

УДК 629.424.24

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА СЕРИИ ДРБ1 ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Л. В. ОГОРОДНИКОВ**

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель*

**А. В. ПУТЯТО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Приведены результаты экспериментальных исследований напряженного состояния несущих конструкций кузовов головного и промежуточного вагонов дизель-поезда серии ДРБ1 после длительной эксплуатации. Получены массивы динамических напряжений в конструктивных элементах кузовов вагонов при различных эксплуатационных режимах нагружения. Установлено, что значения амплитудных напряжений не превышают допустимого уровня, регламентированного нормативной документацией. Полученный массив экспериментальных данных может быть использован для оценки остаточного ресурса несущих конструкций вагонов после длительной эксплуатации.*

**Ключевые слова:** дизель-поезд, несущая конструкция, срок службы, прочность, напряжения, испытания, тензометрия, ресурс.

**EXPERIMENTAL ESTIMATE OF THE STRESS STATE OF THE LOAD-BEARING STRUCTURES OF THE DIESEL TRAIN OF THE DRB1 SERIES AFTER CONTINUOUS EXPLOITATION**

**L. V. OGORODNIKOV**

*Educational Institution "Belarusian State University of Transport", Gomel*

**A. V. PUTSIATA**

*Educational Institution "Sukhoi State Technical University of Gomel", the Republic of Belarus*

*The article presents the results of experimental studies of the stress state of the load-bearing structures of the bodies of the head and intermediate cars of the diesel train of the DRB1 series after continuous exploitation. Arrays of dynamic stresses are obtained in structural elements of car bodies at various operating loading modes. It was established that the values of amplitude stresses do not exceed the permissible level regulated by the regulatory documentation. The obtained array of experimental data can be used to estimate the residual life of load-bearing structures of cars after continuous exploitation.*

**Keywords:** diesel train, load-bearing structure, service life, strength, stresses, tests, tensometry, service life.

**Введение**

Перевозка пассажиров в пригородных направлениях на неэлектрифицированных линиях осуществляется главным образом дизель-поездами, в частности, серии ДРБ1. Состав дизель-поезда формируется из немоторных головных и прицепных вагонов,

общий вид которых приведен на рис. 1. В настоящее время в эксплуатации на Белорусской железной дороге находится 105 вагонов дизель-поездов типа ДРБ1, из которых 83 единицы – модель 63-367 (прицепные) и 22 – модель 63-368 (головные).



Рис. 1. Общий вид головного и прицепного вагонов дизель-поезда серии ДРБ1

Вагоны инвентарного парка дизель-поездов имеют различный срок эксплуатации и для ряда единиц он достигает 50 лет. В то же время нормативный срок службы таких вагонов, установленный заводом-изготовителем, составляет 20 лет, а назначенный к настоящему времени – 35 лет. Таким образом, требуется либо замена имеющегося парка вагонов на новые, либо обоснование возможности их дальнейшей безопасной эксплуатации. Учитывая необходимость обеспечения бесперебойной перевозки пассажиров, а также сложность единовременного омоложения парка дизель-поездов, задача научного обоснования возможности дальнейшей эксплуатации указанных вагонов является крайне актуальной.

Процедура оценки остаточного ресурса несущих конструкций нашла широкое применение при обосновании безопасной эксплуатации железнодорожного подвижного состава, нормативный срок службы которых истек. Так, в процессе длительной эксплуатации подвижного состава возникают коррозионные повреждения несущих элементов кузовов, вследствие чего происходит изменение геометрических характеристик сечений, а следовательно, и прочности кузова в целом. В этом случае для обоснования продления срока службы кузовов вагонов возникает необходимость прогнозирования их остаточного ресурса.

Среди основоположников этого направления следует отметить работы [13, 17]. Так, достаточно широко вопросы продления срока службы вагонов отражены в монографии А. В. Третьякова [17]. Автором предложен расчетно-экспертно-статистический метод (РЭС-метод) управления индивидуальным ресурсом вагона в эксплуатации. Отметим, что расчетно-экспериментальный подход нашел весьма широкое применение при научном обосновании остаточного ресурса многих типов и моделей вагонов. В работе А. Воико [18] на основании расчетов прочности, а также по критерию многоциклового усталости выполнена оценка остаточного ресурса и предложены конструктивные решения по усилению несущей конструкции рамы вагона-цистерны для перевозки нефтепродуктов. В работе М. В. Зимаковой [5] оценку остаточного ресурса вагонов-цистерн предлагается выполнять с учетом изменения ударной вязкости материала несущей конструкции. При этом учитывалась динамика изменения ударной вязкости в зависимости от времени и климатических условий эксплуатации вагона-цистерны, а также коррозионный износ.

