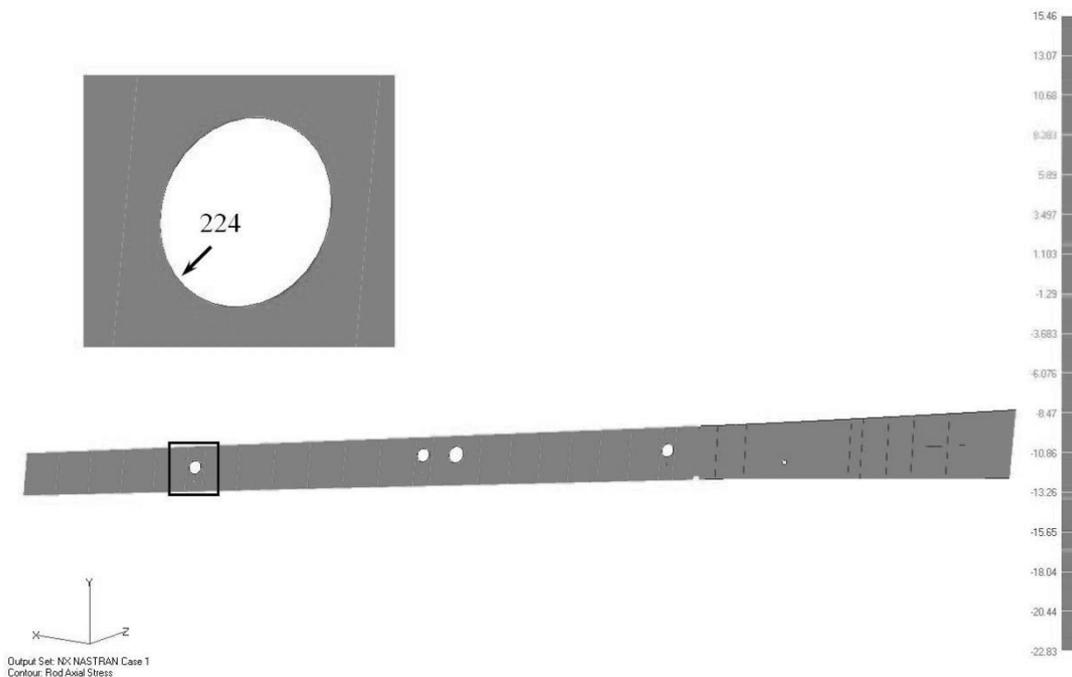


Рисунок 5 – Распределение главных напряжений в зоне № 3, блок нагружения «С», МПа («D» – 191; «E» – 160)

Модификация кривых усталости осуществлена на основе кривых усталости образцов с отверстием из сплавов Д16ЧТ ( $h = 3$  мм и  $h = 30$  мм) и 1163Т ( $h = 10..16$  мм и  $h = 30$  мм). Выбран диапазон напряжений, используемый при расчете ( $\sigma_{\max} = 160..250$  МПа). Вычислены коэффициенты уравнений регрессии образцов с отверстием с  $k_t = 2,6$ . На рисунке 6 показаны полученные зависимости  $a = f(h)$ ,  $b = f(h)$  уравнения (5).

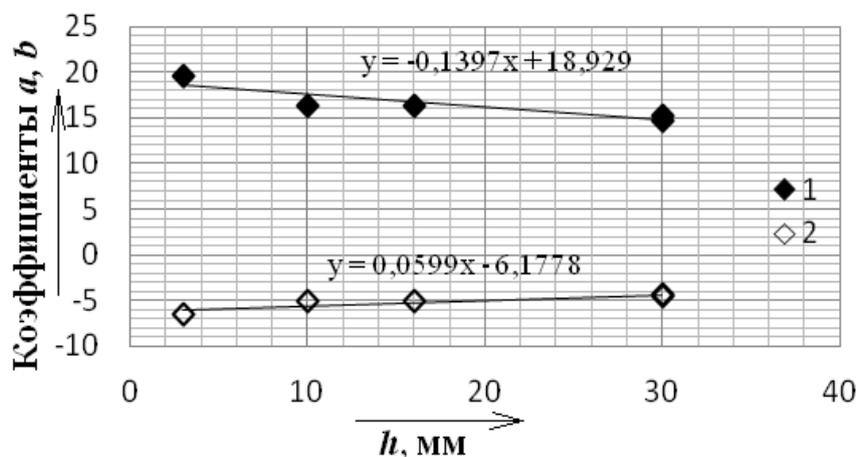


Рисунок 6 – Зависимости параметров уравнений регрессии образцов с отверстием от толщины плиты (1 – a, 2 – b)

На основе анализа рисунка 6 сделан вывод о том, что для модификации кривых усталости по толщине плиты результаты испытаний названных выше сплавов можно объединить в одну группу. На основе полученных зависимостей (см. рисунок 6) вычислены коэффициенты уравнения регрессии для  $h = 4$  мм и  $k_t = 2,6$ .

Для коррекции кривых усталости по коэффициенту концентрации напряжений использованы данные, полученные в работе [8] при испытании образцов из листа сплава Д16АТ и 1163АТВ с различными концентраторами напряжений. На рисунке 7 показана модификация кривых усталости по  $k_t$  для выреза в стенке тонкостенной конструкции (зона № 3).

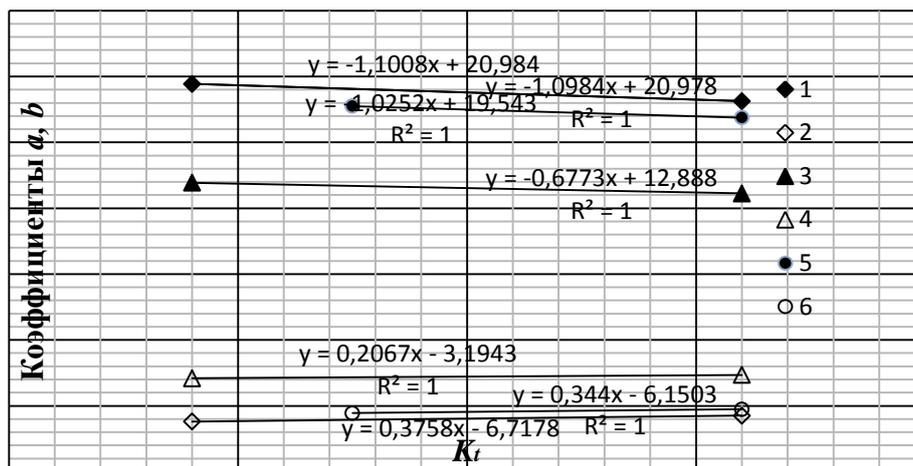


Рисунок 7 – График зависимости параметров уравнений регрессии (a, b – соответственно темные и светлые точки) от теоретического коэффициента концентрации напряжений для сплава Д16АТ (1, 2), 1163АТВ (3, 4) и модифицированных кривых (5, 6) для выреза в стенке тонкостенной конструкции (1163Т)

В таблице 2 приведены уравнения регрессии, полученные по аналогии с представленными выше для модификации кривых усталости. Расчетные кривые усталости построены на рисунке 8.

Таблица 2 – Модификация кривых усталости

Конструктивный элемент	Параметр		Уравнения регрессии	
	$k_t$	h, мм	варьирование по h	варьирование по $k_t$
Люк в тонкостенной конструкции (зона № 2)	2,6	9	$\lg N = 16,5965 - 5,14341 \lg \sigma_{\max}$	–
	2,12		–	$\lg N = 17,0804 - 5,30501 \lg \sigma_{\max}$
Вырез в тонкостенной конструкции (зона № 3)	2,6	4,5	$\lg N = 16,8777 - 5,25591 \lg \sigma_{\max}$	–
	1,75		–	$\lg N = 17,7491 - 5,54831 \lg \sigma_{\max}$
Зона крепления тонкостенных конструкций (зона № 1)	2,6	4	$\lg N = 18,3702 - 5,93821 \lg \sigma_{\max}$	–

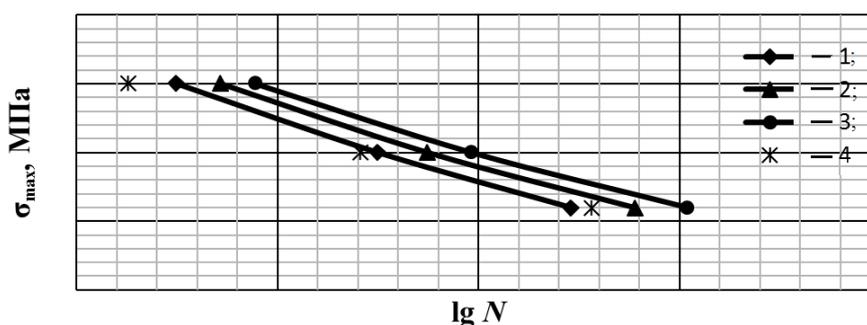


Рисунок 8 – Исходная кривая усталости (1 – h = 10 мм) и модифицированные кривые усталости для зон № 2 (2), № 3 (3) и № 1 (4)

В результате исследований были получены кривые усталости, описываемые уравнениями: зона № 1:  $N\sigma_{\text{оп}}^{5,94} = 1,19 \times 10^{12}$ ; зона № 2:  $N\sigma_{\text{оп}}^{5,3} = 3,44 \times 10^{10}$ ; зона № 3:  $N\sigma_{\text{оп}}^{5,55} = 2,22 \times 10^{10}$ .

Для расчета по традиционной методике в зоне № 1 была выбрана кривая усталости стандартного образца (полоса с отверстием) толщиной 3 мм, изготовленного из сплава Д16ЧТ, описываемая уравнением  $N\sigma_{\text{оп}}^{6,45} = 4,524 \times 10^{12}$ . В соответствии с соотношением (4) введен коэффициент коррекции [1]  $k_{\text{кор}} = k_{t_g}^m$ , где  $k_{t_g} = 3,02$  – коэффициент концентрации напряжений в

стандартном образце относительно напряжений «брутто». Расчетная долговечность  $N_p$  по традиционной методике для зоны разрушения составила 9202 блока нагружения.

При использовании методики, основанной на модификации кривых усталости, применили кривую усталости образца (материал 1163Т, толщина 4 мм, коэффициент концентрации напряжений по сечению «нетто»  $k_t = 2,6$ )  $N\sigma_{6p}^{5,94} = 1,19 \times 10^{12}$ . Расчетная долговечность для зоны разрушения  $N_p$  составила 8384 блока нагружения.

При оценке долговечности по традиционной методике для зон № 2 и 3 использовали кривую усталости стандартного образца, изготовленного из катаной плиты толщиной 10...16 мм материала 1163Т, описываемую уравнением  $N\sigma_{6p}^{5,04} = 1,007 \times 10^{11}$ . В соответствии с соотношением (4) для конструктивных элементов с большими отверстиями введен коэффициент

коррекции [1]  $k_{кор} = \left(\frac{k_{тг}}{k_2}\right)^m$ , где  $k_2$  – коэффициент, учитывающий масштабный эффект при оценке долговечности больших отверстий по кривым усталости стандартных образцов (с  $d = 5...6$  мм),  $k_2 = 2,8$ . Расчетная долговечность составила: в зоне № 2:  $N_p = 9056$  блоков нагружения; в зоне № 3 – 29824.

Для методики, основанной на применении модифицированных кривых усталости, для зоны № 2 использовали кривую усталости образца (материал 1163Т, толщина 9 мм,  $k_t = 2,12$ )  $N\sigma_{6p}^{5,3} = 3,44 \times 10^{10}$ . Для зоны № 3 применили кривую усталости образца (материал 1163Т, толщина 4,5 мм,  $k_t = 1,75$ )  $N\sigma_{6p}^{5,55} = 2,22 \times 10^{10}$ . Расчетная долговечность по данной методике составила: в зоне № 2:  $N_p = 5373$  блоков нагружения; в зоне № 3 – 14354.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

Для зоны № 1 при использовании методики, основанной на модификации кривых усталости, сходимость результатов прогнозирования усталостной долговечности ( $N_p = 8384$  блоков нагружения) и результатов стендовых испытаний ( $N_{экс} = 8525$  блоков нагружения) выше, чем при использовании традиционной методики ( $N_p = 9202$  блока нагружения). Нужно иметь в виду, что в ходе циклических испытаний при  $N_{экс} = 8525$  блоков нагружения была зафиксирована усталостная трещина длиной 30 мм, поэтому расчетная долговечность, основанная на модификации кривых усталости, лучше отражает реальную ситуацию.

Несмотря на то, что при данной наработке испытательного стенда в зонах № 2 и 3 разрушений не обнаружено, можно сказать, что усталостная долговечность, определенная по методике, основанной на применении модифицированных кривых усталости, имеет значения ниже, чем рассчитанная по традиционной методике. Как показывает практика сравнения значений долговечности, определенных по различным методикам, применение методики с модифицированными кривыми усталости повышает сходимость расчетных и экспериментальных значений долговечности [9].

## Список литературы

1. Белов, В. К. Повышение усталостной долговечности высоконагруженных зон конструкций самолетов на этапе ресурсных испытаний [Текст] / В. К. Белов, Л. А. Адегова // Полет. – 2010. – № 9. – С. 19 – 26.
2. Стрижиус, В. Е. Методы расчета усталостной долговечности авиационных конструкций: Справочное пособие [Текст] / В. Е. Стрижиус. – М.: Машиностроение, 2012. – 272 с.
3. Long life damage tolerant jet transport structures. American society for testing and materials. Fatigue and fracture committees [Текст] / Ulf G. Goranson, J. Hall and others // Symposium on «Design of fatigue and fracture resistant structures». Bal Harbour, Florida. November 10 – 11, 1980. – P. 612.

4. Рудзей, Г. Ф. Ускоренные усталостные испытания материалов и элементов конструкций ЛА [Текст] / Г. Ф. Рудзей // *Авиационная промышленность*. – 2011. – № 2. – С. 47 – 50.
5. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник [Текст] / М. Н. Степнов, А. В. Шаврин. – М.: Машиностроение, 2005. – 344 с.
6. Белов, В. К. Обеспечение усталостной долговечности авиационных конструкций технологическими методами: Монография [Текст] / В. К. Белов, А. А. Калюта, Г. Ф. Рудзей / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2012. – 404 с.
7. Рудзей, Г. Ф. О взаимосвязи параметров кривой усталости и возможности прогнозирования усталостной долговечности элементов конструкций [Текст] / Г. Ф. Рудзей // *Деформация, разрушение материалов*. – 2014. – № 1. – С. 41 – 48.
8. Рудзей, Г. Ф. Исследование механических характеристик материалов и конструктивных образцов из алюминиевых сплавов [Текст] / Г. Ф. Рудзей // *Авиационная промышленность*. – 2010. – № 2. – С. 27 – 30.
9. Совершенствование методики определения коэффициентов коррекции в обеспечение достоверных характеристик усталостной долговечности элементов конструкций ЛА [Текст] / В. К. Белов, Г. Ф. Рудзей и др. // *Полет*. – 2011. – № 7. – С. 42 – 46.

## References

1. Belov V. K., Adegova L. A. Povyshenie ustalostnoi dolgovechnosti vysokonagruzhennykh zon konstruktsii samoletov na etape resursnykh ispytaniy [Increase the fatigue life of aircraft structures zones heavily on stage endurance test]. *Polet – The flight*, 2010, no. 9, pp. 19 – 26.
2. Strizhius, V. E. *Metody rascheta ustalostnoi dolgovechnosti aviatsionnykh konstruktsii: spravochnoe posobie* (Methods for calculating the fatigue life of aircraft construction Nations: A Reference Guide). Moscow: Mashinostroenie, 2012, 272 p.
3. Goranson Ulf G., Hall J., Maclin J. R., Watanabe R. T. Long life damage tolerant jet transport structures. American society for testing and materials. Fatigue and fracture committees. *Reports at the Symposium on «Design of fatigue and fracture resistant structures»*. – Bal Harbour, Florida, November 10 – 11, 1980, pp. 2 – 12.
4. Rudzey G. F. Accelerated fatigue testing of materials and construction elements Nations LA [Uskorennye ustalostnye ispytaniia materialov i elementov konstruktsii LA]. *Aviatsionnaia promyshlennost' – Aviation industry*, 2011, no. 2, pp. 47 – 50.
5. Stepnov M. N., Shavrin A. V. *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy: spravochnik* (Statistical methods for processing the results of mechanical tests exist: Handbook). Moscow: Mashinostroenie, 2005, 344 p.
6. Belov V. K., Kaliuta A. A., Rudzey G. F. *Obespechenie ustalostnoi dolgovechnosti aviatsionnykh konstruktsii tekhnologicheskimi metodami: Monografiia* (Ensuring the fatigue life of aircraft structures of technological methods: Monograph). Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2012, 404 p.
7. Rudzey G. F. On the relationship between the parameters of the fatigue curve and the possibility of predicting the fatigue life of structural elements [O vzaimosviasi parametrov krivoi ustalosti i vozmozhnosti prognozirovaniia ustalostnoi dolgovechnosti elementov konstruktsii]. *Deformatsiia, razrushenie materialov – Deformation, fracture of material*, 2014, no. 1, pp. 41 – 48.
8. Rudzey G. F. Study mechanical properties of materials and design samples of aluminum alloys [Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik materialov i konstruktivnykh obraztsov iz aluminievnykh splavov]. *Aviatsionnaia promyshlennost' – Aviation industry*, 2010, no 2, pp. 27 – 30.
9. Belov V. K., Rudzey G. F., Kaliuta A. A., Adegova L. A. Improved methods of determining the correction factors in ensuring reliable performance fatigue life of aircraft structural elements [Sovershenstvovanie metodiki opredeleniia koeffitsientov korrektsii v obespechenie dostovernnykh kharakteristik ustalostnoi dolgovechnosti elementov konstruktsii LA]. *Polet – The flight*, 2011, no 7, pp. 42 – 46.

УДК 658.5

В. А. Аксенов, О. С. Юдаева, О. Г. Егорова, А. С. Гладаренко

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ ШУМО-, ВИБРОЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ ЛОКОМОТИВНОЙ ТЯГИ

*В статье рассмотрены современные шумо-, виброзащитные материалы для вагоностроения. Проведены сравнительные исследования звукопоглощающих свойств материала из арамидного волокна и экологически безопасного материала НОЛ-1А(Б). Экспериментально установлено снижение уровня шума в помещениях пассажирских вагонов за счет использования современных материалов.*

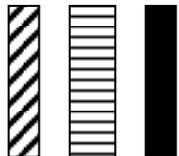
Эксплуатация современных пассажирских вагонов локомотивной тяги сопровождается значительными уровнями шума и вибрации, негативно влияющими на состояние здоровья человека.

В целях повышения эффективности борьбы с шумом осуществляются обязательный гигиенический контроль объектов, генерирующих шум, регистрация физических факторов, оказывающих вредное воздействие на окружающую среду и отрицательно влияющих на здоровье людей. Эффективным путем решения проблемы борьбы с шумом является снижение его уровня в самом источнике за счет конструктивных изменений пассажирских вагонов. К мерам этого типа относятся замена металла в некоторых деталях незвучными материалами, применение виброизоляции, глушителей, демпфирования, звукоизолирующих материалов. В некоторых случаях снижение уровня шума достигается применением звукопоглощающих пористых материалов, покрытых перфорированными листами алюминия, пластмасс. При необходимости повышения коэффициента звукопоглощения в области высоких частот звукоизолирующие слои покрывают защитной оболочкой с мелкой и частой перфорацией.

