

УДК 629.463.66:629.4.018

**А.В. ПУТЯТО**, д-р техн. наук, доцентзаведующий кафедрой «Динамика, прочность и износостойкость транспортных средств»<sup>1</sup>

E-mail: putiato@belsut.gomel.by

**Е.Н. КОНОВАЛОВ**научный сотрудник ОНИЛ «ТТОРЕПС»<sup>1</sup>

E-mail: konovalov@belsut.gomel.by

**П.М. АФАНАСЬКОВ**аспирант<sup>1</sup>

E-mail: pavel.afanaskou@gmail.com

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступил в редакцию 09.07.2015.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВАГОНА ХОППЕР-ДОЗАТОРА ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ С УЧЕТОМ ФАКТИЧЕСКИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

*Разработана процедура прогнозирования остаточного ресурса несущей конструкции специального вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации. Процедура включает следующие этапы: изучение технической документации, условий эксплуатации, анализ информации по проведению технических освидетельствований и ремонтов вагонов хоппер-дозаторов; разработка диагностических карт кузова и рамы вагона, выполнение визуального контроля, измерение толщин элементов конструкции, контроль сварных швов и основного металла, отбраковка вагонов, а также отбор образца с худшим техническим состоянием для проведения испытаний; разработка компьютерных моделей и выполнение виртуальных испытаний вагона с учетом фактических значений толщин элементов конструкции для определения соответствия деградированной конструкции требованиям актуальной нормативной документации; проведение натурных контрольных испытаний несущей конструкции вагона при характерных режимах нагружения (соударение вагонов, имитация поездного режима, загрузка/разгрузка, ресурсные при многократных продольных ударах в автосцепное устройство); анализ результатов расчетов и испытаний, установление проблемных зон несущей конструкции, разработка схемы вырезки образцов для исследования материала несущей конструкции вагона после длительной эксплуатации; оценка ее остаточного ресурса. В рамках процедуры предложена расчетно-экспериментальная методика оценки ресурса, отличающаяся учетом условий и интенсивности эксплуатации специального вагона, фактических физико-механических характеристик его несущей конструкции, а также результатов проведенных виртуальных и натурных испытаний. Приведены результаты виртуальных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния несущей конструкции вагона, а также исследования физико-механических свойств материала несущей конструкции после длительной эксплуатации. Установлено, что конструкция соответствует актуальным нормативным требованиям. Выполнена оценка остаточного ресурса несущей конструкции вагона после 50 лет эксплуатации. Установлено, что остаточный ресурс составляет не менее 11 лет.*

**Ключевые слова:** вагон хоппер-дозатор, длительная эксплуатация, несущая конструкция, характеристики материала, остаточный ресурс

**Введение.** В настоящее время существенное количество единиц железнодорожного подвижного состава колеи 1520 мм как в Республике Беларусь, так и в других странах имеет срок службы, превышающий установленный заводом-изготовителем. В то же время многолетний опыт обследования отраслевой научно-исследовательской лабораторией «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» (ОНИЛ «ТТОРЕПС») технического состояния вагонов после длительной эксплуатации показывает, что указанный в технических условиях срок

службы в большинстве случаев далек от предельного. Во многом это связано как с существенным запасом прочности, заложенным при проектировании, так и с особенностями эксплуатации конкретного типа вагонов.

Обеспечить безопасную и своевременную перевозку грузов — одна из главных задач железнодорожного транспорта. В связи с этим, когда в конце прошлого столетия стал проявляться дефицит подвижного состава, в том числе специализированного, а также в силу технической и экономической сложности его обновления по истечении нормативного срока

службы, было принято решение о частичном отказе от регламентированных нормативных сроков службы для тех единиц подвижного состава, индивидуальным ресурс которых позволял разрешить их дальнейшую безаварийную эксплуатацию [7, 9].