В трудах М. Б. Кельриха, Н. С. Брайковской, П. Н. Прокопенко [7] также применен расчетно-экспериментальный метод оценки ресурса, основанный на теории линейного суммирования повреждений по критерию многоциклового усталости материала, но с учетом различных конструктивных особенностей вагонов-цистерн, в частности, рамного и безрамного исполнения, наличия шпангоутов и т. п.

Среди работ, связанных с оценкой остаточного ресурса кузовов пассажирских вагонов, следует также отметить исследования В. И. Сенько и его учеников [16], где за основной критерий, определяющий ресурс, принимался коррозионный износ. В работе приведены исследования поэтапного влияния коррозионного износа материала на несущую способность кузовов пассажирских вагонов. В качестве объектов исследования были выбраны кузова пассажирских вагонов после истечения нормативного срока службы. В работе предложена дифференцированная оценка предельных значений толщины основных элементов кузовов. При этом в качестве предельного состояния элементов кузова предлагается считать потерю их несущей способности – прочности или устойчивости. Вопросы оценки ресурса и продления сроков службы различных моделей пассажирских вагонов рассмотрены также в [6, 15].

В работах [1, 8] для оценки и прогнозирования ресурса несущих конструкций вагонов предлагается использовать методы компьютерного моделирования, позволяющие смоделировать более широкий спектр динамических нагрузок на вагон. В то же время в диссертационной работе [9] отмечено, что, несмотря на постоянное совершенствование методов прочностных расчетов, имеют место конструктивные области, где расчетную оценку остаточного ресурса выполнить затруднительно. Поэтому экспериментальные оценки подвижного состава являются единственным методом подтверждения конструкции подвижного состава нормативным требованиям. В работе проведен сравнительный анализ результатов прочностных расчетов с экспериментальными результатами комплексных нормативных испытаний кузовов пассажирских вагонов после ремонта.

Достаточно большое число научных разработок посвящено продлению срока службы тягового подвижного состава [4, 10, 14, 19], в том числе вагонов метрополитена [2]. Результаты приведенных выше исследований показывают, что простое продление срока службы реализуется только в случае неполного израсходования остаточного ресурса. Значительно чаще для продления срока службы требуется проведение дополнительных ремонтных или модернизационных работ, в том числе и в связи с моральным старением подвижного состава. Следует отметить, что выводы о необходимости усиления и восстановления металлоконструкций вагонов диктуются отсутствием или потребностью увеличения остаточного ресурса ввиду неудовлетворительного технического состояния несущих конструкций подвижного состава, наряду с высокой интенсивностью его эксплуатации.

Таким образом, анализ публикаций, посвященных проблеме оценки остаточного ресурса несущих конструкций железнодорожного подвижного состава, позволяет предложить следующие этапы работ для оценки ресурса несущих конструкций вагонов дизель-поезда:

- изучение технической документации, условий эксплуатации, анализ информации по проведению технических освидетельствований и ремонтов вагонов;
- разработка диагностических карт несущих конструкций вагонов, выполнение визуального контроля, измерение толщин элементов конструкций, контроль сварных швов и основного металла, отбраковка вагонов, а также отбор образцов с худшим техническим состоянием для проведения испытаний;

- разработка компьютерных моделей и выполнение виртуальных испытаний вагонов с учетом фактических значений толщин элементов конструкций для определения соответствия деградированной конструкции требованиям актуальной нормативной документации;
- установление фактических значений физико-механических характеристик материалов несущих конструкций;
- проведение натурных контрольных испытаний несущих конструкций вагонов при характерных режимах нагружения;
- оценка остаточного ресурса несущих конструкций вагонов.

Таким образом, одним из этапов работы по оценке остаточного ресурса вагонов после длительной эксплуатации является экспериментальная оценка напряженного состояния их несущих конструкций, что и является целью настоящей работы.