Наиболее действенным средством защиты человека от вибрации в пассажирских вагонах являются конструктивные усовершенствования, применение средств внешней виброзащиты упругодемпфирующими материалами и устройствами, которые размещаются между источником вибрации и человеком, а также постоянный контроль за исправностью пассажирских вагонов и своевременным планово-предупредительным их ремонтом, так как в процессе эксплуатации и износа происходит выраженное усиление вибрации. Учитывая то, что конструкционные особенности пассажирских вагонов предусматривают соответствие «Санитарным правилам по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте» [1], в процессе формирования составов и при эксплуатации вагонов возникают технические проблемы, обусловленные старением (техническим износом) вагонов, децентровкой, дефектами пути и т. п., что приводит на практике к ухудшению акустического режима внутренних помещений вагонов.

Классификация видов звукоизолирующих ограждающих конструкций представлена в таблице 1, виды и типы отражающих звукопоглощающих конструкций и их элементов приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Классификация видов звукоизолирующих ограждающих конструкций

Тип ограждения	Схема	Обозначение на схеме	Область применения
1	2	3	4
Одностенные (одно- слойные)		1 – твердый материал; 2 – сооружение; 3 – мягкий материал	Корпусные конструкции, обшивка, остекленные, мягкий акустический экран

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Окончание таблицы 1

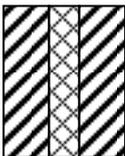
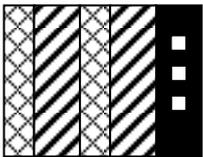
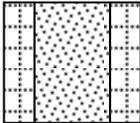
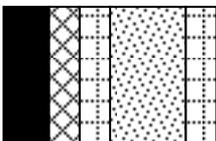
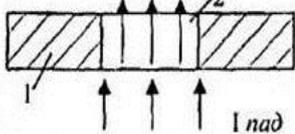
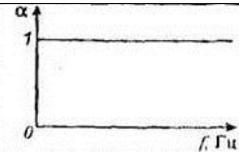
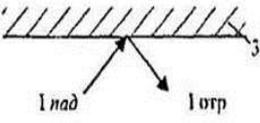
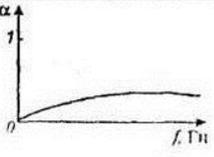
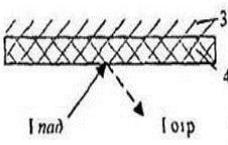
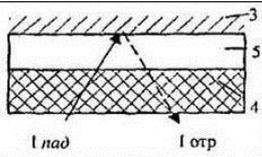
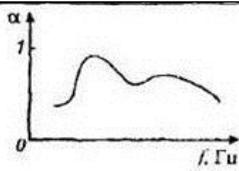
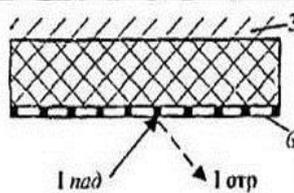
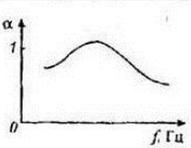
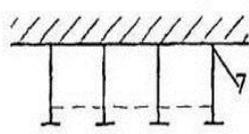
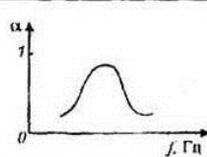
1	2	3	4
Двухслойные	1 4 	4 – звукопоглощающее покрытие	Перегородки, акустические экраны
Трехслойные	1 5 1 	5 – несжимаемое покрытие	Перегородки, акустические экраны
Многослойные	1 5 1 4 6 	6 – перфорированный лист	Звукоизолирующие перегородки
Двустенные	1 7 1 	7 – воздушный промежуток	Звукоизолирующие перегородки
Комбинированные (двустенные)	5 1 4 7 8 	8 – твердый материал, отличающийся от 1	Звукоизолирующие перегородки, укрытия

Таблица 2 – Виды и типы отражающих звукопоглощающих конструкций и их элементов

Конструкция (элемент)	Схема	Обозначение на схеме	График коэффициента $\alpha$
Открытый проем		1 – ограждение; 2 – проем	
Гладкая отражающая поверхность		3 – гладкая жесткая поверхность	
Звукопоглощающая облицовка		4 – звукопоглощающий материал (слой)	

Окончание таблицы 2

1	2	3	4
Звукопоглощение на откосе		5 – воздушный промежуток	
Звукопоглощение с перфорацией		6 – перфорированное покрытие	
Резонансное звукопоглощение		7 – резонаторы Гельмгольца	

В институте перспективных материалов им. Фраунгофера (Германия) проводятся исследования образцов пеноалюминия, который обладает целым рядом технологических свойств: теплоизоляционных и звукопоглощающих (рисунок 1). При деформации он ведет себя нелинейно, что характерно для пористых структур. Это свойство может быть использовано для демпфирования удара. Как и вспененные пластмассы, металлические пены обладают отличными энергоабсорбирующими свойствами, но на более высоком уровне прочности.

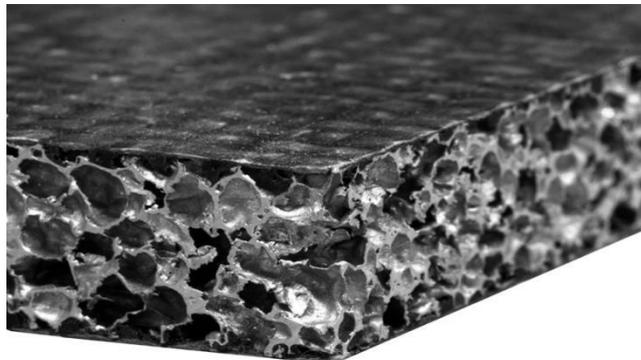


Рисунок 1 – Изделие из пеноалюминия

Среди преимуществ пеноалюминия, по сравнению с пластмассами, – негорючесть и рециклируемость, хорошая обрабатываемость пилением, сверлением, фрезерованием, обточкой. В отличие от ячеистых бетонов и древесностружечных плит у пеноалюминия низкая гигроскопичность (1 – 3 %), что обуславливает морозостойкость и отсутствие трещин при перепаде температур. Его не нужно пропитывать антисептиками и антипиренами. На его поверхность свободно наклеиваются различные декоративные материалы, он хорошо воспринимает краску.

Заметны преимущества пеноалюминия по шумоглушению при повышенных частотах (более 800 Гц).

Механические свойства пористого алюминия с открытыми порами менее изучены по сравнению с пеноалюминием с закрытыми порами. Акустические характеристики несколько хуже, чем у специальных шумогасящих материалов, однако пористый алюминий имеет много других технических свойств (негорючесть, высокая стойкость к температурным изменениям, негигроскопичность и др.), которые делают выгодным его применение для шумоглушения различных типов подвижного состава железнодорожного транспорта.

Пенометалл – ячеистая структура, состоящая из твердого металла и содержащая большое количество пор, заполненных газом. Основная характеристика пенометалла – очень высокая пористость: обычно поры составляют 75 – 95 % объема материала, они могут быть закрытыми (рисунок 2) или могут создавать систему сообщающихся пор.

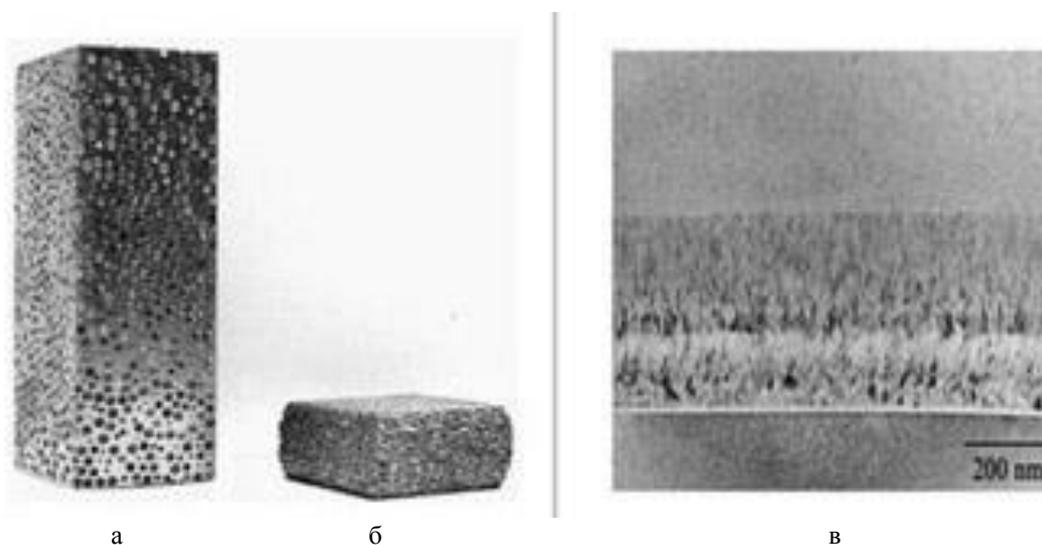


Рисунок 2 – Пенометалл с закрытыми порами

Пенометалл обычно сохраняет часть физических характеристик исходного материала: например, пенометалл, изготовленный из металла, будет негорючим. Пенометалл обычно можно переработать обратно в исходный металл. Степень термического расширения обычно сохраняется, а теплопроводность уменьшается. Используется пенометалл в качестве наполнителей (для обеспечения жесткости конструкции), а также как шумо-, вибро- и теплоизолирующий материал, как гаситель энергии удара, так как он имеет прочность, в несколько раз превышающую прочность обычного металла. Материал имеет низкую плотность и высокую прочность, что является значимым в вагоностроении.

Пенометалл с закрытыми порами в первую очередь используется как материал, поглощающий удар.

Для поглощения высокочастотных шумов применяют звукоизоляционные материалы, содержащие слой из вспененного мелкопористого пенополиэтилена (ППЭ) или пенополиуретана, который поглощает звуковые волны. Звукоизолирующие материалы монтируются, как правило, поверх виброизолирующих. Эффективность действия звукоизолирующих материалов во многом зависит от его толщины: чем толще материал, тем выше степень звукопоглощения.

В зависимости от технологии монтажа материалы для виброизоляции могут быть самоклеящимися (виброфильтр) или с нанесенным слоем термоадгезивного клея. Нанесение последних материалов на обрабатываемую поверхность является более трудоемким, так как производится только после нагревания промышленными фенами, поэтому многие специалисты предпочитают использовать материалы с самоклеящимся слоем.

Виброизолирующие материалы подавляют низкочастотные шумы (от 20 до 500 Гц). Выбор вибродемпфера во многом зависит от толщины покрытия, на которое он наносится.

Для получения высокого акустического качества звукоизоляционный материал, заполняющий внутреннее пространство перегородки, должен обладать соответствующими свойствами. Перегородки с одинаковой конструкцией, но заполненные разными материалами имеют разный индекс звукоизоляции, т. е. имеют разное акустическое качество.

Специалистами ООО «НТ», ООО «ЭПЦ «ЭкоСтройРесурс»», ИХР РАН, ФГУП ВНИИЖГ Роспотребнадзора разработан новый дублированный материал НО-Л-1А (Б), состоящий из нетканой подложки, на одной из сторон которой с помощью термостойкого

трудногорючего клея укреплена алюминиевая фольга [2]. Сверху на фольгу методом магнетронного распыления нанесен слой покрытия, выполненного из нержавеющей стали либо титана, хрома, никеля, нитрида титана или нитрида алюминия (рисунок 3).

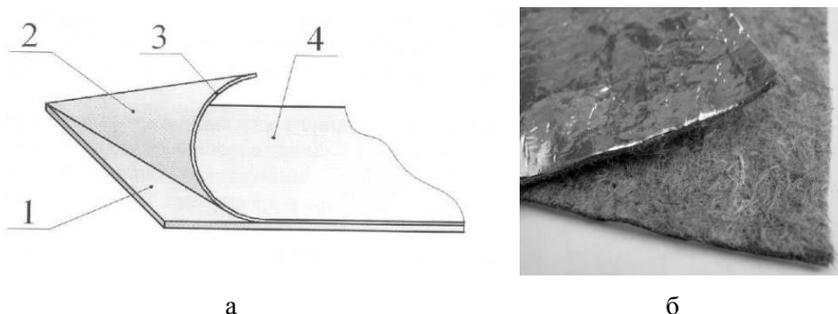


Рисунок 3 – Конструкция дублированного материала НО-Л-1А: а – схема; б – фотография (1 – подложка из нетканого материала; 2 – трудногорючий клей; 3 – алюминиевая фольга; 4 – слой защитного покрытия, нанесенный магнетронным распылением)

Проведена оценка звукопоглощающих свойств дублированного материала НО-Л-1А в сравнении с применяемым в последние годы для аналогичных задач материалом из арамидных волокон.

В качестве объектов исследования использовали два образца материала НО-Л-1А, различающиеся между собой поверхностной плотностью и толщиной (522 г/м<sup>2</sup> при толщине 3 мм и 390 г/м<sup>2</sup> при толщине 2 мм). Образец сравнения представлял собой нетканый материал из арамидных волокон толщиной 2 мм и поверхностной плотностью 300 г/м<sup>2</sup>.

Очевидно, что звукоизоляционные свойства дублированных материалов НО-Л-1А должны в значительной степени зависеть от размещения их фольгой либо подложкой по отношению к падающей звуковой волне. Интерес представляло исследование обоих вариантов.

При проведении эксперимента образцы закрепляли на жесткой стенке. Данные, представленные на рисунке 4, показывают, что коэффициенты звукопоглощения ( $\alpha$ ) дублированного материала НО-Л-1А (522 г/м<sup>2</sup>) и образца материала из арамидных волокон при размещении их на жесткой стенке волокнистым слоем к падающей звуковой волне в широком диапазоне частот схожи и весьма невысоки ( $\alpha = 0,2 - 0,3$ ). Это обусловлено тем, что поглощение энергии звуковых волн в данном случае происходит лишь за счет потерь в весьма тонком волокнистом слое.

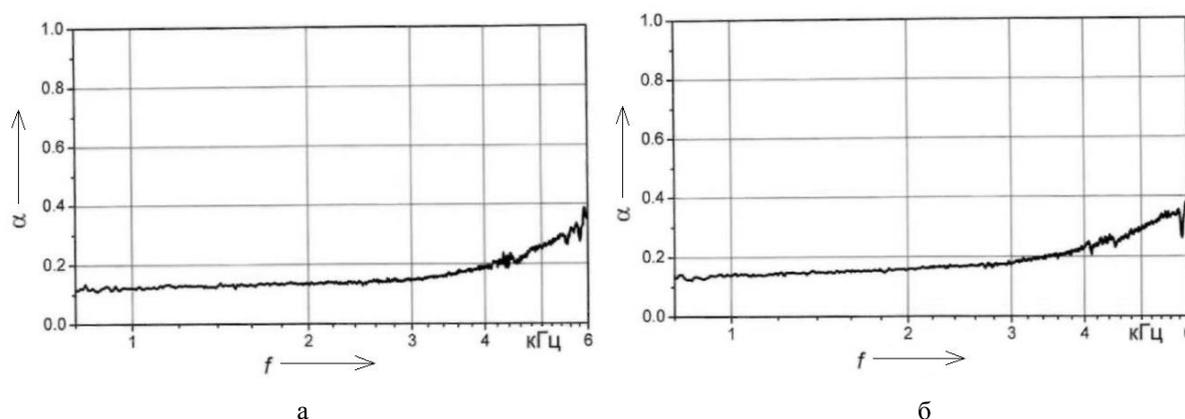


Рисунок 4 – Коэффициент звукопоглощения образцов, размещенных на жесткой стенке (материал НО-Л-1А ориентирован волокнистым слоем к падающей звуковой волне): а – НО-Л-1А (522 г/м<sup>2</sup>); б – материал из арамидных волокон

При размещении материала НО-Л-1А (522 г/м<sup>2</sup>) фольгой к падающей звуковой волне (при наличии воздушной полости) наблюдается значительное увеличение коэффициента звукопоглощения  $\alpha \geq 0,8$  до максимального значения  $\alpha_{\max} \approx 1$  в широком диапазоне частот  $f = 0,4 - 2$  кГц (рисунок 5).

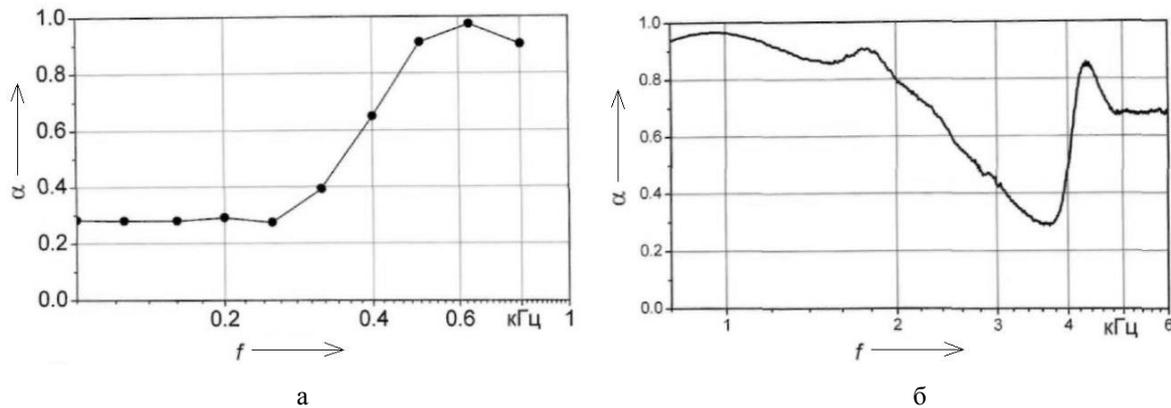


Рисунок 5 – Коэффициенты звукопоглощения материала НО-Л-1А (522 г/м<sup>2</sup>) при наличии за ним воздушной полости высотой  $h = 40$  мм (фольга направлена к падающей звуковой волне): а – диапазон частот 0,1 – 0,8 кГц; б – диапазон частот 0,8 – 6 кГц

По результатам данных исследований можно сделать вывод о том, что звукопоглощающие свойства дублированных материалов НО-Л-1А (Б) в значительной степени превосходят применяемые в настоящее время материалы из арамидных волокон.

Использование НО-Л-1А в конструкции воздухопроводов пассажирских вагонов локомотивной тяги позволяет значительно снизить уровень шума в помещениях и повысить экологические характеристики вагонов.

### Список литературы

- 1 СП 2.5.1198-03. Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте [Текст]. – М., 2003. – 60 с.
- 2 Пат. 83525 Российская Федерация, Е 04 В 1/74. Защитный трудногорючий экран [Текст] / Сачков О. В., Юдаева О. С.; заявитель и патентообладатель О. В. Сачков, О. С. Юдаева. – 2008151623/22; заявл. 26.12.2008; опубл. 10.06.2009.

### References

- 1 *Sanitarnye pravila po organizatsii passazhirskikh perevozok na zheleznodorozhnom transporte, SP 2.5.1198-03* (Health regulations on the organization of passenger traffic on railway transport). Moscow, 2003. – 60 p.
- 2 Sachkov O. V., Iudaeva O. S. *Patent RU 83525*, 10.06.2009.

УДК 629.4.027.52: 510.662: 510.56

И. И. Галиев, О. В. Гателюк, Д. Ю. Лукс

## ВНЕДРЕНИЕ КОЛЕС ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ – ОДИН ИЗ ИННОВАЦИОННЫХ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Выполнен анализ развития колес повышенной твердости на примере определенных заводоизготовителей, а также изменения нормативно-технической документации на изготовление (ГОСТ). Осуществлен математический анализ сравнения эксплуатации колесных пар обычной твердости с колесными парами повышенной твердости на основе поступления грузовых вагонов от момента производства до внепланового текущего ремонта. Для сравнения применялись методы Крамера – Уэлча и функция Лапласа. Произведена оценка среднего пробега вагонов на различных типах колесных пар грузовых вагонов и технологии производства. Сформулированы основные преимущества колесных пар повышенной твердости.