Безусловно, подвижной состав, имеющий значительный срок службы, требует дополнительного контроля для обеспечения безопасности движения. В связи с чем, в отличие от существующей схемы продления срока службы вагонов крайне важно знать, по нашему мнению, не только реальную картину напряженно-деформированного состояния, на основе которой выполняется оценка ресурса, но и фактические физико-механические характеристики металла. Как изменились основные механические характеристики (предел прочности, твердость, предел выносливости, ударная вязкость и т. п.) несущей конструкции после длительной эксплуатации — вопрос, на который предстоит отвечать при обосновании продления срока службы вагонов. Следует также учесть, что интенсивность и специфика эксплуатационных нагрузений у разных типов вагонов, а зачастую и моделей, существенно различна. Изменение или не изменение указанных характеристик могут показать только соответствующие испытания, для чего требуется отбор типовых образцов продляемых моделей вагонов, материалы конструкций которых станут объектами исследований. Наличие базы данных механических характеристик материалов несущих конструкций вагонов, подлежащих продлению срока службы после длительной эксплуатации, является крайне важной с позиции обеспечения безопасной работы грузового подвижного состава.

В настоящее время на Белорусской железной дороге для перевозки, механизированной разгрузки, дозировки и разравнивания балласта на путевой решетке при всех видах ремонта железнодорожного пути, а также при текущем его содержании эксплуатируются вагоны хоппер-дозаторы модели ЦНИИ ДВЗ, значительная доля которых выработала нормативный срок службы. Специфика эксплуатации вагонов рассматриваемого типа существенно отличается от условий эксплуатации грузовых вагонов при перевозке грузов как в части величин и частот действия (например, продольных ударных усилий во многом определяющих ресурс вагона), так и сезонной интенсивности их использования.

Результаты обследования технического состояния таких вагонов после длительной эксплуатации (свыше полуторного нормативного срока службы) показали, что большинство эксплуатационных повреждений связано с нарушениями в эксплуатации при погрузке и выгрузке груза. В большей степени это повреждения разгрузочно-дозировочных устройств, обшивки кузова, бункеров и т. п. В то же время, выявление существенных дефектов несущих конструкций, таких как трещины в хребтовой и шкворневых балках, недопустимые их деформации и прочие неисправности, не подлежащие ремонту в

рамках плановых видов ведущих к появлению предельного состояния вагона в целом имеет достаточно малый процент. Существенных коррозионных повреждений также не выявлено. Отметим, что такое техническое состояние рассматриваемого подвижного состава характерно не только для Республики Беларусь [8], а проблемы оценки ресурса вагонов выработавших нормативный срок службы также актуальны и для других стран [2, 3, 10].

Таким образом, незначительный процент отбраковки вагонов показывает о целесообразности разработки процедуры прогнозирования остаточного ресурса несущей конструкции вагонов хоппер-дозаторов после длительной эксплуатации, обеспечивающей их дальнейшую безопасную эксплуатацию.

**Процедура прогнозирования остаточного ресурса вагонов.** Предлагаемый подход прогноза остаточного ресурса несущей конструкции вагона (на примере хоппер-дозатора) после длительной эксплуатации включает следующие этапы:

1. Изучение технической документации, условий эксплуатации, анализ информации по проведению технических освидетельствований и ремонтов вагонов хоппер-дозаторов.

2. Разработка диагностических карт кузова и рамы вагона, выполнение визуального контроля, измерение толщин элементов конструкции, контроль сварных швов и основного металла, отбраковка вагонов, а также отбор образца с худшим техническим состоянием для проведения испытаний.

3. Разработка компьютерных моделей и выполнение виртуальных испытаний вагона с учетом фактических значений толщин его элементов для определения соответствия деградированной конструкции требованиям актуальной нормативной документации.

4. Проведение натуральных контрольных испытаний несущей конструкции вагона при характерных режимах нагружения.

5. Анализ результатов расчетов и испытаний, установление проблемных зон несущей конструкции, разработка схемы вырезки образцов и их изготовление для исследования химического состава и физико-механических характеристик материала.