### Режимы нагружения и применяемое оборудование

Выполнение экспериментальных исследований осуществлено специалистами испытательного центра железнодорожного транспорта Белорусского государственного университета транспорта (БелГУТ). По результатам анализа технического состояния и условий эксплуатации рассматриваемых типов вагонов и специфики их эксплуатации принято решение в качестве испытательных рассмотреть три варианта нагружения: растяжение и сжатие; соударение вагонов; движение в составе поезда (сброс с клиньев).

Целью испытаний на растяжение и сжатие является проверка металлоконструкции вагона на прочность при двух нормируемых режимах нагружения, которым соответствуют сочетания сил, действующих на вагон при торможении и разгоне состава, движущегося в кривом участке пути. Сочетания продольных сил, возникающих при поездной или маневровой работе на пониженных скоростях и экстренных торможениях, рывках, осаживании соответствуют I режиму нагружения, а при нормальных скоростях движения и служебных торможениях – III режиму. Согласно таблице 2.1 [12] для I режима нагружения продольные растягивающие силы для пассажирских вагонов составляют 1000 кН, а сжимающие – 2000 кН. Для III режима нагружения продольные растягивающие и сжимающие силы для пассажирских вагонов – 1000 кН. Испытания проводились на стенде, оборудованном гидравлическим нагружающим устройством. Нагрузка прикладывалась ступенчато. Полный цикл нагружения при сжатии производился по схеме: 0, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 2000, 1500, 1000, 500, 0 кН. Полный цикл нагружения при растяжении производился по схеме: 0, 500, 1000, 1500, 1000, 500, 0 кН. Испытания для каждого вида нагружения производились по три раза, окончательное значение принимали как среднеарифметическое.

Целью испытаний на соударение является проверка металлоконструкции вагона на прочность при силовых нагружениях, действующих на вагон в случае осаживания состава вагонов или роспуске с сортировочных горок. Ударные испытания выполнялись путем соударения вагона-бойка с испытываемым вагоном, установленным перед вагонами подпора по схеме, представленной на рис. 2.

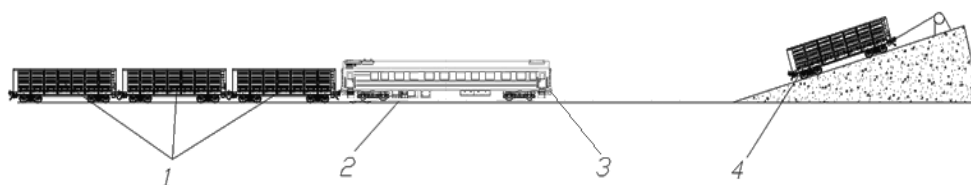


Рис. 2. Схема расстановки вагонов при проведении ударных испытаний:  
1 – вагоны подпора, 2 – испытываемый вагон, 3 – тензометрическая автосцепка, 4 – вагон-боек

При имитации режима движения в составе поезда путем сброса вагона с клиньев определяются амплитудные значения напряжений в металлоконструкции и коэффициент динамики обрессоренных частей вагона.

Перечень использованных при испытаниях средств измерений и оборудования приведен в таблице.

**Сведения о средствах измерений и оборудовании**

Наименование определяемой характеристики	Наименование средства измерения (оборудования)
Величина сил, действующих на объект испытаний. Величина напряжений в объекте испытаний	Стенд для сертификационных испытаний прочностных характеристик вагонов ЧР 3422-00
	Тензометрическая автосцепка СА-3
	Вагон-боек (полувагон)
	Усилитель измерительный MGCplus RU
Измерение скорости движения вагона-бойка	Секундомер механический СОС пр.2б-2-000
Измерение температуры окружающей среды	Комбинированный прибор Testo 610
Измерение прогиба рессорного подвешивания	Датчик перемещений
Массовые показатели вагона	Весы вагонные тензометрические ПУЛЬСАР ВТБ-2ДБ

**Разработка схем установки тензометрических датчиков**

Схемы установки тензометрических датчиков разработаны на основе анализа напряженно-деформированного состояния металлоконструкций кузовов головного и прицепного вагонов, выполненного методом конечных элементов при силовых режимах нагружения, имеющих место в эксплуатации. Комплекс расчетов выполнен с учетом фактических значений толщин элементов металлоконструкций, полученных по результатам технического диагностирования кузовов вагонов после длительной эксплуатации, что позволило выявить наиболее нагруженные конструктивные области. При принятии решения об установке тензодатчиков наряду с результатами расчетов и технического диагностирования металлоконструкций вагонов использованы рекомендации [3]. На рис. 3 и 4 приведены разработанные схемы установки тензометрических датчиков в контрольных точках металлоконструкции. Экспериментальной оценке напряженного состояния подвергались вагоны с наихудшим техническим состоянием, отобранные специалистами отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» БелГУТа.