Увеличение количества современных моделей грузовых вагонов, применение новых материалов, деталей и узлов с улучшенными техническими характеристиками способствуют насыщению парка продукцией нового поколения, которая по технико-экономическим критериям превосходит предшествующие модели вагонов.

Основными целями внедрения новых вагонов являются следующие:

- удешевление тарифа на перевозку и ускорение доставки грузов,
- сокращение оборота вагонов в пути следования,
- повышение эффективности использования вагонного парка.

Одним из наиболее значимых факторов достижения указанных выше целей является внедрение колес с повышенной твердостью металла.

Актуальность работ по освоению цельнокатаных колес повышенной твердости обострилась в связи с резким ростом повреждаемости колес в эксплуатации, снижением их износостойкости и срока службы в 90-х гг. и в последующие годы (рисунок 1).

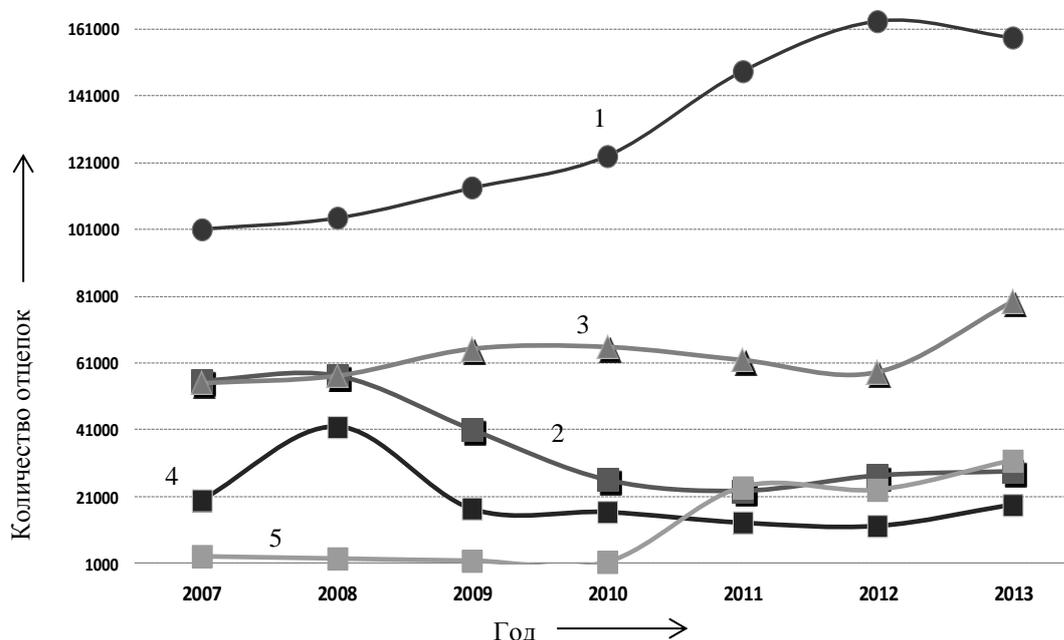


Рисунок 1 – Динамика отцепок неисправных грузовых вагонов за период 2007 – 2013 гг. по неисправности колесных пар: 1 – тонкий гребень; 2 – остроконечный накат; 3 – выщербины; 4 – ползун, навар; 5 – неравномерный прокат

Основным требованием при создании колес повышенной твердости является получение по всей глубине обода твердости на уровне НВ 320-360 при сохранении запаса вязкости и пластичности колесной стали.

В 1998 – 1999 гг. проведены эксплуатационные испытания цельнокатаных колес повышенной твердости на Восточно-Сибирской железной дороге. За этот период повреждений обода выщербинами браковочной величины не было.

Создание нового вида продукции потребовало глубокой модернизации существующего колесопрокатного производства, включающей в себя улучшение металлографического качества стали, совершенствование термической обработки, ужесточение правил приемки и методов контроля.

На ОАО «Выксунский металлургический завод» (далее – ОАО «ВМЗ») проведена коренная модернизация производства, опробованы различные технологические схемы, внедрены новые методики неразрушающего контроля и приемки.

На основе этого комплекса работ в 2003 г. разработаны технические условия ТУ 0943-157-01124328-2003. Цельнокатаные колеса повышенного качества и твердости.

В 2004 г. ОАО «ВМЗ» завершил освоение современной технологии выплавки стали с использованием установки «печь–ковш–вакууматор», что позволило приступить к массовому выпуску продукции. С этого года начат массовый выпуск колес с повышенной твердостью обода НВ 320-360 на глубине 30 мм от поверхности катания.

В 2003 г. ОАО «Российские железные дороги» (далее – ОАО «РЖД») с ЗАО «Объединенная металлургическая компания» (далее – ЗАО «ОМК»), в состав которой входит ОАО «ВМЗ», подписан долгосрочный контракт на поставку до 2010 г. 4,8 млн колес, в том числе новых колес с повышенной твердостью обода, разработанных совместно специалистами ОАО «ВМЗ» и ОАО «РЖД».

В 2010 г. между ОАО «РЖД» и ОАО «ВМЗ» были подписаны «Программа повышения качества и разработки новых видов продукции ОАО «ВМЗ» на 2010 – 2015 гг.» и «Соглашение о стратегическом партнерстве между ОАО «РЖД» и ОАО «ВМЗ» в области качества». Целью Соглашения является постоянное улучшение качества продукции, достижение высокой надежности, снижение удельных показателей стоимости жизненного цикла поставляемой продукции.

В настоящее время выпуск колес повышенной твердости освоили ОАО «Нижнеднепровский трубопрокатный завод» (далее – ОАО «НТЗ») с 2006 г. и ОАО «Нижне-Тагильский металлургический комбинат» (далее – ОАО «НТМК») с 2009 г.

Итогом работ по внедрению колес повышенной твердости стала разработка нескольких технических условий на их изготовление: ТУ 0943-157-01124328-2003. Цельнокатаные колеса повышенного качества и твердости – ОАО «ВМЗ», ТУ 35.2-23365425-607:2006. Колеса цельнокатаные с повышенной твердостью обода для грузовых вагонов – ОАО «НТЗ» и ТУ 0943-209-01124323-2005. – Колеса цельнокатаные повышенной твердости. Опытная партия – ОАО «НТМК».

С 2012 г. вступили в действие новые ГОСТы 10791-2011 взамен ГОСТ 9036-88 и ГОСТ 10791-2004. В новые ГОСТы вошли требования к конструкции колес с криволинейной формой диска, а также требования к изготовлению колес повышенных качества и твердости.

По итогам проведенных работ сформировалось несколько приоритетных направлений в области технологии изготовления цельнокатаных колес:

создание колес из стали новых марок с повышенной стойкостью к повреждениям тормозного происхождения;

разработка высокопрочных колес для грузовых вагонов нового поколения с нагрузками от колесной пары на рельсы до 30 тс;

создание колес для высокоскоростного подвижного состава.

Авторами был проведен выборочный статистический анализ поступления грузовых вагонов в текущий отцепочный ремонт в период от изготовления до первого деповского ремонта. Для этого случайным образом были взяты две выборки из статистических данных ОАО «РЖД» по неисправности колесных пар. Из данных за 2005 г. было выбрано 264 случая, а за 2013 г. – 275 случаев, и для них вычислили основные параметры. Средний пробег вагонов выборки за 2005 г. составлял 63591 км, а за 2013 г. – 77263 км. Для выборки 2005 г. среднее квадратическое отклонение составило 30493 км, а для выборки 2013 г. – 38173 км. Проверка статистической гипотезы о нормальном распределении генеральной совокупности с помощью критерия Пирсона  $\chi^2$  на уровне значимости 0,05 показала, что если для выборки 2005 г. оно близко к нормальному ( $\chi^2_{\text{набл}} = 12,76$ , а  $\chi^2_{\text{крит}} = 14,07$ ), то для выборки 2013 г. она отвергается ( $\chi^2_{\text{набл}} = 50,2$ ,  $\chi^2_{\text{крит}} = 14,07$ ). Последний результат показывает, что выборка 2013 года неоднородна, что объясняется наличием в ней как обычных колес, так и колес повышенной твердости. На рисунке 2 приведено сравнение эмпирических частот пробегов до обточки с нормальным распределением для выборки 2013 г. Было проведено сравнение эмпирических частот для всех значений пробегов до обточки 2005 и 2012 гг. (рисунок 3).

На основании этих данных можно проверить нулевую статистическую гипотезу о равенстве средних значений двух данных выборок. Если эта гипотеза будет отвергнута, то,

учитывая, что среднее значение пробега до неисправности колесных пар для выборки 2013 г. больше, можно сделать однозначный вывод о реальной пользе колесных пар повышенной твердости в эксплуатации.

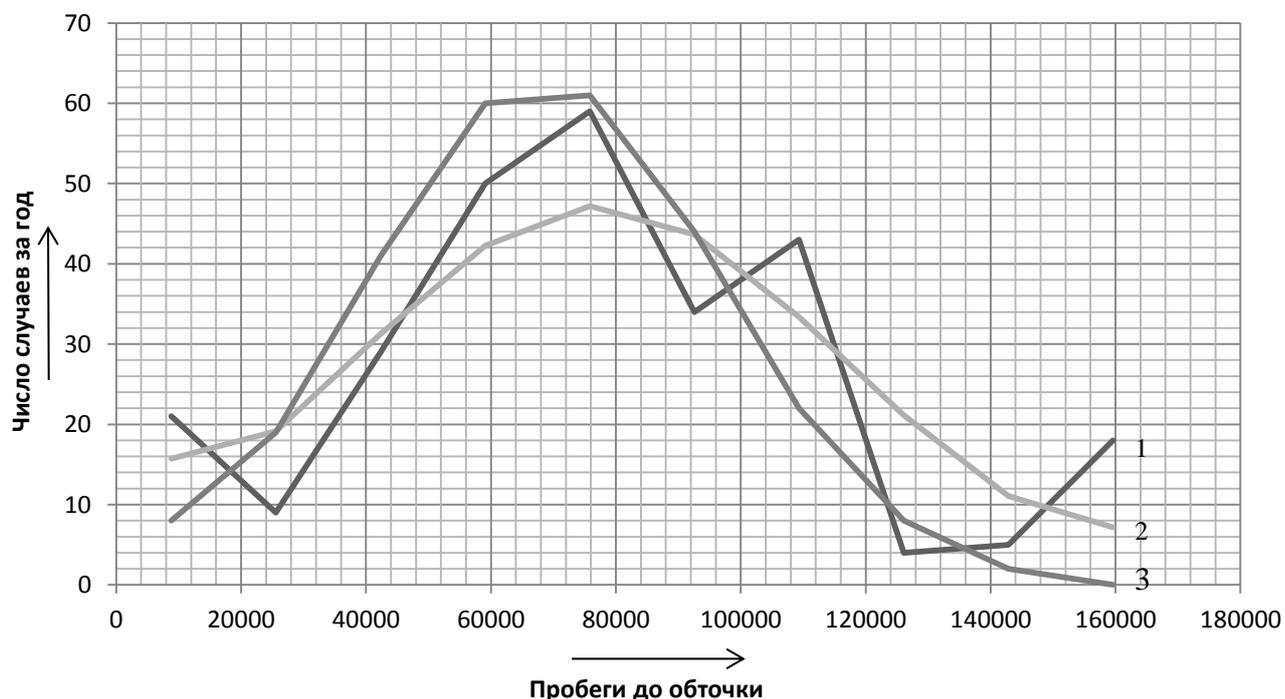


Рисунок 2 – Распределение пробегов до обточки в 2005 и 2013 гг. (значение пробегов до обточки 2013 г. – 1; нормальное распределение – 2; значения пробегов до обточки 2005 г. – 3)

Поскольку, как показано выше, одна из генеральных совокупностей не подчиняется нормальному распределению, то для проверки нулевой статистической гипотезы о равенстве средних значений двух данных выборок воспользуемся критерием Крамера – Уэлча. При использовании этого критерия не предполагается, что генеральная совокупность имеет нормальное распределение [1].

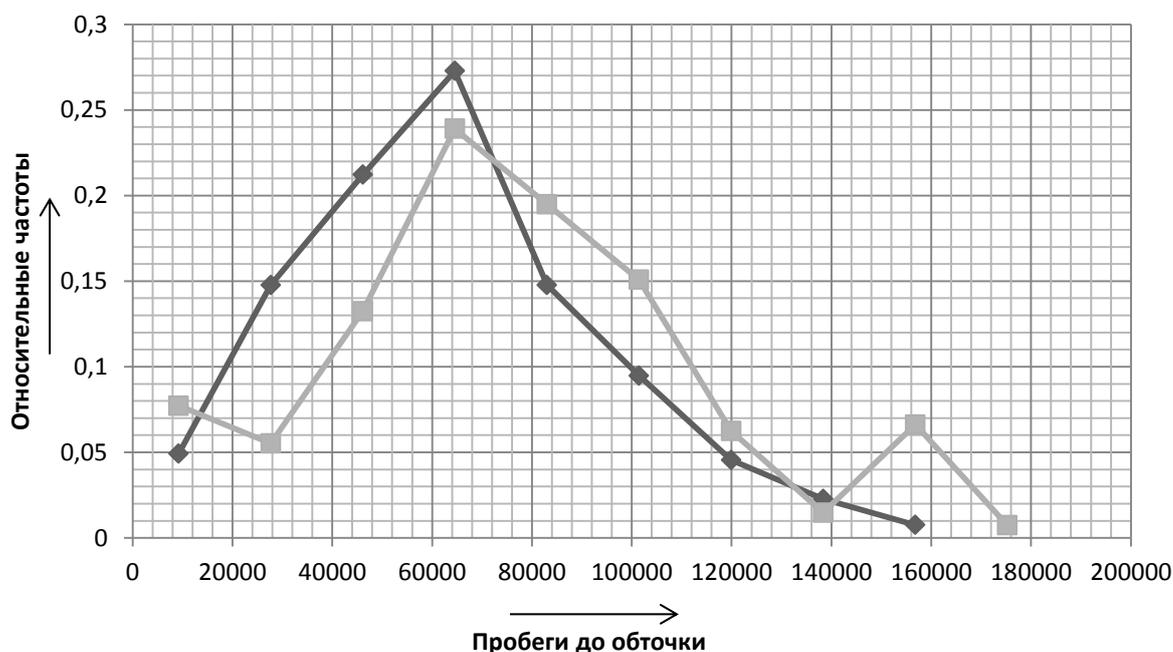


Рисунок 3 – Распределение пробегов до обточки в 2005 и 2012 гг. (наблюдаемые частоты в 2005 г. – 1; в 2013 г. – 2)

Данный критерий основан на статистических материалах и представляется в виде:

$$T_{\text{набл}}^* = \frac{\sqrt{mn}(\bar{x} - \bar{y})}{\sqrt{ns_x^2 + ms_y^2}}, \quad (1)$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – выборочные средние;  $s_x$  и  $s_y$  – выборочные средние квадратические отклонения; а  $m$  и  $n$  – объемы соответствующих выборок.

Задав уровень значимости  $\alpha$ , сравниваем модуль найденного значения статистики  $|T_{\text{набл}}^*|$  с критической точкой  $T_{\text{кр}}^*$ , которую находим из соотношения:

$$\Phi(T_{\text{кр}}^*) = \frac{1-\alpha}{2}, \quad (2)$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – функция Лапласа.

Если  $|T_{\text{набл}}^*| < T_{\text{кр}}^*$ , то нет оснований отвергнуть гипотезу о равенстве математических ожиданий, в противном случае  $|T_{\text{набл}}^*| \geq T_{\text{кр}}^*$ , нулевая гипотеза отвергается. В нашем случае  $T_{\text{набл}}^* = 4,6$  а при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  получаем  $T_{\text{кр}}^* = 1,96$ , т. е.  $|T_{\text{набл}}^*| \geq T_{\text{кр}}^*$ , поэтому нулевая гипотеза отвергается и можно сделать вывод о том, что средние значения выборок различаются значимо.

Результаты эксплуатации на сети железных дорог колес повышенной твердости подтверждают их преимущество перед стандартными колесами. Сравнение числа отцепок вагонов, приведенных к одной тысяче вагонов, поступивших за один и тот же период в текущий отцепочный ремонт по неисправностям колесных пар на стандартных колесах и колесах повышенной твердости, свидетельствует о том, что стойкость к износу поверхности катания колеса повышенной твердости, гребня и к дефектам тормозного происхождения (ползунам и наварам) более чем в два раза выше в сравнении со стандартными колесами (рисунок 4). Таким образом, создана новая технологическая цепочка в процессе производства новых колес (рисунок 5).

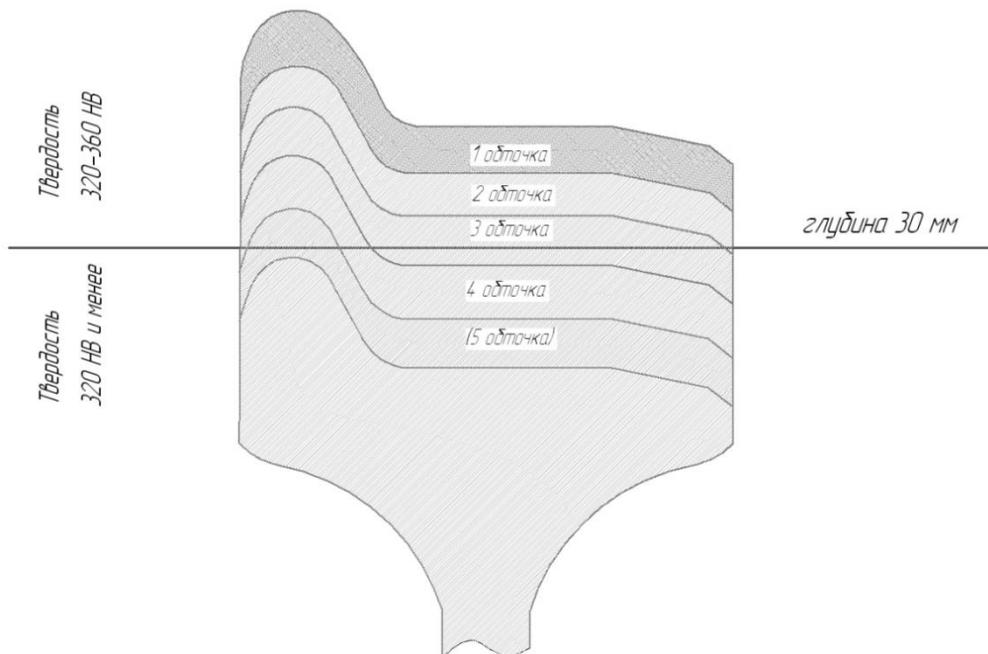


Рисунок 4 – Изменение параметров цельнокатаного колеса в эксплуатации

По результатам проведенных исследований и анализа эксплуатации колес повышенных качества и твердости на сети железных дорог установлены

повышенные прочностные свойства обода ( $\sigma_b = 104 - 120$  кгс/мм, НВ 320 – 360 в сочетании с достаточной пластичностью и вязкостью, полученные за счет повышения содержания углерода, микролегирования и применения новых режимов термической обработки);

высокая металлургическая чистота стали по газонасыщенности и содержанию неметаллических включений за счет оптимизации технологий выплавки и внедрения внепечной обработки;

более жесткие требования приемочного контроля;

увеличение срока службы (с 5 – 7 до 10 – 12 лет) цельнокатаных колес более чем в 1,5 раза в сравнении с колесами по ГОСТ 10791-2004. Средний пробег колесной пары с колесами повышенной твердости до первой обточки по данным главного вычислительного центра ОАО «РЖД» составляет 279,7 тыс. км (стандартные колеса – 106,3 тыс. км);

повышение износостойкости гребня колеса более чем в три раза.