6. Исследование химического состава и физико-механических свойств материала несущей конструкции вагона после длительной эксплуатации ( $\sigma_T, \sigma_B, \sigma_{-1}, \delta, \psi, HB, KCU$ );

7. Расчетно-экспериментальная оценка остаточного ресурса несущей конструкции вагона с учетом проведенных испытаний натурального объекта и установленных характеристик материала.

В рамках первого этапа изучаются особенности конструкции вагона, устанавливаются материалы, из которых изготовлены несущие конструкции, выполняется анализ информации по проведению технических освидетельствований и ремонтов, изучаются условия эксплуатации. Так, например, вагоны хоппер-дозаторы используют

ся в большей степени в период выполнения путевых работ с апреля по октябрь.

В рамках этапа 2 выполняется разработка диагностических карт, в которых наряду с указанием основных данных вагона (номер, год постройки, дата и место последнего ремонта и т. п.), устанавливается объем проведения технического обследования; указываются основные характеристики вагона и места определения фактической толщины металлоконструкции; приводятся результаты контроля сварных швов и основного металла; отмечаются наличие дефектов (трещин, деформаций и т. п.), а также характеристики применяемого оборудования. По результатам технического обследования выполняется отбраковка вагонов, не подлежащих ремонту согласно действующей нормативной документации. Из обследованной партии вагонов отбирается образец (или образцы) для дальнейшего проведения контрольных испытаний.

В настоящее время силовые и граничные условия при выполнении прочностных расчетов кузовов грузовых вагонов определяются в соответствии с «Нормами для расчета ...» в редакции 1996 г. [4], которые периодически перерабатываются, уточняются и редактируются с учетом современного уровня знаний и научных достижений в рассматриваемой области. В то же время, при проектировании вагонов, срок службы которых к настоящему времени выработан, использовались Нормы в других редакциях [5, 6], схемы нагружения в которых зачастую существенно отличны друг от друга. В связи с этим, после установления фактических значений толщин металлоконструкции вагонов после длительной эксплуатации следует выполнить комплекс виртуальных испытаний (расчетов) с целью установления ее соответствия актуальной нормативной документации. Для этого разрабатываются компьютерные трехмерные модели металлоконструкции вагона, реализующие, как правило, метод конечных элементов, и предусматривающие возможность дифференцированного учета наихудшей ситуации ее деградации, устанавливаемой по результатам обследования технического состояния. На рисунке 1 приведены картины напряженно-деформированного состояния с распределением эквивалентных напряжений в металлоконструкции вагона хоппер-дозатора при ударном нагружении в автосцепное устройство силой 3 МН и третьем нормативном режиме. Положительные результаты виртуальных испытаний являются критерием перехода к 4 этапу реализации подхода.

По результатам выполнения расчетов, с учетом информации, полученной при техническом обследовании вагонов, а также рекомендаций [1] разрабатывается схема наклейки тензометрических датчиков Т1...Т15 (рисунок 2) для дальнейшего проведения контрольных испытаний вагонов. Отобранный образец (вагон) с наихудшим техническим состоянием направляется для проведения контрольных испытаний, включающих режимы нагружения, характерные специфике эксплуатации: соударение ваго-