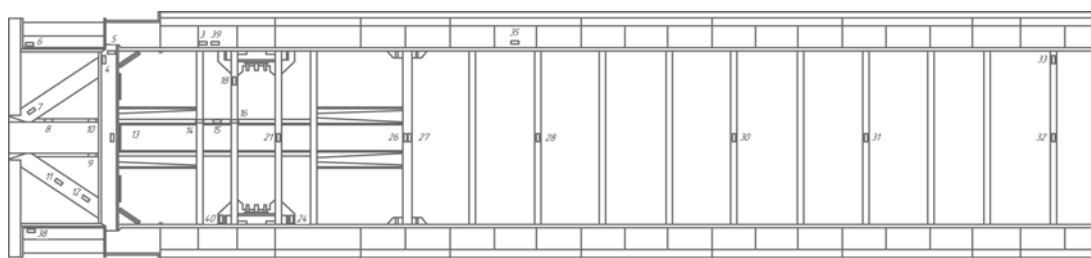


Рис. 3. Схема установки тензометрических датчиков на раме головного вагона

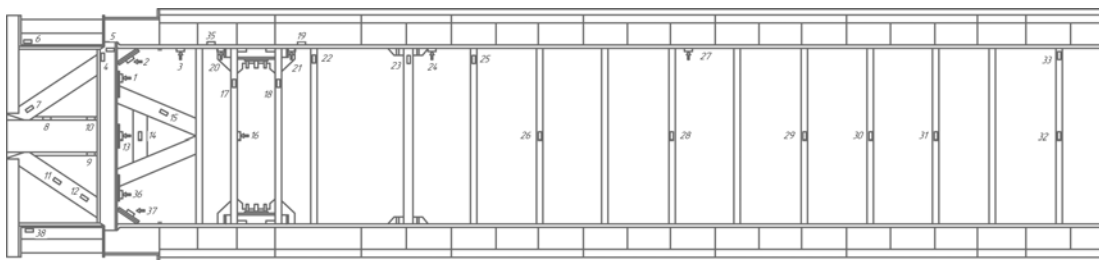


Рис. 4. Схема установки тензометрических датчиков на раме прицепного вагона

Фрагменты расположения тензодатчиков на несущей металлоконструкции вагона дизель-поезда приведены на рис. 5.



Рис. 5. Расположение тензодатчиков на металлоконструкции вагона

### Результаты экспериментальной оценки напряженного состояния

Полученные напряжения при действии сжимающей и растягивающей нагрузок для наиболее нагруженных контрольных областей несущих конструкций вагонов приведены на рис. 6.