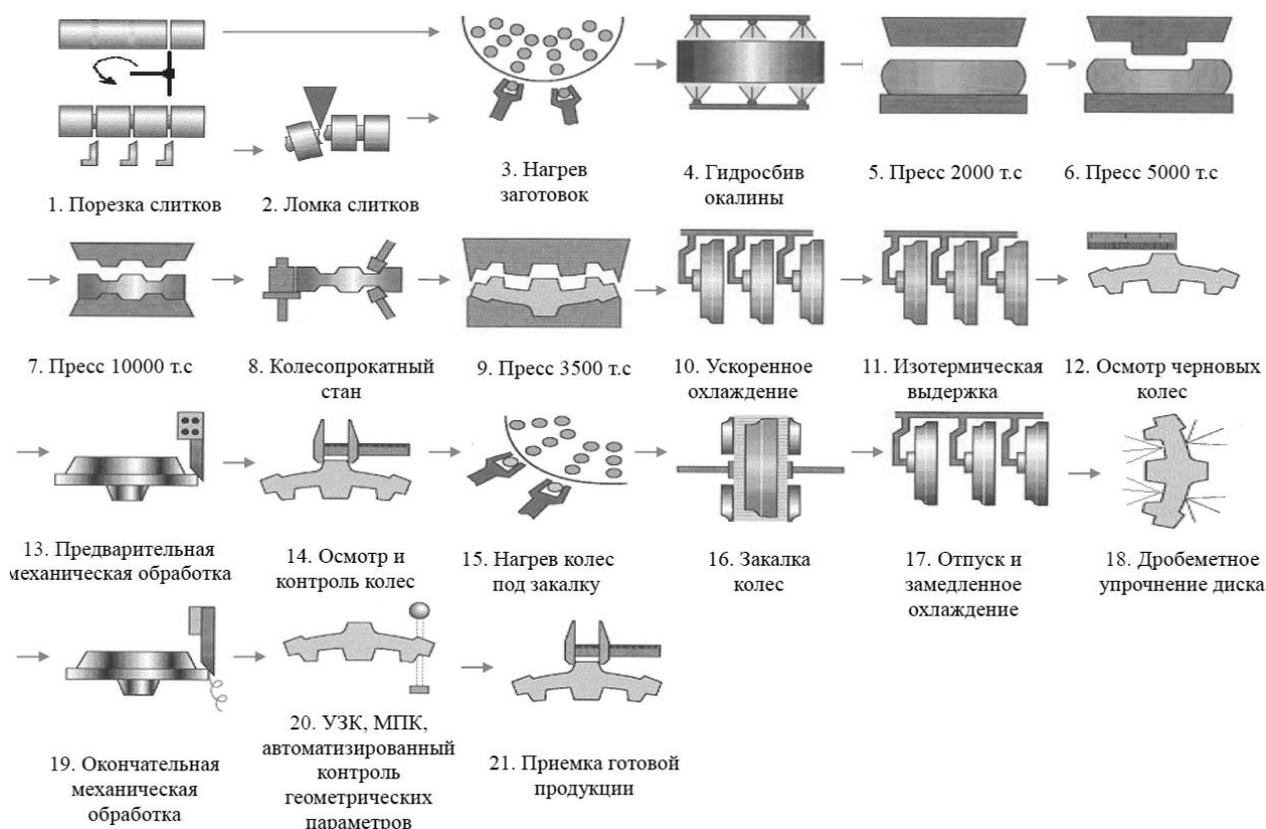


Рисунок 5 – Технологическая схема производства колес (на примере ОАО «Выксунский металлургический завод»)

Повышение твердости поверхности катания вагонных колес гарантирует достижение представленных результатов. Вместе с тем, нарушение оптимального соотношения твердостей контактирующих поверхностей (колеса и рельса) неукоснительно приведет в данном случае к повышению износа поверхностей рельсов. Этот факт требует проведения экономических расчетов целесообразности принятия окончательного решения по широкому распространению такого подхода.

### Список литературы

1. Орлов, А. И. Эконометрика: Учебное пособие [Текст] / А. И. Орлов – М.: Экзамен, 2002. – 576 с.
2. Гмурман, В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учебное пособие [Текст] / В. Е. Гмурман – М.: Высшее образование, 2008. – 404 с.

3. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

## References

1. Orlov A. I. *Jekonometrika: Uchebnoe posobie dlja vuzov* (Econometrics: A manual for schools). Moscow: Jekzamen, 2002, 576 p.

2. Gmurman V. E. *Rukovodstvo k resheniju zadach po teorii verojatnostej i matematicheskoj statistike: Ucheb.posobie* (Guide to solving problems in the theory of probability and mathematical statistics: Textbook). M.: Vysshee obrazovanie, 2008, 404 p.

3. Kobzar' A. I. *Prikladnaja matematicheskaja statistika. Dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov* (Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists). M.: Fizmatlit, 2006, 816 p.

УДК 621.311.001.57

А. А. Комяков, М. М. Никифоров, В. В. Эрбес

## О ПОДХОДАХ К ОЦЕНКЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ, ДОСТИГАЕМОЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСЕРВИСНЫХ ДОГОВОРОВ

*В работе предложен подход к оценке фактической экономии энергетических ресурсов, достигаемой при реализации энергосервисных договоров, основанный на разработке математической модели электропотребления, учитывающей влияние производственных и климатических факторов. Рассмотрен пример расчета фактической эффективности внедрения энергосберегающего устройства на Свердловской железной дороге.*

В соответствии с действующим Федеральным законом РФ от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» одним из путей снижения энергоёмкости производственного процесса является заключение энергосервисных договоров (контрактов). На железнодорожном транспорте определен и внедряется перечень направлений реализации требований данного Закона, таких как учет используемых энергетических ресурсов; соблюдение требований к энергетической эффективности зданий, строений, сооружений; проведение обязательного энергетического обследования; внедрение системы контроля отнесения расхода энергоресурсов по видам деятельности и статьям затрат [1]. Однако энергосервисные контракты в ОАО «Российские железные дороги» до настоящего времени широкого распространения не получили. Одной из основных причин этого является сложность при проведении оценки фактически получаемого ОАО «Российские железные дороги» эффекта от внедрения энергосберегающих технологий при реализации энергосервисных контрактов.

Энергосервисный контракт, или перфоманс-контракт, – это особая форма договора, которая дает возможность заказчику внедрить на своем объекте энергосберегающие технологии, не расходуя предварительно свой капитал, а оплачивая его периодически по частям за счет экономии на энергоресурсах, возникающей после внедрения данных технологий [2, 3].

В зависимости от источника финансирования и способа определения стоимости договора различают несколько видов энергосервисных контрактов. В РФ одним из наиболее перспективных является договор на комплекс энергосервисных услуг с разделением экономии. В рамках этих договоров финансирование энергосберегающих мероприятий осуществляется за счет энергосервисных компаний. При этом в контракте указывается, в каких долях делятся сэкономленные средства между заказчиком и энергосервисной компанией в соответствующий период времени. В основном такие контракты заключаются на срок не более 10 лет.

Цель такого контракта состоит в том, чтобы энергосервисная компания компенсировала все свои затраты и получила необходимую прибыль в течение срока реализации этого проек-

та. Собственник объекта не делает никаких инвестиций в проект, но в то же время получает свою долю от экономии в течение контрактного периода и всю экономию по его завершении [4].

Одним из факторов, ограничивающих применение энергосервисных контрактов в РФ, является отсутствие единой методики оценки энергоэффективности проекта. Рассмотрим пути решения этой проблемы на примере энергосберегающих технологий, направленных на снижение расхода электрической энергии.

Для объектов со стабильной нагрузкой широко применяется способ определения фактической экономии электрической энергии, при котором снижение расхода электрической энергии определяется как разница между расходом электрической энергии до внедрения энергосберегающего устройства ( $W_1$ ) и после его внедрения ( $W_2$ ) за соответствующий период [5 – 7]:

$$\Delta W = W_1 - W_2. \quad (1)$$

Недостатком такого способа является то, что он не учитывает изменение производственных, климатических и иных факторов, оказывающих влияние на объем электропотребления.

Известен способ сопоставления удельных расходов электрической энергии в расчете на единицу производственной деятельности того или иного объекта до ( $w_1$ ) и после внедрения ( $w_2$ ) энергосберегающего устройства:

$$\Delta W = (w_1 - w_2) V_2, \quad (2)$$

где  $V_2$  – объем производственной деятельности объекта после внедрения энергосберегающего мероприятия.

Такой подход применен в «Методике расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях», утвержденной приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 07.06.2010 № 273. Недостатком такого способа является то, что при расчете удельного расхода электрической энергии рассматривается влияние только производственной деятельности объекта, а остальные факторы не учитываются.

Сущность предлагаемого способа определения фактической экономии электрической энергии заключается в разработке математической модели электропотребления объекта, на котором внедрено энергосберегающее устройство, на основе предварительной информации о расходе электроэнергии и влияющих факторах до внедрения энергосберегающего мероприятия и последующем сравнении смоделированного электропотребления с фактическим после внедрения энергосберегающего устройства. Близкая по сути идеология в настоящее время используется в ОАО «Российские железные дороги» при осуществлении планирования электропотребления на нетяговые нужды его структурных подразделений [8, 9].

Порядок оценки фактической экономии электрической энергии иллюстрируется структурной схемой, приведенной на рисунке 1.

Пусть энергосберегающие устройства 2 подключаются к питающей линии между источником электропитания 1 и потребителями 4. Для оценки фактической экономии электрической энергии устанавливаются приборы учета электрической энергии 3. При необходимости фиксируются показатели качества электрической энергии.

На первом этапе оценки фактической экономии электрической энергии производится выделение отдельных потребителей 4 в зависимости от характера их производственной деятельности. Например, в составе вагонного депо выделяется цех по ремонту вагонов, административный корпус, гараж и т. п. Каждый из потребителей при этом должен быть оборудован собственным прибором учета электрической энергии.

На втором этапе осуществляется сбор данных о расходе электрической энергии и влияющих производственных факторах 5 по каждому выбранному потребителю до внедрения энергосберегающего устройства. К производственным факторам относятся объем выполнен-

ной работы, состав и режим работы оборудования. Дополнительно собирается информация о климатических факторах (например, температура воздуха и продолжительность светового дня) в блоке 7.

На третьем этапе осуществляется анализ влияния принятых к рассмотрению производственных и климатических факторов 6 на уровень потребления электрической энергии до внедрения энергосберегающего устройства. Степень влияния определяется с помощью коэффициентов корреляции:

$$r_{Wx} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})(x_i - \bar{x})}{\sigma_W \cdot \sigma_x (n-1)}, \quad (3)$$

где  $W_i, x_i$  –  $i$ -е значение расхода электроэнергии и влияющего фактора  $x$ ;

$\bar{W}, \bar{x}$  – средние значения расхода электроэнергии и влияющего фактора  $x$  для рассматриваемой выборки;

$n$  – объем выборки;

$\sigma_W, \sigma_x$  – средние квадратические отклонения расхода электроэнергии и влияющего фактора  $x$ , которые определяются выражением:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_W = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2}{n-1}}; \\ \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \end{array} \right. \quad (4)$$

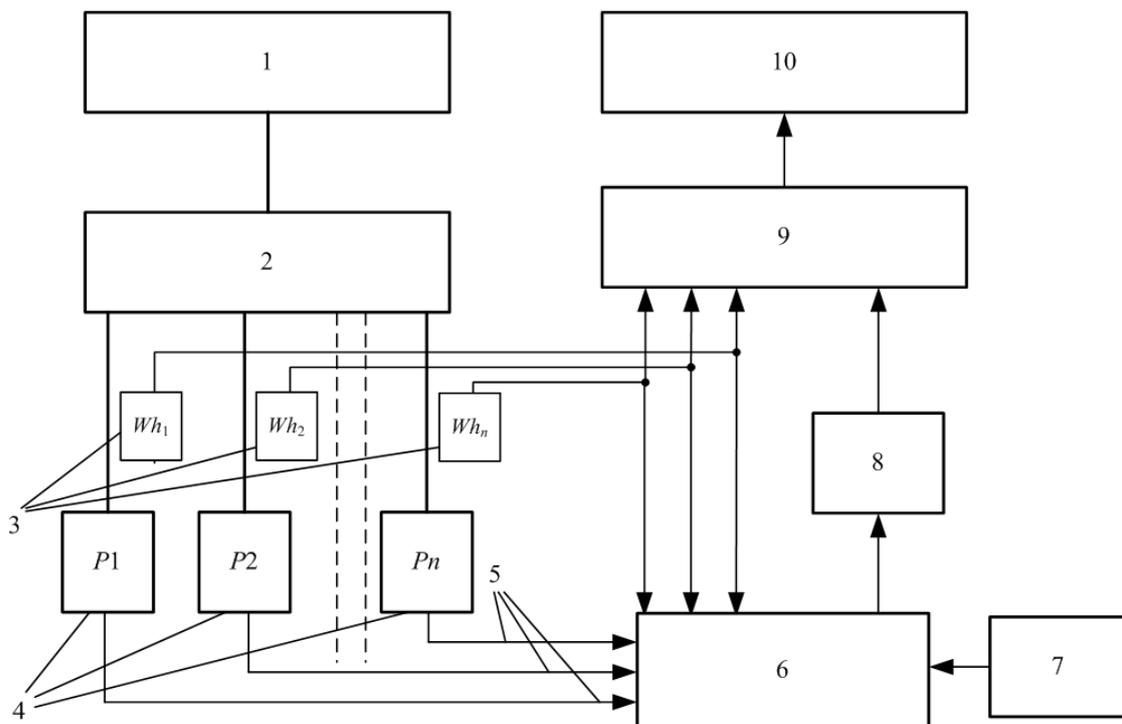


Рисунок 1 – Порядок оценки фактической экономии электрической энергии

На рисунке 1 обозначено: 1 – источник электропитания; 2 – энергосберегающее устройство; 3 – счетчики учета электрической энергии; 4 – потребители различного производственного назначения; 5 – учет производственных факторов; 6 – юлок анализа степени влияния производственных и климатических факторов на расход электрической энергии; 7 – блок учета влияния климатических факторов; 8 – блок формирования математической модели электропотребления; 9 – блок определения энергетической эффективности; 10 – результат оценки эффективности энергосберегающего устройства.

Для оценки значимости полученных коэффициентов корреляции вычисляется наблюдаемое значение критерия

$$T_{\text{набл}} = r_{wx} \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{wx}^2}} \quad (5)$$

и по таблице критических точек распределения Стьюдента для заданного уровня значимости и числа степеней свободы  $k = n - 2$  определяется критическое значение  $t_{\text{кр}}$  [10].

Рассчитанные значения коэффициентов корреляции считаются значимыми при выполнении неравенства:

$$|T_{\text{набл}}| > t_{\text{кр}}. \quad (6)$$

На четвертом этапе формируется математическая модель процесса электропотребления в блоке 8. В случае, если зависимости между расходом электрической энергии и влияющими факторами нелинейны, а сами факторы являются взаимосвязанными друг с другом, возможно использование математического аппарата искусственных нейронных сетей. В этом случае процесс формирования математической модели электропотребления включает в себя следующие основные этапы: формирование выборки исходных данных, разделение выборки на обучающую и тестовую, обучение нейронной сети методом обратного распространения ошибки и тестирование нейросетевой модели [11].

В случае линейной зависимости между расходом электрической энергии и влияющими факторами целесообразно использовать регрессионную модель. Уравнение регрессии может дать хороший результат, если воздействием других факторов, влияющих на процесс электропотребления, можно пренебречь. Построение регрессионной модели включает в себя формирование выборки исходных данных, оценку параметров уравнения регрессии, построение системы нормальных уравнений и ее решение. В зависимости от количества влияющих факторов моделируется парная или множественная регрессия. Основная цель множественной регрессии – построить модель с минимально возможным числом факторов, определив при этом влияние каждого из них в отдельности и их совокупное воздействие на моделируемый процесс электропотребления.

Количество нейросетевых или регрессионных моделей зависит от числа потребителей, разделенных по характеру производственной деятельности. Для каждого потребителя формируется отдельная нейросетевая или регрессионная модель.

Пятый этап подразумевает сбор информации о фактическом расходе электроэнергии, производственных и климатических факторах за расчетный период данных после внедрения энергосберегающего устройства. С помощью ранее сформированной нейросетевой или регрессионной модели рассчитывается расход электрической энергии. В блоке 9 осуществляется сравнение фактического и смоделированного расхода электрической энергии по каждому потребителю:

$$\Delta W_i' = W_i^{\text{мод}} - W_i^{\text{факт}}, \quad (7)$$

где  $W_i^{\text{факт}}$ ,  $W_i^{\text{мод}}$  – фактический и смоделированный расход электрической энергии за единицу времени.

Экономия электроэнергии за рассматриваемый период времени по каждому потребителю определяется в абсолютном и относительном выражении в блоке 10 по формулам:

$$\Delta W' = \sum_{i=1}^n \Delta W_i'; \quad (8)$$

$$\delta W' = \frac{\Delta W'}{\sum_{i=1}^n W_i^{\text{мод}}} \cdot 100 \% . \quad (9)$$

Результирующая экономия электрической энергии в целом по объекту определяется как суммарная экономия по всем потребителям и позволяет сделать вывод о целесообразности использования энергосберегающего устройства на рассматриваемом объекте.

Предложенный подход был использован при оценке эффективности внедрения энерго-сберегающей системы на распределительной подстанции (РП) депо Свердловской железной дороги.

На первом этапе обследования было определено, что от РП депо по линиям 6 кВ получают питание четыре трансформаторные подстанции 6/0,4 кВ, имеющие различный состав потребителей, существенно отличающийся по характеру нагрузки [12]. Наиболее сложный состав потребителей получает питание от РП-449, нагрузкой которой являются компрессорная, пескосушилка, освещение, пост ЭЦ и экипировка локомотивного депо. Остальные потребители – трансформаторные подстанции ТП-4611, ТП-4659 и ТП-4748 – питают электромашинный цех, цеха ТР-3 и ТР-1 и испытательную станцию локомотивного депо соответственно. По каждой группе потребителей был произведен суточный сбор данных расхода электрической энергии, производственных и климатических факторов за период с 01.05.2013 по 30.09.2013 до внедрения энергосберегающего устройства.

На втором этапе был выполнен анализ каждой группы потребителей и определено влияние производственных и климатических факторов на уровень потребления электроэнергии. Обработка данных по ТП-4611, питающей электромашинный цех, показала, что наблюдается существенная зависимость между электропотреблением и выполненным объемом работ (коэффициент корреляции 0,5), а также присутствует зависимость между электропотреблением и продолжительностью светового дня (коэффициент корреляции 0,4).

Анализ производственных и климатических факторов на ТП-4659 и ТП-4748 показал, что расход электрической энергии достаточно стабильный, влияние объема выполненных работ и продолжительности светового дня на расход электроэнергии оценивается коэффициентами корреляции, находящимися в пределах от 0,33 до 0,36.

По всем трем группам потребителей (ТП-4611, ТП-4659 и ТП-4748) влияние температуры воздуха на расход электрической энергии незначительное, а коэффициенты корреляции не превышают 0,13.

В нагрузку потребителя РП-449 входит экипировка, расход электроэнергии которой является стабильным во времени. Влияние внешних факторов незначительно, поэтому для данного объекта расход электрической энергии принят постоянным и равным среднему за период исследования значению. Оставшаяся нагрузка потребителя РП-449 имеет различную хозяйственную принадлежность, но наблюдается значительная зависимость расхода электроэнергии от температуры воздуха (коэффициент корреляции 0,77).

С учетом анализа влияния факторов на процесс потребления электрической энергии разработана математическая модель, которая включает в себя четыре уравнения регрессии.