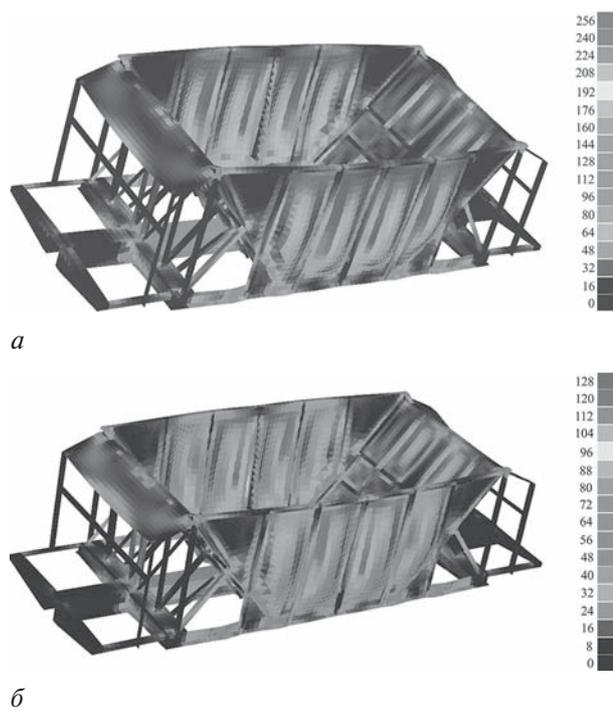


Рисунок 1 — Напряженно-деформированное состояние и распределение эквивалентных напряжений (МПа) в металлоконструкции вагона при ударном нагружении (а) и третьем нормативном режиме (б)

нов, сброс с клиньев (имитация поездного режима), загрузка/разгрузка.

Результаты расчетов и проведенных испытаний дают практически полную картину напряженно-деформированного состояния конструкции вагона. В то же время, учитывая его длительную эксплуатацию, необходимо знать информацию о фактических значениях физико-механических характеристик материала, из которого изготовлена несущая конструкция, определяющая остаточный ресурс вагона. Хребтовая балка подвергалась воздействию циклически изменяющейся нагрузки. Причем, напряжения достигают максимума в области, прилегающей к границе между вертикальной стойкой профиля и его нижней полкой. В процессе длительной эксплуатации это может привести к зарождению и аккумуляции в данной области дефектов, снижающих механические характеристики стали.

Базируясь на полученных результатах расчетов и испытаний, на пятом этапе устанавливаются проблемные зоны несущей конструкции, а также с учетом деформационной картины разрабатываются схемы вырезки образцов металла для исследования химического состава и физико-механических свойств материала несущей конструкции. К контролируемым параметрам, наряду с химическим составом, следует отнести: предел текучести  $\sigma_T$ , предел прочности  $\sigma_B$ , предел выносливости  $\sigma_{-1}$ , относительное удлинение  $\delta$ , относительное сужение  $\psi$ , твердость металла  $HB$ , ударную вязкость  $KCU$ .

Заготовки для образцов вырезаются из фрагментов несущей конструкции вагона на фрезерном