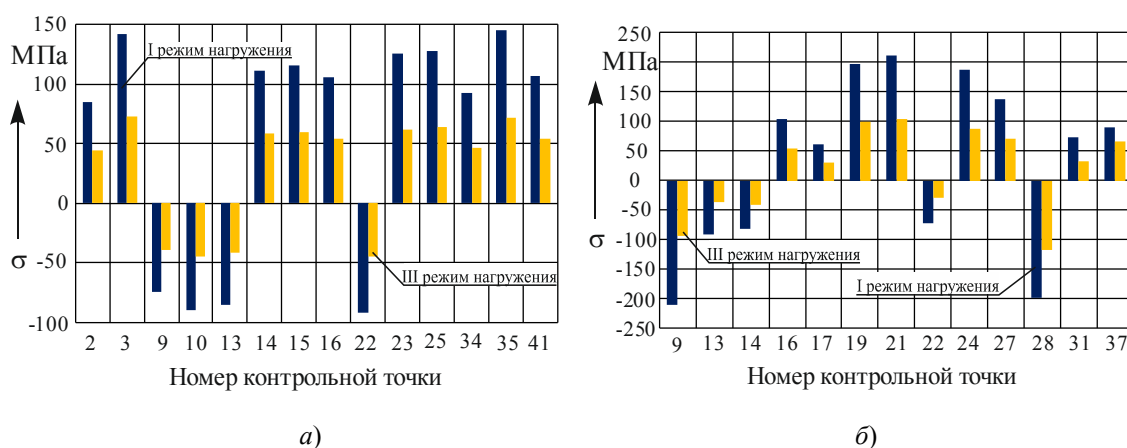


Рис. 6. Диаграмма распределения максимальных напряжений в несущей конструкции головного (а) и прицепного (б) вагонов

По результатам испытаний на растяжение и сжатие установлено:

– для несущей конструкции головного вагона: максимальные напряжения по I режиму при растяжении составили 79,7 МПа (контрольная точка 3, область сочленения первой поперечной балки с продольной), при сжатии – 145,2 МПа (контрольная точка 35, область сочленения седьмой поперечной балки с продольной); максимальные напряжения по III режиму при сжатии – 73,0 МПа (контрольная точка 3, область сочленения первой поперечной балки с продольной);

– для несущей конструкции прицепного вагона: максимальные напряжения по I режиму при растяжении составили 144,1 МПа (контрольная точка 35, область сочленения первой поперечной балки с продольной), при сжатии – 211 МПа (контрольная точка 21, область сочленения третьей поперечной балки с продольной); максимальные напряжения по III режиму при сжатии – 186,3 МПа (контрольная точка 3, область сочленения первой поперечной балки с продольной).

Полученные экспериментальные значения не превышают допускаемых величин.

В результате ударных испытаний получены амплитудные значения напряжений в элементах металлоконструкции вагонов. Так, при значении силы удара 2000 кН амплитудные значения напряжений приведены на рис. 7.

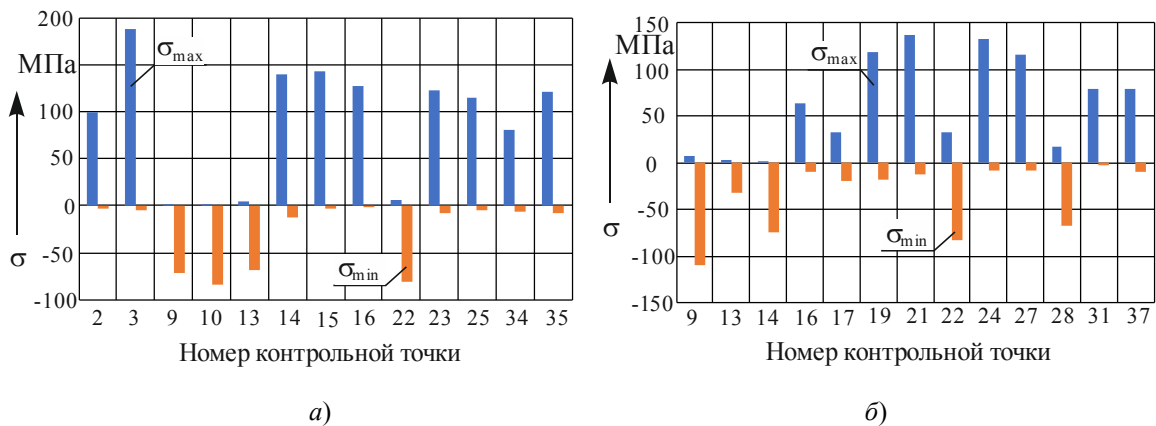


Рис. 7. Диаграмма распределения максимальных напряжений на раме головного (а) и прицепного (б) вагонов

Изменение амплитудных значений напряжения от величины силы удара для характерных контрольных точек металлоконструкции показано на рис. 8.