1. Зависимость суточного расхода электрической энергии по ТП-4611 (электромашинный цех) от продолжительности светового дня  $L_{\text{св}}$  и количества отремонтированных тяговых двигателей  $V$ :

$$W = 4127,5 - 0,03L_{\text{св}} + 64,4V. \quad (10)$$

2. Зависимость суточного расхода электрической энергии по ТП-4659 (цех ТР-1) от продолжительности светового дня  $L_{\text{св}}$  и объема ремонта локомотивов ТР-1  $V$ :

$$W = 2241,2 - 0,01L_{\text{св}} + 0,006V. \quad (11)$$

3. Зависимость суточного расхода электрической энергии по ТП-4748 (цех ТР-3) от продолжительности светового дня  $L_{\text{св}}$  и объема ремонта локомотивов ТР-3  $V$ :

$$W = 1176,9 - 0,007L_{\text{св}} + 0,002V. \quad (12)$$

4. Зависимость суточного расхода электрической энергии по РП-449 (компрессорная, пескосушилка, освещение и пост ЭЦ) от температуры воздуха  $t$ :

$$W = -33,64t + 1316. \quad (13)$$

Сравнение фактического и смоделированного расхода электрической энергии до внедрения энергосберегающего устройства (рисунок 2) показывает, что математическая модель достаточно адекватно позволяет оценить влияние принятых к рассмотрению факторов на расход электрической энергии. Качество модели можно оценить путем расчета средней относительной погрешности  $MAPE$  [13]:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{W_{\text{факт}} - W_{\text{мод}}}{W_{\text{факт}}}, \quad (14)$$

где  $W_{\text{факт}}$  – фактический расход электрической энергии;

$W_{\text{мод}}$  – расход электрической энергии, спрогнозированный моделью при том же наборе влияющих факторов.

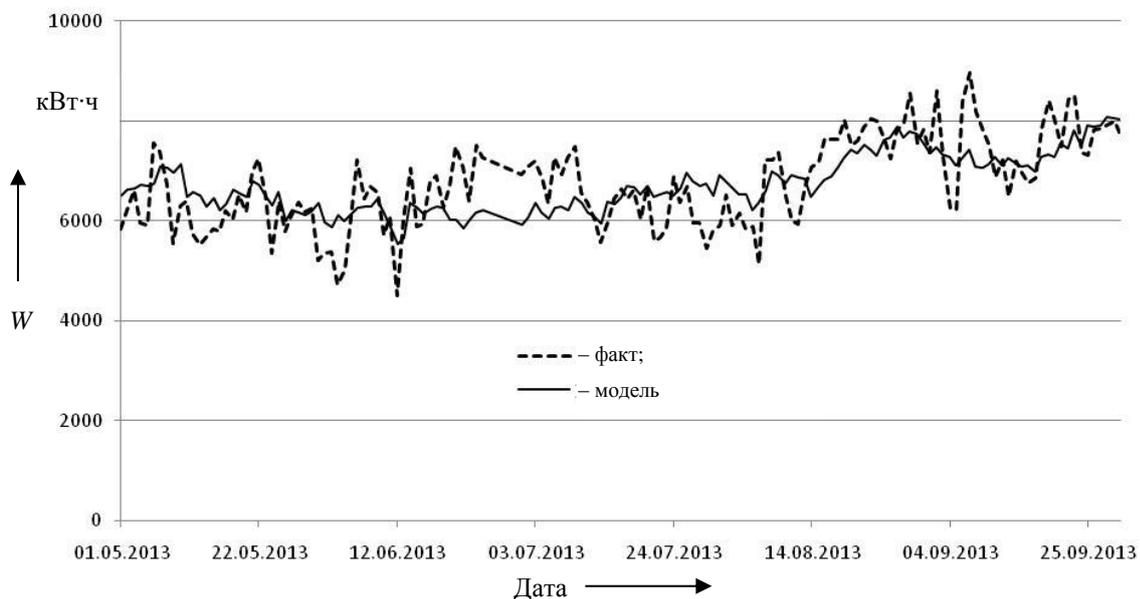


Рисунок 2 – Динамика фактического и смоделированного расхода электрической энергии по РП Депо до внедрения энергосберегающей системы

Для разработанной математической модели погрешность  $MAPE$  не превышает 2,5 %, что позволяет говорить о достаточной ее адекватности.

Для оценки фактической эффективности энергосберегающей системы за октябрь 2013 г. осуществлялся ежесуточный сбор данных о фактическом расходе электроэнергии, объеме ремонта локомотивов, температуре воздуха и продолжительности дня после внедрения. По

полученным данным производственных и климатических факторов с помощью математической модели был рассчитан расход электроэнергии, который сравнивался с фактическим расходом (рисунок 3).

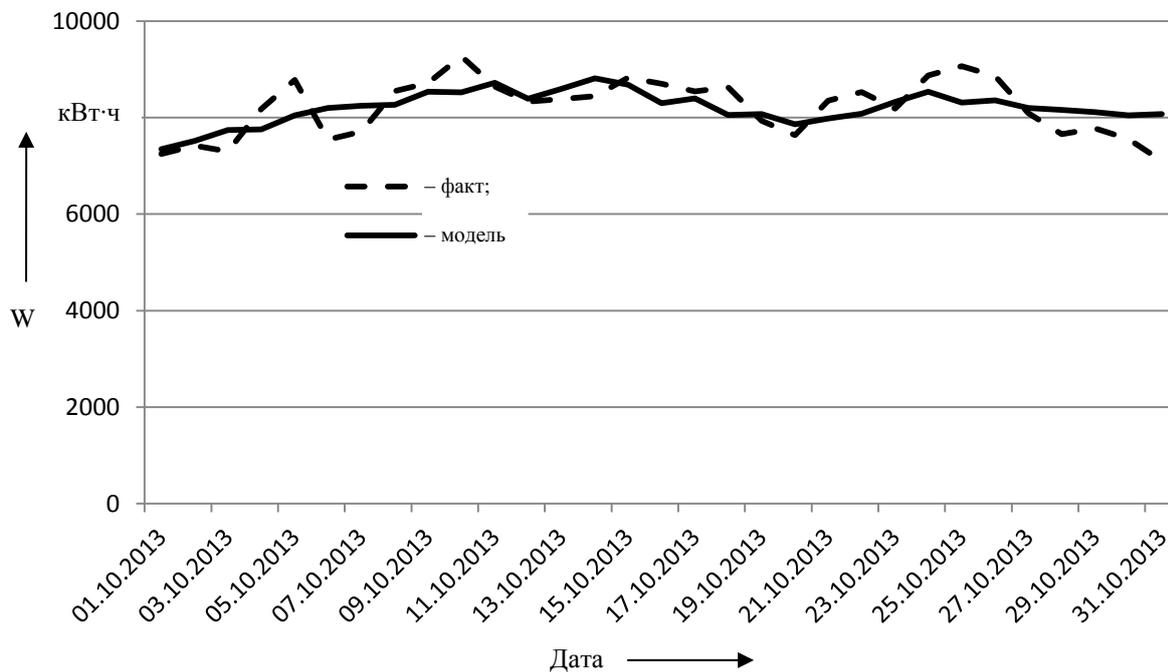


Рисунок 3 – Динамика фактического и смоделированного расхода электрической энергии по РП Депо после внедрения энергосберегающей системы

В целом за рассматриваемый период с 01.10.2013 по 31.10.2013 г. снижение расхода электрической энергии в результате внедрения энергосберегающей системы на РП Депо, рассчитанное с помощью регрессионной модели, составляет 777 кВт·ч, или 0,3 % от общего расхода электрической энергии, и в данном случае эффективность рассматриваемого энергосберегающего устройства подтверждена не была. В случае, если бы был применен способ, основанный на прямом сравнении расхода электрической энергии после внедрения энергосберегающего устройства с электропотреблением за аналогичный период предыдущего года (октябрь 2012 г.) без сопоставления внешних условий, то эффективность была бы определена на уровне 47185 кВт·ч, или 15,6 %, что могло привести к ошибочному заключению об эффективности внедренного энергосберегающего устройства.

Таким образом, использование предлагаемых математических моделей, основанных на оценке влияния производственных и климатических факторов, позволяет объективно оценить технико-экономический эффект, достигаемый в результате внедрения энергосберегающих устройств, при этом адекватность рассматриваемых моделей подтверждена на действующем объекте Свердловской железной дороги. Следовательно, предлагаемый подход может быть применен для определения фактической экономии энергоресурсов, достигаемой при реализации энергосервисных договоров, а учет влияния производственных и климатических факторов позволит застраховать заказчика энергосервисного договора от убытков.

### Список литературы

1. Черемисин, В. Т. Основные направления реализации Федерального закона № 261-ФЗ от 23.11.09 «Об энергосбережении...» в холдинге «Российские железные дороги» [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 2. – С. 119 – 123.

2. Крахмалев, Е. И. Энергосервис в системах уличного освещения: технико-экономические аспекты [Текст] / Е. И. Крахмалев // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника / Южно-Уральский гос. ун-т. – Екатеринбург. – 2012. – № 35. – С. 150 – 153.
3. Бойкова, Н. А. Перфоманс-контракт и перспективы энергосервиса в России [Текст] / Н. А. Бойкова // Современная научная мысль. – 2013. – № 4. – С. 196 – 200.
4. Антонычев, С. В. Энергосервис, проблемы и позитивные примеры [Текст] / С. В. Антонычев // Энергосбережение. – 2012. – №7. – С. 33 – 39.
5. Горевой, И. М. Применение энергосберегающих технологий на железнодорожном транспорте [Текст] / И. М. Горевой // Проблемы безопасности российского общества. – 2013. – № 2/3. – С. 65 – 75.
6. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях рекуперации электроподвижного состава [Текст] / В. Т. Черемисин, А. С. Вильгельм и др. // Локомотив. – 2013. – № 8. – С. 5 – 8.
7. Тульчинская, Я. И. Методика оценки эффективности замены светильников и ламп на энергосберегающие [Текст] / Я. И. Тульчинская // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 4. – С. 570 – 588.
8. Никифоров, М. М. Методика планирования электропотребления на нетяговые нужды структурных подразделений филиалов ОАО «Российские железные дороги» [Текст] / М. М. Никифоров, А. А. Комяков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук / Самарский НЦ РАН. – Самара. – 2007. – С. 49 – 53.
9. Черемисин, В. Т. Планирование расхода электрической энергии с применением ИНС [Текст] / В. Т. Черемисин, А. А. Комяков, О. А. Коломоец // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 11. – С. 54 – 56.
10. Елисеева, И. И. Эконометрика: Учебник [Текст] / И. И. Елисеева – М.: Финансы и статистика, 2003. – С. 34 – 109.
11. Комяков, А. А. Применение искусственных нейронных сетей для планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды структурных подразделений железных дорог [Текст] / А. А. Комяков, А. В. Пономарев, О. А. Комякова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 1 (5). – С. 63 – 67.
12. Подход к оценке эффективности работы энергосберегающих устройств в сетях электроснабжения железнодорожных узлов с учетом производственных и климатических факторов [Текст] / А. А. Комяков, В. В. Эрбес и др. // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 257 – 263.
13. Коломоец, О. А. Разработка программного алгоритма прогнозирования расхода электрической энергии нетяговых железнодорожных потребителей на основе искусственных нейронных сетей [Текст] / О. А. Коломоец, А. А. Комяков, А. В. Пономарев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 3. – С. 96 – 103.

## References

1. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M. The main trends to realization of the Federal law № 261-FZ from 23.11.09 «About energy savings» in holding company «Russian railways» [Osnovnye napravleniia realizatsii Federal'nogo zakona № 261-FZ ot 23.11.09 «Ob energosberezhenii...» v kholdinge «Rossiiskie zheleznye dorogi»]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2010, no. 2, pp. 119 – 123.
2. Krakhmalev E. I., Service energy in system of the street illumination: technical-economic aspects [Energoservis v sistemakh ulichnogo osveshcheniia: tekhniko-ekonomicheskie aspekty].

*Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the South Ural State University*, 2012, no. 35, pp. 150 – 153.

3. Boikova N. A. Performans-contract and prospects service energy in Russia [Performans-kontrakt i perspektivy energoservisa v Rossii]. *Sovremennaiia nauchnaia mysl' – Modern scientific thought*, 2013, no. 4, pp. 196 – 200.

4. Antonichev S. V. Service energy, problems and positive examples [Energoservis, problemy i pozitivnye primery]. *Energoberezhenie – Energy savings*, 2012, no. 7, pp. 33 – 39.

5. Gorevoi I. M. Using energy saving technology on rail-freight traffics [Primenenie energoberegaiushchikh tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte]. *Problemy bezopasnosti rossiiskogo obshchestva – Problems to safety russian society*, 2013, no. 2/3, pp. 65 – 75.

6. Cheremisin V. T., Vilgelm A. C., Nezevak V. L. Increasing to energy efficiency of the system of tractive supply in condition рекуперации электроподвижного of the composition [Povyshenie energeticheskoi effektivnosti sistemy tiagovogo elektrosnabzheniia v usloviakh rekuperatsii elektropodvizhnogo sostava]. *Lokomotiv – Locomotive*, 2013, no. 8, pp. 5 – 8.

7. Tul'chinskaia Ia. I. Methods of the estimation to efficiency of the lamp and lamp change on energy saving [Metodika otsenki effektivnosti zameny svetil'nikov i lamp na energoberegaiushchie]. *Neftegazovoe delo – Oil and Gas Business*, 2012, no. 4, pp. 570 – 588.

8. Nikiforov M. M. Methods of the planning of power consumption on without traction of the necessity of the structured subdivisions branch JSC "Russian railways" [Metodika planirovaniia elektropotrebleniia na netiagovye nuzhdy strukturnykh podrazdelenii filialov OAO «Rossiiskie zheleznye dorogi»]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Proceedings of the Samara Scientific Center, Russian Academy of Sciences*, 2007, pp. 49 – 53.

9. Cheremisin V. T., Komiakov A. A., Kolomoets O. A. Planning the consumption to electric energy with using INS [Planirovanie raskhoda elektricheskoi energii s primeneniem INS]. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2013, no. 11, pp. 54 – 56.

10. Eliseeva I. I. *Ekonometrika: Uchebnik* (Ekonometrika: textbook for university). Moscow: Finansy i statistika, 2003, pp. 34 – 109.

11. Komiakov A. A., Ponomarev O. A., Komiakova O. A. Using artificial neural networks for planning the consumption to electric energy on without traction of the necessity of the structured subdivisions of the railways [Primenenie iskusstvennykh neironnykh setei dlia planirovaniia raskhoda elektricheskoi energii na netiagovye nuzhdy strukturnykh podrazdelenii zheleznykh dorog]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2011, no. 1(5), pp. 63 – 67.

12. Komiakov A. A., Erbes V. V., Kashtanov A. L. Approach to estimation of efficiency of the work энергосберегающих device in set of supply of the railway nodes with provision for production and climatic factor [Podkhod k otsenke effektivnosti raboty energoberegaiushchikh ustroistv v setiakh elektrosnabzheniia zheleznodorozhnykh uzlov s uchetom proizvodstvennykh i klimaticheskikh faktorov]. *Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Pribory i metody izmerenii, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte»* (All-Russian scientific conference with international participation «Instruments and methods of the measurements, quality and diagnostics checking in industry and on transport»), Omsk, 2013, pp. 257 – 263.

13. Kolomoets O. A., Komiakov A. A., Ponomarev A. V. Development of the programme algorithm of the forecasting of the consumption to electric energy нетяговых railway consumers on base artificial нейронных networks [Razrabotka programmno algoritma prognozirovaniia raskhoda elektricheskoi energii netiagovykh zheleznodorozhnykh potrebiteli na osnove iskusstvennykh neironnykh setei]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, no. 3, pp. 96 – 103.

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТРУДА И ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ ПРОВОДНИКОВ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

*Статья рассматривает обеспечение условий труда проводников пассажирских вагонов. В связи с появлением новых полимерсодержащих конструкционных и отделочных материалов во внутреннем оборудовании вагона в воздушную среду помещений поступает значительное количество химических веществ, которые могут представлять опасность для проводников и пассажиров при штатных условиях эксплуатации вагона.*

С целью обеспечения безопасных условий труда работников пассажирской службы в ОАО «РЖД» в установленном порядке осуществляется специальная оценка условий труда. Профессия проводника пассажирского вагона является одной из наиболее массовых профессий пассажирской службы.

Основные вредные и неблагоприятные производственные факторы, присущие этой профессии: вибрация, шум, запыленность, химические вещества, неблагоприятная микробиологическая атмосфера и др.

Безусловно, все эти факторы не могут не отражаться на состоянии здоровья и условиях труда проводников.

Труд проводников относится к категории «разъездных» профессий, причем большее число проводников заняты в длительных поездках, перемещаясь в течение трех и более (до семи) суток.

Проведенные во ВНИИЖГе исследования условий труда и заболеваемости проводников пассажирских вагонов (А. А. Прохоров, В. А. Кудрин, 1992 г.) подтвердили тот факт, что полученные показатели связаны не только с возрастными особенностями, но и с характерными факторами производственно-профессиональной деятельности этой категории работников железнодорожного транспорта. Величина показателей заболеваемости с временной утратой трудоспособности среди проводников выше на 8,4 % в случаях и на 11,9 % в днях временной нетрудоспособности по сравнению с другими профессиональными группами женщин-железнодорожников.

Структура заболеваемости также имеет ряд отличий: у проводников пассажирских вагонов преобладают болезни органов дыхания, органов кровообращения, костно-мышечной системы, травмы и аллергические заболевания. Болезни дыхательной системы у проводников вагонов составляют более половины всех случаев временной нетрудоспособности и встречаются преимущественно в виде ОРЗ, ринитов, бронхитов и пневмоний, что указывает на необходимость регулирования и нормализации воздушной среды пассажирского вагона, который является объектом длительного пребывания и рабочим местом проводника. Кроме того, болезни органов дыхания достоверно чаще на 12,5 % являются причиной утраты профессиональной пригодности к труду по состоянию здоровья у проводников по сравнению с другими работниками железнодорожного транспорта, в основном за счет бронхиальной астмы и других рецидивирующих хронических заболеваний бронхиально-легочной системы за счет высокой бактериальной загрязненности воздушной среды вагона, присутствия в воздухе различных химических соединений и неблагоприятного микроклимата.

В последние годы санитарно-химическими исследованиями по изучению свойств полимерных материалов занимались ведущие научно-исследовательские организации: Институт экологии человека имени А. Н. Сысина; Московский научно-исследовательский институт гигиены имени Ф. Ф. Эрисмана; Киевский научно-исследовательский институт общей и коммунальной гигиены имени А. Н. Марзеева; кафедра коммунальной гигиены I Московского медицинского института и Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожной гигиены.

Разработке гигиенических требований, предъявляемых к полимерным синтетическим материалам, посвящены работы К. И. Станкевича, А. Н. Бокова с соавторами и др. Все авторы на первое место ставят требование химической стабильности полимерных материалов.

В последние годы значительно возрос поток пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте, изменились условия и характер труда проводников пассажирских вагонов, требования к обслуживанию пассажиров, графики работы проводников, организация условий труда, питания и бытового обеспечения поездных бригад.

В Единых методических рекомендациях по проведению аттестации рабочих мест по условиям труда проводников пассажирских вагонов, утвержденных начальником департамента дальних пассажирских перевозок ОАО «РЖД» О. А. Никитиным (2003 г.), указано, что в процессе работы проводники могут подвергаться воздействию различных вредных и опасных факторов производственной среды (шум, вибрация, химический фактор, тяжесть и напряженность трудового процесса, неудовлетворительные микроклиматические условия, недостаточная искусственная освещенность), испытывают физические и психоэмоциональные нагрузки. Сопутствующие труду проводников вредные и опасные производственные факторы способны обуславливать развитие как неспецифической, так и специфической патологии. Степень воздействия производственных факторов во многом зависит от специфики работы, выполняемой проводником, а также от особенностей организации и условий труда, характерных только для данной профессии. Причем некоторые выявленные факторы не могут быть напрямую устранены организационными и профилактическими мероприятиями (Б. Б. Елизаров, Л. Г. Кузина, Т. П. Синявская, А. С. Сыромятников, Н. Г. Лосавио).