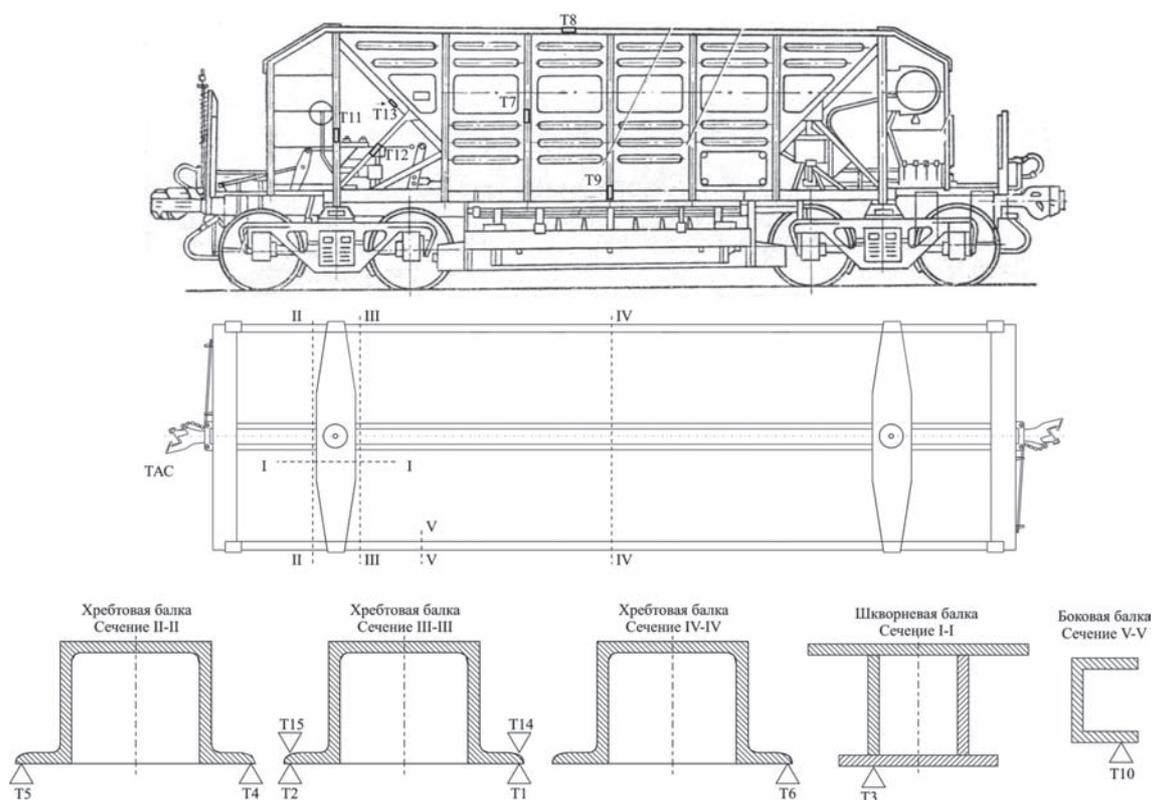


Рисунок 2 — Схема наклейки тензометрических датчиков

станке при охлаждении жидкостью, низкой скорости и малой подаче инструмента, что позволило исключить влияние нагрева на структуру металла. Аналогичным образом осуществляется точение, плоское и круглое шлифование образцов. Температура в зоне резания при всех видах механической обработки не должна превышать 100 °С.

Для определения твердости, ударной вязкости и химического состава стали образцы вырезаются из серединой (между заклепками) части фрагмента вертикальной стойки и верхней полки консольной части хребтовой балки. Область вырезки ограничена белой линией и показана на рисунке 3 а стрелкой 1. Образцы вертикальной стойки нумеровались, начиная от границы нижней полки с основанием хребтовой

балки до границы с верхней полкой. Первый образец верхней полки вырезается на участке, отстоящем на расстоянии не менее 30 мм от сварного шва, соединяющего два Z-образных профиля (на рисунке 3 а показан стрелкой 2). Это позволяет исключить вклад зоны термического влияния, обладающей отличающимися от исходного металла структурой и механическими свойствами, в результаты испытаний.

На рисунке 3 б приведена схема вырезки образцов из хребтовой балки вагона для определения твердости, ударной вязкости и химического состава. Соблюдая аналогичные требования, вырезаются и нумеруются образцы для определения механических характеристик стали при одноосном растяжении и предела выносливости.