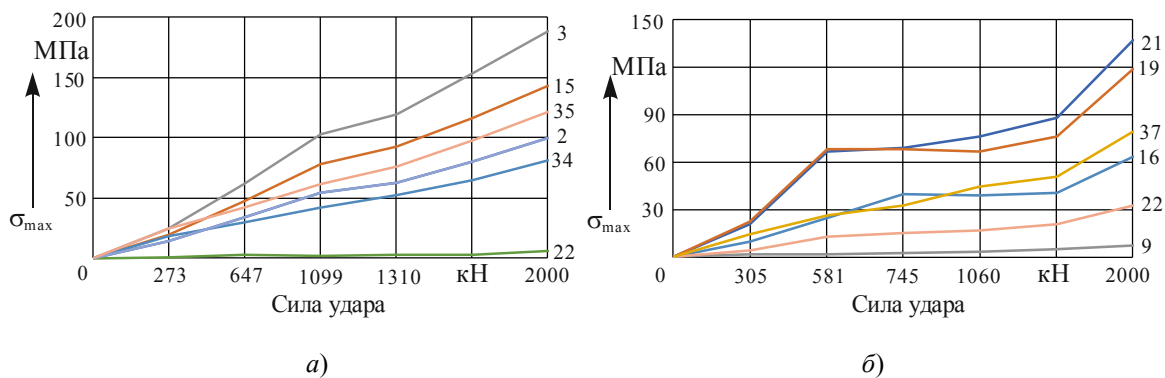


Рис. 8. График изменения максимальных напряжений в различных точках головного (а) и прицепного (б) вагонов

По результатам ударных испытаний при различных силах соударения до максимального, равного 2000 кН, установлено:

– для металлоконструкции головного вагона получены амплитудные значения напряжений, максимальное значение которых не превысило 188,3 МПа (контрольная точка 3, область сочленения первой поперечной балки с продольной);

– для металлоконструкции прицепного вагона получены амплитудные значения напряжений, максимальное значение которых не превысило 136,8 МПа (контрольная точка 21, область сочленения третьей поперечной балки с продольной).

Следует отметить, что результаты испытаний приведены без учета напряжений, возникающих от загрузки вагона. Полученные экспериментальные значения не превышают допускаемых величин.

На рис. 9 приведены результаты экспериментальной оценки амплитудных значений напряжений несущих конструкций вагонов при сбросе с клиньев при установленном коэффициенте вертикальной динамики подрессоренных частей вагонов  $K_{дв} = 0,3$ .

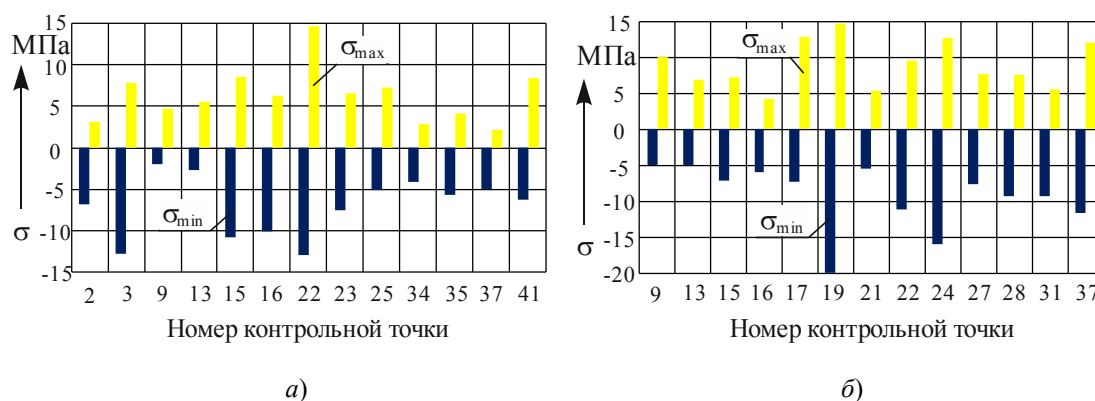


Рис. 9. Диаграмма распределения амплитудных значений напряжения на раме головного (а) и прицепного (б) вагонов

По результатам испытаний сброса вагонов с клиньев установлено:

– в металлоконструкции головного вагона максимальные напряжения составили 21,8 МПа (контрольная точка 19, средняя часть второй поперечной балки);

– в металлоконструкции прицепного вагона – 24,4 МПа (контрольная точка 23, область сочленения пятой поперечной балки с продольной).

### Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

1. Предложен порядок работ для оценки ресурса несущих конструкций вагонов дизель-поезда, включающий пять этапов.

2. На основе результатов технического диагностирования и комплекса расчетов на прочность металлоконструкций головного и прицепного вагонов разработаны схемы установки тензометрических датчиков для проведения натурных испытаний.