Проводники пассажирских вагонов относятся преимущественно к женским профессиям (по данным анкетирования ФГУП «ВНИИЖГ» Роспотребнадзора 2007 – 2011 гг).

Проведенный анализ условий труда и заболеваемости проводников показал необходимость проведения натуральных санитарно-химических исследований воздушной среды пассажирских вагонов различных типов с решением следующих задач: уточнение источников выделения вредных веществ; идентификация химически активных примесей; расчет возможного сочетанного и комбинированного действия на проводников выделяемых химических веществ с аддитивным или кумулятивным эффектом; ориентировочная оценка риска для здоровья проводников от выявленных неблагоприятных факторов.

Профессия проводника пассажирских вагонов относится преимущественно к женским профессиям, поэтому показатели заболеваемости, как правило, приводятся и анализируются только у работающих проводниками женщин.

Для целей анализа заболеваемости проводников пассажирских вагонов показатели их заболеваемости сравнивали (таблица 1) со среднесетевыми показателями женщин, работающих на железнодорожном транспорте тех же возрастно-стажевых групп.

Таблица 1 – Повозрастные показатели общей заболеваемости проводников пассажирских вагонов

Возраст	30 – 39 лет	40 – 49 лет	50 – 59 лет
Проводники пассажирских вагонов	1483,1	1646,4	1902,7
Среднесетевые показатели среди женщин, работающих на железнодорожном транспорте	1591,9	1738,5	1806,3

Примечание. Случаи на 1000 работающих.

Среднесетевые показатели общей заболеваемости проводниц среди остальных профессиональных групп женщин, работающих на железнодорожном транспорте, на 2,4 % выше. Таким образом, уровень здоровья женщин-проводников практически не отличается от средних отраслевых параметров, что свидетельствует о наличии одинакового влияния комплекса производственно-профессиональных, гигиенических и других факторов на здоровье женщин, работающих на железнодорожном транспорте.

Таблица 2 – Общая заболеваемость проводников пассажирских вагонов по классам заболеваний в сравнении со среднесетевыми показателями по железнодорожному транспорту

Класс заболеваний		Возраст							
		30 – 39 лет		40 – 49 лет		50 – 59 лет		всего	
		1	2	1	2	1	2	1	2
I	Инфекционные и паразитарные заболевания	44,9	31,2	71,2	47,5	32,5	41,7	49,5	40,1
III	Болезни эндокринной системы, расстройства питания, нарушения обмена веществ и иммунитета	–	16,6	–	20,0	32,4	21,6	32,4	23,5
VIII	Болезни органов дыхания	651,6	708,1	595,9	628,8	648,6	563,2	632	633,4
IX	Болезни органов пищеварения	22,4	109,8	60,6	141,6	151,3	167,9	78,1	139,7
XII	Болезни кожи и подкожной клетчатки	157,3	60,6	70,7	53,6	54,0	56,3	94	56,8
Всего		876,2	926,3	798,4	891,5	918,8	850,7	886	893,5

Вместе с тем среди проводников пассажирских вагонов преобладает так называемый показатель «процент болевших лиц», который составляет 46,8 (при величине среднеотраслевого, равной 40,7). Кроме того, в исследуемой профессии несколько выше численность работников, относящихся к «группе длительно и часто болеющих лиц», которая суммарно составляет 8 % (среднеотраслевой показатель равен 6,7 %).

Как видно из данных таблицы 2, наиболее распространенными заболеваниями являются болезни органов дыхания, второе место занимают болезни кожи и подкожной сетчатки, третье – инфекционные болезни.

Следствием проведенного анализа является тот факт, что происходит постоянный рост показателей общей заболеваемости у проводников, при этом в возрасте до 50 лет проводники пассажирских вагонов болеют относительно реже по сравнению с другими профессиональными группами и лишь после 50 лет наблюдается нарастание заболеваемости.

Проведенный анализ заболеваемости проводников показал необходимость проведения натуральных санитарно-химических исследований воздушной среды пассажирских вагонов различных типов с решением следующих задач:

- уточнение источников деструкции в пассажирских вагонах;
- идентификация химически активных примесей;
- токсикологическая характеристика выявленных химических веществ с определением класса опасности;
- расчет возможного сочетанного и комбинированного действия на проводников выделяемых химических веществ с аддитивным или кумулятивным эффектом;
- ориентировочная оценка риска для здоровья проводников от выявленных неблагоприятных факторов.

В анкетировании принимали участие 80 проводников поездов дальнего следования (Москва – Северодвинск – Москва, Москва – Адлер – Москва).

Основные вопросы при проведении анкетирования проводников:

- возраст проводников;
- пол;
- стаж работы;
- количество проводников в вагоне;
- количество времени на один рейс;
- ощущают ли проводники посторонние запахи химических веществ.

Результаты анкетирования представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты анкетирования

Вопросы, задаваемые проводникам пассажирских вагонов	Ответы и результаты анкетирования	Результаты, %
Возраст	20 – 30 лет	20
	30 – 40 лет	51
	40 – 50 лет	29
Пол	Женский	83
	Мужской	17
Стаж работы	1 – 5 лет	26
	5 – 10 лет	29
	10 – 15 лет	45
Количество проводников в вагоне	1	26
	2	74
Количество времени на один рейс	Более одних суток	31
	Более двух суток	69
Ощущают ли проводники посторонние запахи химических веществ	Да	34
	Нет	66

На основании изложенного можно сделать выводы:

количество полимерсодержащих материалов, используемых во внутренних помещениях пассажирских вагонов, постоянно увеличивается;

при эксплуатации вагонов, в конструкции которых использованы полимерсодержащие материалы, в воздух вагона выделяются вредные вещества, их количество необходимо регламентировать;

по результатам санитарно-химических испытаний, проведенных в помещениях пассажирских вагонов, были обнаружены химические вещества, превышающие гигиенические нормативы по стиролу в 200 раз, по формальдегиду в 30 раз, также были обнаружены бензол, ксилол и толуол без превышения гигиенических нормативов;

превышение концентраций было обнаружено, когда температура воздуха в помещениях вагона была выше 25 °С, а также при выключенной вентиляции обнаруживалось превышение гигиенических нормативов по двуокиси углерода в семь раз;

актуальность обеспечения параметров гигиенической безопасности по «химическому фактору» помещений пассажирских вагонов делает необходимой разработку перечня критериев и показателей, характеризующих безопасное пребывание пассажиров и поездных бригад в современных пассажирских железнодорожных вагонах.

### Список литературы

1. Вильк, М. Ф. О совершенствовании регистрации профессиональной заболеваемости железнодорожников [Текст] / М. Ф. Вильк // Гигиена и санитария. – М.: Медицина, 2001. – № 6. – С. 37, 38.
2. Капцов, В. А. Профессиональная и производственно зависимая заболеваемость железнодорожников [Текст] / В. А. Капцов, В. Б. Панкова, С. В. Суворов // Гигиена и санитария. – М.: Медицина, 1996. – № 6. – С. 16 – 22.
3. Современные проблемы профессиональной заболеваемости на железнодорожном транспорте [Текст] / В. Б. Панкова, Ю. М. Артеменков и др. // Гигиена и санитария. – М.: Медицина, 2006. – № 3. – С. 28 – 32.
4. Юдаева, О. С. Улучшение условий труда проводников при использовании современных полимерсодержащих материалов внутренней отделки пассажирских вагонов: Автореф. дис... канд. техн. наук [Текст] / О. С. Юдаева / Московский гос. ун-т путей сообщения. – М., 2011. – 24 с.

### References

1. Vil'k M. F. O sovershenstvovanii registratsii professional'noi zabolevaemosti zheleznodorozhnikov [On improving the registration of occupational disease railroad]. *Gigiiena i sanitaria – Hygiene and Sanitation*, 2001, no. 6, pp. 37 – 38.

2. Kapsov V. A., Pankova V. B., Suvorov S. V. Professional'naiia i proizvodstvenno-zavisimaia zaboлеваemost' zhelez-nodorozhnikov [Professional and production-dependent incidence of glands-nodorozhnikov]. *Gigiena i sanitaria – Hygiene and Sanitation*, 1996, no. 6, pp. 16 – 22.

3. Pankova V. B., Artemenkov Iu. M. Sovremennye problemy professional'noi zaboлеваemosti na zhelez-nodorozhnom transporte [Modern problems of occupational diseases on railway transportation]. *Gigiena i sanitaria – Hygiene and Sanitation*, 2006, no. 3, pp. 28 – 32.

4. Iudaeva O. S. *Uluchshenie uslovii truda provodnikov pri ispol'zovanii sovremen-nykh polim-ersoderzhashchikh materialov vnutrennei otdelki passazhirskikh vagonov* (Improving working conditions conductors using modern of polymer materials interior trim passenger cars). Ph. D. thesis Moscow, MSTU, 2011, 24 p.

УДК 629.42:629.4.054

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОВОЗОВ UzTE16M4 НА УЧАСТКЕ КУМКУРГАН – ТАШГУЗАР ГАЖК «ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ»

**Аблялимов Олег Сергеевич**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

100167, г. Ташкент, Миробадский район, Республика Узбекистан, ул. Адылходжаева, 1.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство», ТашИИТ.

Тел.: (8-109-98-71) 299-03-94.

E-mail: icenter@tashiit.uz

*Представлены результаты исследований по оценке эффективности использования тепловозов UzTE16M4 на «горном» участке Кумкурган – Ташгузар Узбекских железных дорог при движении грузовых поездов с остановками и без остановок на промежуточных станциях.*

*Ключевые слова: исследование, результат, грузовой поезд, движение, электровоз, железнодорожный путь, участок, тепловоз, кузов, вагон, эксплуатация, условие, направление, этап, скорость, расчет, подвижной состав, горный, анализ, оценка, станция, представить.*

## THE INVESTIGATION OF THE EXPLOITATION OF THE DIESEL LOCOMOTIVES UZTE16M4 IN THE DIRECTION KUMKURGAN – TASHGUZAR SJRC «UZBEK RAILWAYS»

**Ablyalimov Oleg Sergeyevich**

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).

1, Adilhodjaev str., Tashkent, Mirabad region, 100167, Republik of Uzbekistan.

Ph. D., assistant professor of the department «Lokomotives and locomotive economy», TashIET.

Phone: (8-109-98-71) 299-03-94.

E-mail: icenter@tashiit.uz

*The results of the investigations on the evaluation of efficiency use of the diesel locomotives UzTE16M4 in the mountainous direction Kumkurgan – Tashguzar of the Uzbek railways track by of the movement goods trains with stops and without any stops on the spaces station are presented.*

*Keywords: investigation, result, the goods train, movement, the electric locomotive, railway track, the direction, the diesel locomotive, the body, the carriage, exploitation, condition, direction, the stage, the speed, calculation, rolling – stock, mountainous, analyses, evaluation, the station, present, introduce.*

УДК 629.4.027/027:620.179.16(07)

## О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ОСИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ВАГОНА

**Ахмеджанов Равиль Абдрахманович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-72.

**Макарович Валерий Володарович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Ведущий инженер кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.  
Тел.: (3812) 31-06-72.  
E-mail: makarochkin2004@mail.ru

**Родченко Лидия Александровна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.  
Студентка ОмГУПС.  
Тел.: (3812) 31-06-72.

*В статье рассмотрены штатные технологии ультразвукового контроля подступичной части нераспрессованных осей колесных пар вагонов в соответствии с действующими нормативными документами РД 07.09-97 и СТО РЖД 1.11.002-2008 и предложены меры по их совершенствованию.*

Ключевые слова: ось колесной пары вагона, ультразвуковой контроль, нормативные документы, совершенствование технологии.

## IMPROVEMENT OF ULTRASONIC INSPECTION OF THE WAGON WHEELSET AXLE

**Akhmedzhanov Ravil Abdrakhmanovich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.  
Ph. D., professor of the department «Wagons and wagon economy», OSTU.  
Phone: (3812) 31-06-72.

**Makarochkin Valeriy Volodarovich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.  
Senior ingeneer of the department «Wagons and wagon economy», OSTU.  
Phone: (3812) 31-06-72.  
E-mail: makarochkin2004@mail.ru

**Rodchenko Lidia Aleksandrovna**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.  
Graduate student of OSTU.  
Phone: (3812) 31-06-72.

*In article are considered standard technologies of ultrasonic inspection of under-hub parts of press-fitted wheelset axles accordingly to existing regulations: GD (Guidance Document) 07.09-97 and STO (Standard of the Organization) Russian Railways 1.11.002-2008, and proposed improvement measures of nondestructive inspection that are confirmed by calculation and experimentally.*

Keywords: wagon wheelset axle, ultrasonic inspection, regulations, improvements of technology.

УДК 629.4.027

## АНАЛИЗ НЕИСПРАВНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОВЗОВ 2ЭС6

**Дрягилев Александр Евгеньевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант, инженер-исследователь научно-исследовательской части, ОмГУПС.  
Тел: (3812) 31-16-27.  
E-mail: Dryagilev.aleksandr@mail.ru

*В данной статье приведен анализ отказов механического оборудования магистрального электровоза 2ЭС6 «Синара». Целью работы является анализ основных неисправностей механической части, причин их возникновения. Исследование проводилось на базе ремонтного локомотивного депо Московка с использованием статистических методов оценки. Данные для анализа взяты из формы первичного учета ТУ-29 «Книга повреждений и неисправностей локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава и их оборудования». По результатам исследования на механическое оборудование приходится 8,62 % от всех отказов. Средняя наработка на отказ механической части локомотива  $L_2$  составляет 156221 км. Анализ отказов механического оборудования показал, что около 50 % всех неисправностей связано с износом поверхности катания колесной пары. Более трети всех отказов связано с односторонним износом гребня бандажа. Одной из причин отказов является нарушение развески электровоза при постройке на заводе-изготовителе и в процессе эксплуатации, ремонта. Средняя наработка до отказа колесной пары по причине одностороннего износа бандажа  $L_1 = 279874$  км. Около 20 % отказов механического оборудования приходится на разрыв вентиляционных патрубков. Анализ показал, что проблема имеет сезонный характер и проявляется в зимнее время года, что связано с конструктивным недостатком вентиляционных патрубков. Остальные виды отказов механического оборудования имеют меньшую статистическую значимость. Для сравнения в статье проанализировано распределение механических неисправностей электровозов ВЛ10. Полученные зависимости могут являться исходной информацией для формирования системы ремонта локомотивов 2ЭС6 «Синара» по техническому состоянию.*

Ключевые слова: электровоз, механическое оборудование, бандаж, отказы, износ.

## FAILURE ANALYSIS OF MECHANICAL EQUIPMENT ELECTRIC LOCOMOTIVES 2ES6

**Dryagilev Alexander Evgenevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The post-graduate student, research engineer of research part, OSTU.

Phone: (3812) 31-16-27.

E-mail: Dryagilev.aleksandr@mail.ru

*This article provides an analysis of the failure of mechanical equipment freight electric locomotive 2ES6 "Sinara". The aim is to analyze the main failure of the mechanical part, the causes of failure. Using statistical methods for estimating and accounting data form TU -29 "Book of damage or malfunction of locomotives and multiple units and their equipment" locomotive repair depot «Moskovka» investigated. Mechanical equipment failures make up 8.72% of all failures locomotive. Mean operating time to failure of the mechanical part locomotive is  $L_2=156221$  km. Failure analysis of mechanical equipment showed that about 50% of all faults related to the deterioration of the rolling surface of the wheelset. More than a third of all failures associated with unilateral wheel flange wear. Mean time to failure due to a unilateral wheelset wear bandage is  $L_1=279874$  km. One reason is the incorrect distribution the load on the wheelsets at the factory and in the process of the attendance, maintenance. About 20% of mechanical equipment failures account for the failure ventilation pipes. Analysis showed that the problem appears in the winter season. The main reason is a design defect ventilation pipes. Other types of mechanical equipment failures have less statistical significance. For comparison, the paper analyzes the distribution of electric locomotives VL10 mechanical failures. The obtained dependences can be a source of information for the system repair locomotives 2ES6 "Sinara" on-condition maintenance.*

Keywords: *electric locomotive, mechanical equipment, tyre, failures, deterioration.*

УДК 621.33

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСЦИЛЛИРУЮЩИХ РЕЖИМОВ ИНФРАКРАСНОГО ЭНЕРГОПОДВОДА В ТЕХНОЛОГИИ КАПСУЛИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ПРИ РЕМОНТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Дульский Евгений Юрьевич**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Аспирант, ассистент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-983-403-46-43.

E-mail: E.Dulskiy@mail.ru

**Лыткина Екатерина Михайловна**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: (3952) 63-83-66.

E-mail: Forevochka@bk.ru

**Худоногов Анатолий Михайлович**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-914-88-14-675.

E-mail: hudonogov@irgups.ru

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований по выявлению рациональных режимов ИК-энергоподвода в технологии капсулирования изоляции обмоток электрических машин (ЭМ) тягового подвижного состава (ТПС). В данной работе опубликованы результаты по сравнению эффективности использования различных осциллирующих режимов инфракрасного (ИК) энергоподвода в процессе капсулирования изоляции обмоток ЭМ ТПС на технологической установке при их деповском и заводском ремонте. Объективными факторами при сравнении режимов капсулирования являются такие параметры, как электрическая прочность и цементирующая способность.*

Ключевые слова: *электрические машины тягового подвижного состава, изоляция, сушка, терморрадиационный, конвективный, электрическая прочность, цементирующая способность.*

## STUDY OF EFFICIENCY OSCILLATING REGIMES IN ENERGY SUPPLY INFRARED TECHNOLOGY IN CAPSULATING WINDING INSULATION REPAIR OF ELECTRICAL MOTORS OF LOCOMOTIVES

**Dulsky Evgeny Urievich**

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Post-graduate student, assistant of the department «Electrorolling composition», ISTU.

Phone: 8-983-403-46-43.

E-mail: E.Dulskiy @ mail.ru

**Lytkina Ekaterina Mikhailovna**

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Electrorolling composition», ISTU.

Phone: 8 (3952) 63-83-66.

E-mail: Forevochka@bk.ru

**Hudonogov Anatoly Mikhailovich**

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of the department «Electrorolling composition», ISTU.

Phone: 8-914-88-14-675.

E-mail: hudonogov@irgups.ru

*The article is devoted to continue presenting the results of experimental studies on the identification of rational modes of IR energy supply in encapsulation technology insulation windings of electric machines (EM) of traction rolling stock (TPS). In this paper, published the results of comparing the effectiveness of the use of various oscillatory modes of infrared (IR) energy supply in the process of winding insulation encapsulation the frontal parts armature winding of the traction motor type NB-514B electric locomotives series "Ermak" on the process plant at their depot and factory repair.*

*In studies to identify rational oscillating modes IR energy supply option duty cycle remained unchanged for the existing design of the generator of heat radiation technological installation, and changed only option cyclical, characterized by changing the speed of rotation of the armature traction motor on the plant corresponding to 5, 25 and 50 Hz when the drive installation works from the frequency converter.*

*The process of encapsulation was carried out first only short-wavelength radiation generated incoherent halogen emitters, then only at medium-wavelength radiation generated pulse ceramic radiators, and finally - with alternating heating medium short- and medium-wavelength radiation, i.e. with these two types of emitters in the spectral-oscillating mode IR energy, on which is currently obtained patent for the invention. For comparability of experimental studies same dose irradiation of segments frontal part of the armature windings of the traction motor type NB-514B electric locomotives «Ermak».*

*Objective factors when comparing encapsulation modes to identify the most efficient are parameters such as dielectric strength (the value of the breakdown voltage insulating tape) and cementing capacity.*

*Keywords: electric machines of traction rolling stock, insulation, drying, thermoradiation, convection, electric strength, cementing ability.*

УДК 621.791

## ШИРОКОСЛОЙНАЯ НАПЛАВКА ГРЕБНЯ ЦЕЛЬНОКАТАНОГО КОЛЕСА МНОГОЭЛЕКТРОДНЫМ СПОСОБОМ

**Меликов Владимир Вадимович**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

100167, г. Ташкент, Миробадский район, Республика Узбекистан, ул. Адылходжаева, 1.