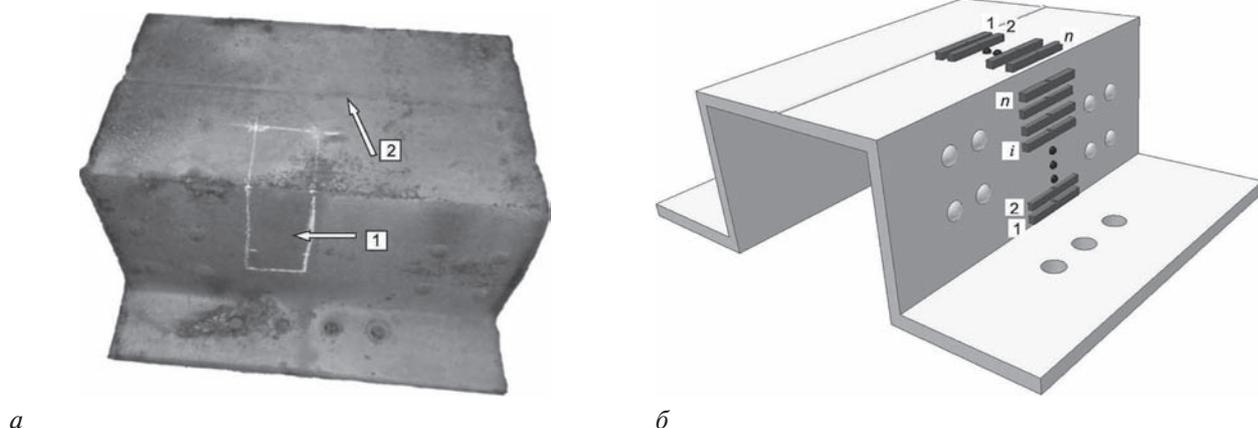


Рисунок 3 — Область (а) и схема (б) вырезки образцов

**Расчетно-экспериментальная методика оценки остаточного ресурса.** Предлагаемая методика оценки остаточного ресурса металлоконструкции вагона базируется на подходе, изложенном в «Нормах для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм» [4] и РД 24.050.37 «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества» [1]. Принимаются следующие допущения:

- усталостное повреждение или разрушение материала вагона в основном происходит при упругом деформировании;
- параметром, определяющим циклическую прочность, являлся коэффициент запаса сопротивления усталости;
- справедлива линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений;
- для неустановившегося режима нагружения амплитудные значения динамических напряжений приводятся к эквивалентному симметричному циклу.

Коэффициент запаса сопротивления усталости определяется по формуле

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\varepsilon}} \geq [n],$$

где  $\sigma_{a,N}$  — предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установленном режиме нагружения при базовом числе циклов  $N_0 = 10^7$ , который в отличие от нормативной методики определяется с учетом фактического предела выносливости материала после длительной эксплуатации и коэффициента снижения предела выносливости в выбранной контрольной зоне;  $\sigma_{a,\varepsilon}$  — величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базовому числу циклов  $N_0$ , эквивалентная повреждающему воздействию реальному режиму эксплуатационных напряжений за расчетный срок службы;  $[n]$  — минимально допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости за выбранный срок службы.

Таким образом  $\sigma_{a,\varepsilon}$  — параметр, включающий в себя срок службы металлоконструкции. Для его определения при  $k$  режимах нагружения воспользуемся формулой

$$\sigma_{a,\varepsilon} = \sqrt[m]{\sum_k \left[ \frac{N_c^k}{N_0} \sum_i (\sigma_{ai}^k)^m \cdot p_i^k \right]},$$

где  $m$  — показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах;  $N_c^k$  — суммарное число циклов динамических напряжений за расчетный срок службы котла для  $k$ -го режима нагружения;  $N_0$  — базовое число циклов;  $\sigma_{ai}^k$  — уровень амплитуд напряжений в  $i$ -ом интервале  $k$ -го режима нагружения;  $p_i^k$  — вероятность (частота) действия уровня амплитуд  $\sigma_{a,\varepsilon}$  в  $i$ -ом интервале  $k$ -го режима нагружения.

Суммарное число циклов для  $k$ -го режима представим в виде

$$N_c^k = K^k T_p,$$

где  $K^k$  — коэффициент, связывающий суммарное число циклов динамических напряжений с расчетным суммарным сроком службы для  $k$ -го режима нагружения;  $T_p$  — суммарный расчетный срок службы.

Амплитудные значения динамических напряжений для неустановившегося режима нагружения, полученные по результатам контрольных испытаний вагона приводятся к эквивалентному симметричному циклу по формуле

$$\sigma_a = \sigma_a^{\text{исп}} + \Psi_k \sigma_m^{\text{исп}},$$

где  $\sigma_a^{\text{исп}}$  — амплитуда динамического напряжения, полученная по результатам испытаний при несимметричном цикле нагружения;  $\Psi_k$  — коэффициент чувствительности асимметрии цикла нагружения;  $\sigma_m^{\text{исп}}$  — среднее напряжение цикла, полученное по результатам испытаний.