3. Выполнены экспериментальная оценка прочности несущих конструкций прицепного и головного вагонов дизель-поезда серии ДРБ1 при характерных режимах нагружения.

4. Установлено, что значения полученных напряжений не превышают допускаемого уровня, регламентированного нормативной документацией.

5. Полученные результаты экспериментальных исследований напряженного состояния могут быть использованы для определения остаточного ресурса металлоконструкций вагонов дизель-поездов после длительной эксплуатации.



## Литература

1. Антипин Д. Я. Прогнозирование ресурса рамы универсального вагона-платформы с использованием современных элементов САПР / Д. Я. Антипин, А. М. Высоцкий, Е. В. Колчина // САПР и моделирование в современной электронике : сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 24–25 окт. 2018 г. / Бр. гос. техн. ун-т ; под ред. Л. А. Потапова, А. Ю. Дракина. – Брянск, 2018. – С. 3–6.
2. Борисов, С. В. Прогнозирование остаточного ресурса и продление срока службы вагонов метрополитена : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.77 / С. В. Борисов ; ПГУПС. – СПб., 2006. – 168 с.
3. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества : РД 24.050.37–95. – Введ. 02.02.95. – М. : ГосНИИВ, 1995. – 101 с.
4. Григорьев, П. С. Прогнозирование остаточного ресурса рам промышленных тепловозов : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / П.С. Григорьев ; МГУПС. – М., 2016. – 150 с.
5. Зимакова, М. В. Продление срока службы вагонов-цистерн с учетом изменения физико-механических свойств металлоконструкций базовых узлов: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / М. В. Зимакова ; ПГУПС. – СПб., 2012. – 144 с.
6. Дэмбэрэлсурен, О. Оценка остаточного ресурса и продление сроков службы пассажирских вагонов УБЖД / О. Дэмбэрэлсурен // Современ. технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 3 (43). – С. 97–103.
7. Кельрих, М. Б. Особенности проведения исследований по продлению назначенного срока службы вагонов-цистерн для перевозки легких порошкообразных грузов / М. Б. Кельрих, Н. С. Брайковская, П. Н. Прокопенко // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2019. – С. 158–160.
8. Кобищанов, В. В. Оценка усталостной долговечности сварных несущих конструкций вагонов с учетом живучести / В. В. Кобищанов, Д. Я. Антипин // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 14–17.
9. Коршунов, С. Д. Совершенствование методов оценки несущей способности и остаточного ресурса кузовов пассажирских вагонов после ремонта : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / С. Д. Коршунов. – Брянск, 2014. – 171 с.
10. Модернизация маневровых тепловозов с продлением срока службы / Г. М. Волохов [и др.] // Локомотив. – 2019. – № 4 (748). – С. 32–34.
11. Нормы для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена колеи 1520 мм / СТО СДС ОПЖТ. – М., 2010. – 120 с.
12. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 317 с.
13. О корректировке «Положения о продлении срока службы грузовых вагонов, курсирующих в международном сообщении» / Ю. П. Бороненко [и др.] // Евразия Вести. – 2012. – № X. – С. 13–14.
14. Оганьян, Э. С. О порядке обновления парка и продления сроков службы локомотивов и их основного оборудования / Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов, Г. И. Гаджиметов // Железнодорож. транспорт. – 2018. – № 3. – С. 69–71.

15. Разработка рекомендаций по продлению срока полезной эксплуатации пассажирских вагонов / С. В. Мямлин [и др.] // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 118–126.
16. Сенько, В. И. Комплексная оценка остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов / В. И. Сенько, А. В. Пигунов. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 127 с.
17. Третьяков, А. В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации / А. В. Третьяков. – СПб. : Изд-во ОМ-Пресс, 2004. – 348 с.
18. Voiko, A. Assessment of remaining resource of tank wagons with expired life time: Summary of Doctoral Dissertation: Engineering sciences / A. Voiko ; Riga Technical University. – Riga, 2013. – 39 p.
19. Gorobets V. L. Operation characteristics of electric trains ER1, ER2 be-yond designed service life / V. L. Gorobets, O. M. Bondarev, V. M. Skoblenko // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 6 (54). – С. 119–127.

*Посупила 06.12.2022*