Доктор технических наук, профессор, руководитель научно-исследовательской лаборатории «Материаловедение и сварка», ТашИИТ.

Тел.: (8-109-98-71) 299-04-46.

E-mail: icenter@tashiit.uz

**Файзибоев Шерзод Сабирович**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

100167, г. Ташкент, Миробадский район, Республика Узбекистан, ул. Адылходжаева, 1.  
Доктор технических наук, профессор, проректор по науке и подготовке научно-педагогических кадров ТашИИТа.  
Тел.: (8-109-98-71) 299-00-06.  
E-mail: icenter@tashiit.uz

**Набиев Эльман Саядович**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).  
100167, г. Ташкент, Миробадский район, Республика Узбекистан, ул. Адылходжаева, 1.  
Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Материаловедение и сварка», ТашИИТ.  
Тел.: (8-109-98-71) 299-04-46.  
E-mail: icenter@tashiit.uz

*В работе представлены результаты экспериментального исследования термического цикла многоэлектродной наплавки гребня цельнокатаного колеса и его влияния на структурообразование в зоне термического воздействия.*

Ключевые слова: *цельнокатаное колесо, гребень, многоэлектродная наплавка, зона термического влияния, структура, предварительный подогрев, термический цикл, исследования.*

## THE WIDE-LAYER WELDING OF THE SOLID WHEEL'S COMB BY THE MANY-ELEKTRODE WAY

**Melikov Vladimir Vadimovich**

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).  
1, Adilhodjaev str., Tashkent, Mirobad region, 100167, Republik of Uzbekistan.  
Dr. Sci. Tech., professor, leader of the research laboratory «Material sciences and welding», TashIET.  
Phone: (8-109-98-71) 299-04-46.  
E-mail: icenter@tashiit.uz

**Fayzibaev Sherzod Sobirovich**

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).  
1, Adilhodjaev str., Tashkent, Mirobad region, 100167, Republik of Uzbekistan.  
Dr. Sci. Tech., professor, chief on science and preparing the scientifically – pedagogical personnel of TashIET.  
Phone: (8-109-98-71) 299-00-06.  
E-mail: icenter@tashiit.uz

**Nabiyev Elman Sayaljvich**

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).  
1, Adilhodjaev str., Tashkent, Mirobad region, 100167, Republik of Uzbekistan.  
Ph. D., assistant professor, senior scientific employee of the research laboratory «Material sciences and welding», TashIET.  
Phone: (8-109-98-71) 299-04-46.  
E-mail: icenter@tashiit.uz

*The results of the experimental study of the termal cycle of many-electrode welding of the solid wheel's comb and its influences in work upon structurization in zone of the termal influence are presented.*

Keywords: *solid wheel, comb, many-electrode welding , zone of the termal influence, structure, preliminary heating, termal cycle, studies.*

УДК 621.336.2

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ПАР УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА

### **Сидоров Олег Алексеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-46.

E-mail: SidorovOA@omgups.com

### **Филиппов Виктор Михайлович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-46.

E-mail: fvm-omgups@mail.ru

### **Ступаков Сергей Анатольевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-46.

E-mail: stupakov1@yandex.ru

*В статье приведено описание построения математической модели электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. Созданная математическая модель позволяет учесть тепловые процессы, возникающие в скользящем контакте при пропускании электрического тока через скользящий контакт. Приведено сравнение результатов расчетов и экспериментальных исследований износа контактных пар.*

Ключевые слова: *контактная пара, установка возвратно-поступательного типа, математическая модель изнашивания, механический износ, контактные элементы, интенсивность изнашивания.*

## CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF MECHANICAL WEAR CONTACT PAIRS DEVICES CURRENT COLLECTION

### **Sidorov Oleg Alekseevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Tech. Sci., professor, head of the department «Railways power supply», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-46.

E-mail: SidorovOA@omgups.com

### **Philippov Victor Mihajlovich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the departament «Railways power supply», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-46.  
E-mail: fvm-omgups@mail.ru

**Stupakov Sergey Anatolevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-46.  
E-mail: stupakov1@yandex.ru

*The article describes a mathematical model of electro-mechanical devices wear contact pairs current collection of electric transport in conditions as close to real operating conditions. Synthesis of models made in two directions: model the mechanical load and model of electric current flow in sliding contact. The mathematical model also allows to take into account the thermal processes occurring in sliding contact by passing an electric current through a sliding contact. Are compared the results of calculations and experimental studies of wear of contact pairs of different materials. Experimental studies were performed on a dedicated test bench installation created in Omsk State Transport University. Relative error between calculation and experiment is not more than 6 %.*

Keywords: *contact pair, installation of reciprocating type, mathematical model of wear, mechanical wear, contact elements, the intensity of wear.*

УДК 629.488

## **ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ КОРРЕКТИРОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ЛОКОМОТИВОВ**

**Супчинский Олег Павлович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

Аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: 8-908-105-24-16.  
E-mail: sunchinyan@mail.ru

**Капустьян Михаил Федорович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: 8(381-2) 31-18-11.  
E-mail: ttm@omgups.ru

**Обрывалин Алексей Викторович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: 8(381-2) 31-18-11.  
E-mail: ttm@omgups.ru

*В статье отражены основные положения оптимизированной системы технического обслуживания и ремонта электровозов, а также результаты эксперимента по увеличению*

*межремонтных пробегах электровозов на Восточном полигоне. Рассмотрен вопрос влияния технологической подготовки производства на качество ремонта и число отказов при переходе на оптимизированную систему. Предложена методика расчета стоимости корректировки и разработки технологической документации, которая является неотъемлемой частью технологической подготовки производства. Расчет стоимости осуществляется на основе уровня квалификации и заработной платы инженеров-технологов, сложности и объемов разрабатываемой (корректируемой) технологической документации.*

*Представлен пример расчета стоимости корректировки и разработки технологической документации в условиях депо. Экономический эффект от внедрения данной методики и оптимизированной системы ремонта в целом показал их эффективность и состоятельность. За счет корректировки технологических процессов ремонта электровозов снизится количество отказов в ходе эксплуатации, которые были обнаружены в ходе эксперимента, проводившегося на Восточном полигоне. Затраты на внедрение оптимизированной системы ремонта покроются за счет выгоды от увеличения межремонтных пробегах и снижения трудоемкости работ на отдельных видах ремонта.*

Ключевые слова: *техническое обслуживание и ремонт, оптимизированная система ремонта, технологический процесс, технологическая документация, экономический эффект.*

## ASSESSMENT OF TECHNICAL AND ECONOMIC EFFECT FROM UPDATING OF TECHNOLOGICAL DOCUMENTATION FOR THE OPTIMIZED SYSTEM OF MAINTENANCE AND REPAIR OF LOCOMOTIVES

### **Supchinsky Oleg Pavlovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk. 644046, Russia.

Post-graduate student of the department «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock», OSTU.

Phone: 8-908-105-24-16.

E-mail: sunchinyan@mail.ru

### **Kapustyan Mikhail Fedorovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk. 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecture of the department «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock», OSTU.

Phone: 8(381-2) 31-18-11.

E-mail: ttm@omgups.ru

### **Obryvalin Aleksey Viktorovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk. 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecture of the department «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock», OSTU.

Phone: 8(381-2) 31-18-11.

E-mail: ttm@omgups.ru

*The article describes the main provisions of the optimized system of the electric locomotives maintenance service and repair, as well as the results of the experiment to increase between-repairs run of the electric locomotives in the Eastern polygon. The author examines the impact of technological preparation of production on the quality of repair and the number of failures in the transition to a more streamlined system. The article proposes a method of calculation of adjustment and development cost of technological documentation, which is an integral part of technological preparation of production. The cost calculation includes qualifications and salaries of industrial engineers, the complexity and volume of developed or adjusted technological documentation. The au-*

thor gives the example of calculation of adjustment and development cost of technological documentation in depot conditions. The economic effect from the implementation of this methodology and optimized system repair shows its effectiveness and viability. Due to the adjustments of technological processes of the electric locomotives repair, the number of failures during operation, discovered during the experiment in the Eastern polygon, will decrease. Benefit from the increased between-repairs run and reducing the complexity of some of the repairs will cover the costs of implementation of the optimized system.

Keywords: maintenance and repair, optimized system repair, process, process documentation, the economic effect.

УДК 621.436-7:62-50

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МЕТОДАМИ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Ведрученко Виктор Родионович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

**Крайнов Василий Васильевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-23.

E-mail: KrainovVV@omgups.ru

*Выполнено системное описание сложной технической системы (системы топливоиспользования дизельной установки). Модель представлена в форме конечного графа, позволяющего описать физическую природу процессов на принятом уровне детализации. Определены динамические свойства системы: управляемость, устойчивость, состояние – на основе основных положений теории автоматического управления (ТАУ).*

Ключевые слова: графовая модель, дизельная система топливоиспользования, обобщенная модель, динамика экономичности, система уравнений, малые отклонения.

## THE MODEL GRAPH ANALYZING OF GENERATING UNITS FUEL-USING SYSTEMS BY METHODS OF AUTOMATIC CONTROL THEORY

**Vedruchenko Viktor Rodionovich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

**Krajnov Vasily Vasilevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

E-mail: KrainovVV@omgups.ru

*The subject of the study is the fuel utilization system of a diesel power plant as a diesel locomotive or other vehicle main lead, which is a complex technical system consisting of actual diesel internal combustion engine, fuel lines and low pressure fuel processing and high pressure line including various elements of liquid fuels consumption dosing and control.*

*The aim of our study was to analyze the system functioning, to determine the dynamic properties and the nature of changes in the internal parameters of the system as a whole.*

*To achieve the goal the system analysis methods were used. The processes of complex technical system operation were interpreted by means of the continuous linear stationary deterministic model of the list of others.*

*For this particular model the body of mathematics developed on the basis of linear differential equations with constant coefficients is the most complete one.*

*The chosen mathematical model was presented by us in the first stage in the form of a finite graph as a subgraph of obtained earlier generalized model which had both methodological and theoretical foundation.*

*In accordance with the methodology of the systematic approach the graph model of the diesel power plant fuel utilization system operation was described in relation to major significant factors affecting the system parameters transformation dynamics.*

*Given the complexity of the of fuel ignition and combustion mechanism located in the diesel engine cylinder, the use of the techniques of the modern automated control theory is adopted for numerical processes simulation with the system described in terms of the said theory.*

*The criteria of efficiency, mechanical loads and thermal loads levels were chosen as the fuel utilization system internal state variables.*

*Taking into account the Pareto principle the most important efficiency criterion components were chosen for the analysis; and the system of differential equations of the efficiency dynamics in the form of three balance equations was created.*

*The factual description of the included equations allowed us to derive preliminary qualitative conclusions about the dynamic properties of the internal criteria: controllability, observability and stability of the fuel utilization system.*

*The differential equations system parameters linearizing procedure and the introduction of small deviations allowed us to obtain the dynamic mathematical model of the fuel and air transformation in the diesel engine heat cylinder.*

*As the result of transformations we have obtained the equations presented in the form of the matrices, which allowed us to conclude that the process of the fuel and air transformation in the cylinder is controllable, the system is asymptotically stable, and the process is stochastic with the presence of perturbing parameters influenced by the engine's variable modes of operation.*

*The further research areas have been suggested, and the practical results have been predicted: the creation of optimal (in terms of efficiency) control system with the technical solution in the form of the optimal controller (in relation to fuel consumption).*

*Keywords: model graph, diesel fuel using system, general model, economy dynamics, equations set, minor deviations.*

УДК 621.336.2

## **ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПРОВОДА КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

**Емельянова Марина Николаевна**

ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»).

Аспирант, научный сотрудник отдела «Контактная сеть и токосъем», ОАО «ВНИИЖТ».

107996, г. Москва, 3-я Мытищинская, 10.

Тел.: (499) 260-42-17.

E-mail: emelyanova.marina@vniizht.ru

*Рассмотрены условия работы проводов контактной сети в части термомеханических нагрузок. Проанализированы результаты испытаний проводов контактной сети с целью определения относительной скорости удлинения провода.*

*Представлены результаты испытаний контактных проводов и несущих тросов по определению разрывного усилия при различной температуре. Предложены допустимые значения температуры нагрева для медных и бронзовых проводов в условиях эксплуатации и коэффициенты запаса прочности для них.*

Ключевые слова: *контактная сеть, несущий трос, контактный провод, относительная скорость удлинения, разрывное усилие.*

## **SUBSTANTIATION OF MECHANICAL VALUE OF OPERATING THERMO-MECHANICAL LOADS ON THE OVERHEAD CONTACT SYSTEM WIRES**

**Emelianova Marina Nikolaevna**

JSC «Railway Research Institute» (JSC «VNIIZHT»).

Research worker of department of «Overhead contact system and current collection», JSC «VNIIZHT».

10, 3 Mytischinskaya str., Moscow, 107996, Russian Federation.

Phone: (499) 260-42-17.

E-mail: emelyanova.marina@vniizht.ru

*As a result of tension increase and significantly loads on the overhead contact lines, there is need to research the tensile stress value for contact and messenger wires. In this paper, the author reviewed the wires operation conditions concerning the thermo-mechanical load. The author has analyzed the results of contact wires low-temperature creep tests. The real rate of contact wires creep is as appropriate as the standard values. At the same time, copper wire elongation is faster than bronze.*

*The author has provided results about contact and messenger wires ultimate tensile stress tests, heated at different temperatures. The ultimate tensile stress rate for the copper and bronze contact wires is reducing by 9 % with temperatures increasing. The ultimate tensile stress rate for the copper messenger wires is reducing by 11 %, for the bronze wires – by 4 %, with rising temperatures to 150 °C.*

*Test results have shown that heating of copper wires to temperatures above 90 °C and bronze wires to temperatures above 120 °C leads to a significant immediate reduction of strength. Working conditions for the overhead contact lines wires are close to the critical one. It is not sufficient for reliable and safe operation Author offers to modify regulatory requirements for contact and messenger wires concerning permissible heating and also not to divide short-term and long-term heating and only to leave permissible heating.*

Keywords: *overhead contact system; messenger wire; contact wire; low-temperature creep; ultimate tensile stress.*

УДК 621.316.97

## **РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НАД КАБЕЛЕМ С ПОВРЕЖДЕНИЕМ**

**Кандаев Василий Андреевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: (3812)31-06-94.

**Авдеева Ксения Васильевна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: (3812)31-06-94.

**Слептерева Надежда Константиновна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: (3812)31-06-94.

*В статье приведен расчет напряженности магнитного поля над кабелем с повреждением. Представлена схема замещения цепи «жила – оболочка» с повреждением. Жила и оболочка при этом рассматриваются как две однопроводные линии, нагруженные на волновые сопротивления для исключения отражений. Для данной схемы замещения определено изменение синусоидального сигнала по жиле и оболочке кабеля. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в месте повреждения ток в жиле кабеля значительно изменяется, а на оболочке достигает максимального значения. Рассчитаны значения коэффициента экранирования на разных частотах для алюминиевого сплошного трубчатого и стального спирального проводников, представляющие собой оболочку и броню кабеля. Определена напряженность магнитного поля на поверхности земли над кабелем с металлической оболочкой, имеющим повреждение типа «жила – оболочка», с учетом коэффициента экранирования оболочки. Результаты показывают, что в месте повреждения изоляции между токоведущей жилой и оболочкой модуль напряженности магнитного поля и его фаза получают приращение, которое может быть зафиксировано на поверхности земли. Результаты расчета позволяют усовершенствовать методы и аппаратные средства поиска мест повреждения изоляции кабелей.*

Ключевые слова: экранирование, напряженность магнитного поля, жила кабеля, оболочка кабеля, изолирующий покров.

## CALCULATION OF MAGNETIC FIELD OVER THE CABLE WITH DAMAGED

**Kandaev Vasilii Andreevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of the department «Information and communication systems and information security», OSTU.

Phone: (3812)31-06-94.

**Avdeeva Ksenia Vasilyevna**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., teacher of the department «Information and communication systems and information security», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

**Sleptereva Nadezhda Konstantinovna**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The post-graduate student of the department «Information and communication systems and information security», OSTU.

Phone: (3812)31-06-94.

*The paper presents a calculation of the magnetic field over the cable with damage. The cable with damage is replaced to equivalent circuit «conductor – shield». The conductor and the shield is considered as two single-wire lines, loaded on the characteristic impedance to avoid reflections. For this equivalent circuit defined sine wave signal change in the conductor and the cable shield. These results indicate that in cable fault location conductor current is significantly changed and shield current reaches the maximum value. The values of the shielding factor is determined at different frequencies for the continuous tubular aluminum conductor and steel spiral conductor. The magnetic field is determined on the earth surface over the cable with metal shield having a «conductor – shield» damage taking into account the shielding factor. The results show that the module and phase of magnetic field is incremented in the cable fault location, which can be fixed on the earth surface. The results of calculation will improve the methods and hardware for cable fault location searching.*

Keywords: *shielding factor, magnetic field, cable conductor, cable shield, insulating cover.*

УДК 621.316.993

## **РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТОВ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

**Кремлев Иван Александрович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: ivkreml@mail.ru

**Кондратьев Юрий Владимирович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: juvk.omgups.egt@mail.ru

**Терёхин Илья Александрович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: terekhin\_ilya@mail.ru

*В статье рассмотрен вопрос о возможности использования железобетонных фундаментов опор контактной сети в качестве заземлителей. Выполнен анализ влияния конструкции фундамента на сопротивление растеканию. Представлены результаты расчета сопротивления растеканию анкерного болта фундамента металлической опоры по предложенной формуле.*

Ключевые слова: *разземленные опоры, короткое замыкание, фундамент опор, контактная сеть, заземление, сопротивление растеканию.*

## MODEL DESIGN ELECTRICAL RESISTANCE CONCRETE FOUNDATION SUPPORTS CONTACT SYSTEMS

### **Kremlev Ivan Alexandrovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department « Information and communication systems and information security », OSTU.

E-mail: ivkreml@mail.ru

### **Kondratyev Yuri Vladimirovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department « Information and communication systems and information security », OSTU.

E-mail: juvk.omgups.egt@mail.ru

### **Terekhin Ilya Alexandrovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Post-graduate student of the department « Information and communication systems and information security », OSTU.

E-mail: terekhin\_ilya@mail.ru

*The question of the possibility of using concrete foundations support of a contact network as earthing. The analysis of the impact of the construction of the foundation for the spreading resistance. The results of the calculation of spreading resistance of the anchor bolt foundation metal support on the proposed formula.*

*Keywords: not grounded support, short-circuit, the foundation supports, contact network, grounding resistance spreading.*

УДК 621.317

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЫПАДЕНИЙ ДИСКРЕТИЗИРУЕМОГО СИГНАЛА, ИМЕЮЩИХ МЕСТО ВО ВРЕМЯ КАЛИБРОВКИ АЦП УНИВЕРСАЛЬНОГО СЧЕТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### **Королёва Ксения Андреевна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант, инженер отдела «Нанотехнологии», ОмГУПС.

E-mail: jokie-ksu@mail.ru

### **Грицутенко Станислав Семенович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», руководитель отдела «Нанотехнологии», ОмГУПС.

Тел.: 8-960-983-38-11.

E-mail: st256@mail.ru

*Рассмотрен алгоритм полиномиальной интерполяции для аналого-цифрового преобразователя с длительностью калибровки 1 мс. Приведен пример восстановления пропущенных значений для обеспечения заданной точности обработки входного сигнала.*

Ключевые слова: *интерполяция, аналого-цифровой преобразователь, калибровка.*

## USING OF THE POLINOMIAL INTERPOLATION FOR RECOVERY THE DESPOSITION OF DISCRETE SIGNAL WHICH OCCUR WHEN CALIBRATION ADC

**Koroleva Ksenia Andreevna**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Post-graduate student, engineer of the «Nanotechnology», OSTU.

E-mail: jokie-ksu@mail.ru

**Gritsutenko Stanislav Semenovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department « Information and communication systems and information security », the chief of research-and-production laboratory «Nanotechnology», OSTU.

Phone: 8-960-983-38-11.

E-mail: st256@mail.ru

*This article describes the algorithm for polynomial interpolation analog-to-digital converter with a duration of calibration 1 ms. There is an example of reconstruction the missing values for a given accuracy of processing the input signal.*

Keywords: *interpolation, ADC, calibration.*

УДК 625.12.033.38

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА БАРХАННЫХ ПЕСКОВ, УЛОЖЕННЫХ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО

**Абдукамилов Шавкат Шухратович**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

100167, г. Ташкент, Миробадский район, Республика Узбекистан, ул. Адылходжаева, 1.

Кандидат технических наук, ассистент кафедры «Строительная механика», ТашИИТ.

Тел.: (8-109-98-71) 299-04-13.

E-mail: abdukamilov@mail.ru

*Приведены результаты натурных исследований колебательного процесса земляного полотна, отсыпанного барханными песками. Проведен анализ записей колебаний частиц барханных песков на уровне основной площадки, в теле земляного полотна и за его пределами. Даны результаты исследования изменения значения амплитуд колебаний барханных песков в зависимости от скорости поездов. Выявлена аналитическая зависимость определения затухания колебаний в теле земляного полотна из барханных песков и за его пределами.*

Ключевые слова: *железнодорожный путь, земляное полотно, барханные пески, колебательный процесс, амплитуда колебаний.*

## RESEARCH OF THE OSCILLATORY PROCESS OF SAND DUNES, STOWED IN RAILWAY SUBGRADE

**Abdukamilov Shavkat Shukhratovich**

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).

1, Adilhodjaev str., Tashkent, Mirobad region, 100167, Republik of Uzbekistan.

Ph. D., assistant of the department « Civil mechanics », TashIET.

Phone: (8-109-98-71) 299-04-13.  
E-mail: abdukamilov@mail.ru

*The results of field researches of the oscillatory process subgrade erected with sand dunes. The analysis of the oscillations records of particle of sand dunes at the main field, in the frame and behind of the subgrade. Given findings change of the value of oscillation amplitudes of dunes sand depending on the speed of trains. Analytical dependence of definition of attenuation of fluctuations in a body of subgrade from sand dunes and behind its limits is revealed.*

Keywords: *railway track, subgrade, sand dunes, oscillation, the oscillation amplitude.*

УДК 539.4:518.12

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ**

**Адегова Людмила Алексеевна**

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).  
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика», СГУПС.  
Тел.: +7-953-764-36-65.

E-mail: adegova@mail.ru

**Рудзей Галина Федоровна**

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).  
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация», СГУПС.

Тел.: +7-913-920-57-42.

E-mail: galina\_rudzey@mail.ru

*Представлена усовершенствованная методика численного прогнозирования усталостной долговечности элементов конструкций с использованием модифицированных кривых усталости, учитывающих влияние конструктивно-технологических особенностей изделий реальной конструкции. Приведены результаты расчетной оценки сопротивления усталости тонкостенных конструкций и сравнение их с экспериментальными данными.*

Ключевые слова: *усталостная долговечность, напряженно-деформированное состояние, конструктивно-технологические факторы, коэффициенты коррекции, модифицированная кривая усталости.*

## **FORECASTING CALCULATED FATIGUE LIFE OF STRUCTURAL ELEMENTS USING THE MODIFIED FATIGUE CURVES**

**Adegova Ludmila Alexeevna**

Siberian State Transport University (SSTU).  
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Structural Mechanics», SSTU.

Phone: +7-953-764-36-65.

E-mail: adegova@mail.ru

**Rudzey Galina Fedorovna**

Siberian State Transport University (SSTU).

191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.

Dr. Sci. Tech., the professor of the department «Electrical, diagnostics and certification», SSTU.

Phone: +7-913-920-57-42.

E-mail: galina\_rudzey@mail.ru

*Evaluation of fatigue life is based on the use of basic fatigue curves. However, due to large variety of possible design solutions basic fatigue curves cannot be calculated for all cases. In addition, the production practice has a significant influence on the durability of structural elements. To predict the fatigue durability using the traditional method we need to consider the influence of structural and technological factors by introducing the correction coefficients established on the basis of the experience and accumulated experimental data. The correction coefficients are widely used in calculating the resource elements by domestic and foreign construction firms. Using the traditional method the match of the projected longevity and durability resulted in a bench test structures are not always satisfactory. Often by conducting rapid analysis the sufficient fatigue curves absent, the closest in characteristics among the available are selected. The article presents the improved technique of numerical fatigue life prediction of structural elements by using the modified fatigue curves, considering the impact of structural and technological features of the products of the actual design. The results of calculated estimate of the resistance of fatigue thin-walled structures and their comparison with experimental data are presented. On the basis of the work carried out was drawn the conclusion that by using the method of calculation of fatigue longevity using modified fatigue curves, considering the structural features fragments of products, the convergence of the results of predicting fatigue life and test bench results obtained higher than by using traditional techniques.*

Keywords: *fatigue life, deflected mode, the design and technological features, the correction factors, the modified fatigue curve.*

УДК 658.5

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ ШУМО-, ВИБРОЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПассаЖИРСКИХ ВАГОНОВ ЛОКОМОТИВНОЙ ТЯГИ**

**Аксенов Владимир Алексеевич**

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ).

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, строение 9.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность», МИИТ.

**Юдаева Оксана Сергеевна**

Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожной гигиены (ВНИИЖГ Роспотребнадзора).

125438, г. Москва, Пакгаузное шоссе, 1/1.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Коммунальная гигиена и эпидемиология», руководитель ИЦ «Экологическая сертификация», ВНИИЖГ Роспотребнадзора.

Тел.: (499) 153-77-59.

E-mail: vniihg@yandex.ru

**Егорова Оксана Гаптерезаковна**

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ).

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, строение 9.

Аспирант кафедры «Техносферная безопасность», МИИТ.

Тел.: 8-926-387-68-98.

## **Гладаренко Алла Сергеевна**

Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожной гигиены (ВНИИЖГ Роспотребнадзора).

125438, г. Москва, Пакгаузное шоссе, 1/1.

Инженер лаборатории «Коммунальная гигиена и эпидемиология», ВНИИЖГ Роспотребнадзора.

*В статье рассмотрены современные шумо-, виброзащитные материалы для вагоностроения. Проведены сравнительные исследования звукопоглощающих свойств материала из арамидного волокна и экологически безопасного материала НОЛ-1А(Б). Экспериментально установлено снижение уровня шума в помещениях пассажирских вагонов за счет использования современных материалов.*

Ключевые слова: шумо-, виброзащитные материалы, экологически безопасный материал НОЛ-1А, пассажирский вагон.

## **ERSPECTIVE ECOLOGICALLY SAFE SHUMO-VIBROPROTECTIVE MATERIALS FOR CARS OF LOCOMOTIVE DRAFT**

### **Aksenov Vladimir Alekseevich**

Moscow State Transport University (MSURE).

9-9, Obraztsova Str., 127994, Moscow, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor, head of the department «Technosphere Safety», MSURE.

### **Yudaeva Oksana Sergeevna**

All-Russian Scientific Research Institute of Railway Hygiene (VNIIZHG Rospotrebnadzora).

1/1, Pakgauznoe highway, Moscow, 125438, Russia.

Ph. D., senior researcher of laboratory «Communal Hygiene and Epidemiology», head of IC «Environmental Certification», VNIIZHG Rospotrebnadzora.

Phone: (499) 153-77-59.

E-mail: vnijg@yandex.ru

### **Egorova Oksana Gapterazakovna**

Moscow State Transport University (MSURE).

9-9, Obraztsova Str., 127994, Moscow, Russia.

Post-graduate student of the department «Technosphere Safety», MSURE.

Phone: 8-926-387-68-98.

### **Gladarenko Alla Sergeevna**

All-Russian Scientific Research Institute of Railway Hygiene (VNIIZHG Rospotrebnadzora).

1/1, Pakgauznoe highway, Moscow, 125438, Russia.

Engineer of laboratory «Communal Hygiene and Epidemiology», VNIIZHG Rospotrebnadzora.

*Article considers modern shumo-vibroprotective materials for car building.*

*Security measure of the person from vibration in cars are constructive improvements, application of means of external vibroprotection by uprugodempfiruyushchy materials and devices which take place between a source of vibration and the person, and also continuous control of serviceability of cars and their timely scheduled preventive repair as in use and wear there is an expressed strengthening of vibration.*

*Considering that constructional features of cars provide compliance "To health regulations on the organization of passenger traffic on railway transport" in the course of formation of structures and at operation of cars there are the technical problems caused by aging (technical wear) cars, a detsentrovka, defects of a way, etc. that leads in practice to deterioration of an acoustic mode of internal rooms of cars.*

*Comparative researches of sound-absorbing properties of a material from aramide fiber and ecologically safe material NOL-1A(B) are conducted. Decrease in noise levels in rooms of cars, due to use of modern materials is experimentally established.*

*NO-L-1A use in a design of air ducts of cars of locomotive draft allows to reduce considerably noise level in rooms, and to raise ecological characteristics of cars.*

Keywords: *shumo-vibroprotective materials, ecologically safe material NOL-1A, car.*

УДК 629.4.027.52: 510.662: 510.56

## **ВНЕДРЕНИЕ КОЛЕС ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ – ОДИН ИЗ ИННОВАЦИОННЫХ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Галиев Ильхам Исламович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Президент ОмГУПСа, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-42-19.

**Гателюк Олег Владимирович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-16-88.

**Лукс Дмитрий Юрьевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-42-19.

*Выполнен анализ развития колес повышенной твердости на примере определенных заводов-изготовителей, а также изменения нормативно-технической документации на изготовление (ГОСТ). Осуществлен математический анализ сравнения эксплуатации колесных пар обычной твердости с колесными парами повышенной твердости на основе поступления грузовых вагонов от момента производства до внепланового текущего ремонта. Для сравнения применялись методы Крамера – Уэлча и функция Лапласа. Произведена оценка среднего пробега вагонов на различных типах колесных пар грузовых вагонов и технологии производства. Сформулированы основные преимущества колесных пар повышенной твердости.*

Ключевые слова: *колесная пара, оценка вагонов, математический анализ, пробег вагонов, технология изготовления, основные преимущества.*

## **THE INTRODUCTION OF HIGH HARDNESS WHEELS – ONE OF THE INNOVATIVE WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF FREIGHT WAGONS IN OPERATION**

**Galiev Ilham Islamovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

President of OSTU, honored scientist of RF, Dr. Sci. Tech., professor, head of the department «Theoretical mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-42-19.

**Gatelyuk Oleg Vladimirovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., senior lector of the department «Higher mathematics», OSTU.

Phone: (3812) 31-16-88.

**Loucks Dmitriy Yurevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Post-graduate student of the department «Theoretical mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-42-19.

*The analysis of the development of the wheels increased hardness on the example of certain manufacturers, and changing regulatory and technical documentation for production (GOST). A mathematical analysis of the comparison operation wheelsets normal hardness of the wheel pairs of high hardness, based on the receipt of freight wagons from production to unscheduled maintenance. For comparison methods were used: Cramer – Welch and Laplace function. The estimation of average mileage of cars on different types of wheel sets of freight cars and production technology. Developed the basic advantages of high hardness wheelsets.*

*Keywords: wheelset uncoupling cars, mathematical analysis, wagon journeys manufacturing techniques, the main advantages.*

УДК 621.311.001.57

## **О ПОДХОДАХ К ОЦЕНКЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ, ДОСТИГАЕМОЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСЕРВИСНЫХ ДОГОВОРОВ**

**Комяков Александр Анатольевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru

**Никифоров Михаил Михайлович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энерго-сберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

**Эрбес Виктор Владимирович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: erbes-viktor@mail.ru

*В работе предложен подход к оценке фактической экономии энергетических ресурсов, достигаемой при реализации энергосервисных договоров, основанный на разработке математической модели электропотребления, учитывающей влияние производственных и кли-*

*математических факторов. Рассмотрен пример расчета фактической эффективности внедрения энергосберегающего устройства на Свердловской железной дороге.*

Ключевые слова: *энергосервисный договор, энергетическая эффективность, математическое моделирование, уравнение регрессии.*

## **ABOUT APPROACHES TO THE EVALUATION OF ACTUAL ENERGY SAVINGS, ACHIEVED FOR REALIZATION OF SERVICE CONTRACTS ENERGY**

### **Komyakov Alexandr Anatolievich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru

### **Nikiforov Michael Michailovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the head of the scientific and industrial laboratory of energy saving technologies and EMC, OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

### **Erbes Viktor Vladimirovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The post-graduate student of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: erbes-viktor@mail.ru

*An approach to the evaluation the actual energy savings achieved when implementing service contracts energy, based on the development of mathematical models of power consumption, taking into account the impact of production and climatic factors. An example of the calculation of the actual efficiency of introduction of energy-saving devices at the Sverdlovsk railway is presented.*

Keywords: *energy performance contract, energy efficiency, mathematic modeling, regression equation.*

УДК 614

## **АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТРУДА И ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ ПРОВОДНИКОВ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ**

### **Юдаева Оксана Сергеевна**

Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожной гигиены (ВНИИЖГ Роспотребнадзора).

125438, г. Москва, Пакгаузное шоссе, 1/1.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Коммунальная гигиена и эпидемиология», руководитель ИЦ «Экологическая сертификация», ВНИИЖГ Роспотребнадзора.

Тел.: (499) 153-77-59.

E-mail: vniihg@yandex.ru

*Статья рассматривает обеспечение условий труда проводников пассажирских вагонов. В связи с появлением новых полимерсодержащих конструкционных и отделочных материалов во внутреннем оборудовании вагона в воздушную среду помещений поступает значительное количество химических веществ, которые могут представлять опасность для проводников и пассажиров при штатных условиях эксплуатации вагона.*

Ключевые слова: *проводники пассажирских вагонов, условия труда.*

## ANALYSIS OF WORKING CONDITIONS AND INCIDENCE OF CONDUCTORS CARS

**Yudaeva Oksana Sergeevna**

All-Russian Scientific Research Institute of Railway Hygiene (VNIIZHG Rospotrebnadzora).

1/1, Pakgauznoe highway, Moscow, 125438, Russia.

Ph. D., senior researcher of laboratory «Communal Hygiene and Epidemiology», head of IC «Environmental Certification», VNIIZHG Rospotrebnadzora.

Phone: (499) 153-77-59.

E-mail: vniihg@yandex.ru

*Article considers the analysis of working conditions of conductors of cars. Major harmful and adverse production factors inherent in this profession: vibration, noise, dust content, chemicals, adverse microbiological atmosphere. Work of conductors belongs to category of «travelling» professions, and, bigger number of conductors are occupied on long trips, moving during 3 and more (till 7 days). The incidence structure also has a number of differences: at conductors of cars diseases of respiratory organs, bodies of blood circulation, bone and muscular system, a trauma and allergic diseases prevail. Diseases of respiratory system at conductors make more than a half of all cases of temporary disability and meet mainly in the form of ORZ, rhinitises, bronchitis and pneumonia that indicates the need of regulation and normalization of the air environment of the car which is object of long stay and a conductor workplace.*

Keywords: *conductors of cars, working conditions.*

## Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог;
- транспортная энергетика;
- информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
- путь и искусственные сооружения;
- управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
- организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: izvestia\_transsiba@mail.ru

### Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

#### В редакцию журнала представляются:

текст статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

название статьи, аннотация, ключевые слова (5 – 10 слов), название тематического раздела журнала, в который представляется статья (в отдельном файле – на русском и английском языках);

сведения об авторах в отдельном файле на русском и английском языках (фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи);

один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

#### Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

дополнительно англоязычная аннотация должна быть: оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычной» (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

#### Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию (по центру, 11 пт), название статьи (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54-57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редколлегия оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Бородин Анатолий Васильевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
2. Ведрученко Виктор Родионович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
3. Горюнов Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, ОмГТУ (Омск).
4. Гончар Игорь Иванович – д.ф.-м.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
5. Демин Юрий Васильевич – д.т.н., профессор, НГАВТ (Новосибирск).
6. Ермоленко Дмитрий Владимирович – д.т.н., доцент, ВНИИЖТ (Москва).
7. Кандаев Василий Андреевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
8. Костюков Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, НИПЦ «Динамика» (Омск).
9. Кузнецов Андрей Альбертович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
10. Лебедев Виталий Матвеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
11. Медведев Владимир Ильич – д.т.н., профессор, СГУПС (Новосибирск).
12. Митрохин Валерий Евгеньевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
13. Мочалин Сергей Михайлович – д.т.н., профессор, СибАДИ (Омск).
14. Нехаев Виктор Алексеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
15. Николаев Виктор Александрович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
16. Рауба Александр Александрович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
17. Сафронов Эдуард Алексеевич – д.т.н., профессор, СибАДИ (Омск).
18. Сидоров Олег Алексеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
19. Сидорова Елена Анатольевна – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
20. Сковородников Евгений Иванович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
21. Харламов Виктор Васильевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
22. Четвергов Виталий Алексеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
23. Шпалтаков Владимир Петрович – д.э.н., профессор, ОмГУПС (Омск).

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г. Свидетельство о регистрации – ПИ № ФС77-36469.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Роспечать» – 66087.

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;  
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia\_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 26.06.2014.

Тираж 500 экз.

EDITORIAL BOARD

1. Borodin Anatoly Vasilyevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
2. Vedruchenko Viktor Rodionovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
3. Gorjunov Vladimir Nikolaevich – D. Sc., professor, OmSTU (Omsk).
4. Gonchar Igor Ivanovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
5. Demin Yury Vasilyevich – D. Sc., professor, NSAWT (Novosibirsk).
6. Ermolenko Dmitry Vladimirovich – D. Sc., associate professor, JSC «VNIIZhT» (Moscow).
7. Kandaev Vasily Andreevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
8. Kostjukov Vladimir Nikolaevich – D. Sc., professor, SPC «The dynamics» (Omsk).
9. Kuznetsov Andrey Albertovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
10. Lebedev Vitaly Matveevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
11. Medvedev Vladimir Ilyich – D. Sc., professor, SSTU (Novosibirsk).
12. Mitrokhin Valery Evgenyevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
13. Mochalin Sergey Mikhailovich – D. Sc., professor, SibADI (Omsk).
14. Nekhaev Viktor Alexeevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
15. Nikolaev Viktor Alexandrovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
16. Rauba Alexander Alexandrovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
17. Safronov Edward Alexeevich – D. Sc., professor, SibADI (Omsk).
18. Sidorov Oleg Alexeevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
19. Sidorova Elena Anatolyevna – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
20. Skovorodnikov Evgeny Ivanovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
21. Kharlamov Viktor Vasilyevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
22. Chetvergov Vitaly Alexeevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
23. Shpaltakov Vladimir Petrovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).