Таким образом

$$T_p = N_0 \frac{\left( \frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m}{\sum_k \left[ K^k \sum_i (\sigma_{ai}^k)^m \cdot p_i^k \right]}.$$

**Результаты исследования химического состава и физико-механических характеристик материала хребтовой балки.** Исследование химического состава, а также физико-механических характеристик материала несущей конструкции вагона хоппер-дозатора после 50 лет эксплуатации выполнялись совместно со специалистами кафедр «Динамика, прочность и износостойкость транспортных средств» и «Материаловедение и технологии материалов» университета.

*Химический состав.* Содержание легирующих элементов в металле определялось на атомно-эмиссионном спектрометре «ЭМАС – 200МДД» в режиме «дуга». Расчет спектра производился при помощи программ *n-Vision*. Содержание углерода в стали определялось на экспресс-анализаторе на углерод АН-7529 методом автоматического титрования по величине  $pH$ . Проверка полученных данных и определение содержания серы и фосфора проводились на приборе «Оптико-эмиссионный анализатор химического состава металлов и сплавов».

Результаты анализа химического состава стали, из которой изготовлена хребтовая балка рамы вагона хоппер-дозатора, представлены в таблице 1.

Сравнительный анализ химического состава исследуемого металла и состава сталей по ГОСТ 19281, где регламентируется содержание меди, указывает на то, что исследуемая хребтовая балка изготовлена из стали марки 09Г2Д. По сравнению со сталью 09Г2 для стали 09Г2Д минимальное содержание меди должно превышать 0,15 % массовой доли, т. е. среднее значение этого показателя должно быть более высоким. Отметим, что медь в диапазоне рассматриваемых концентраций заметно повышает атмосферную и коррозионную стойкость стали, не ухудшая ее механические характеристики.

Из приведенных в таблице 1 данных также следует, что по содержанию углерода, легирующих элементов и примесей сталь хребтовой балки соответствует допустимым стандартам значениям. В образце № 1 массовая доля кремния составляет 0,395 % и несколько превышает допустимый стандарт верхний предел равный 0,370 %, но к ухудшению механических свойств стали это не приводит, поскольку повышенное содержание кремния, применяемого для раскисления стали и предотвращения хрупкого разрушения при горячей деформации, способствует повышению ее прочностных характеристик.

**Твердость материала хребтовой балки.** Определение твердости образцов проводилось по методам Бринелля и Роквелла согласно ГОСТ 9012 и ГОСТ 9013. Установлено, что твердости материала хребтовой балки существенно не различаются, их средние значения представлены в таблице 2.

**Ударная вязкость материала хребтовой балки.** Испытания на ударную вязкость *КС* осуществлялись на копре маятниковом 2010 КМ–30 по ГОСТ 9454.

Ударную вязкость (*КСУ*) определяли на образцах типа I с U-образным надрезом, у которых радиус концентратора 1 мм, высота рабочего сечения 8 мм. Образцы изготовлены из материала хребтовой балки в виде брусков квадратного сечения (10×10 мм) длиной 55 мм (рисунок 4 а).

Независимо от области вырезки (верхняя полка или вертикальная стойка) образцы в испытаниях на ударную вязкость при температуре +20 °С не разрушались (см. рисунок 4 б), что свидетельствует о высокой вязкости стали (в соответствии с нормативом должна превышать 59 Дж/см<sup>2</sup>) и согласуется с результатами определения ее механических

характеристик — относительное удлинение при разрыве превышает 23,5 %, а относительное сужение — 68 %. Приведенные значения ударной вязкости косвенно свидетельствуют о высоком сопротивлении стали усталостному разрушению.

**Основные механические свойства.** Определение временного сопротивления  $\sigma_b$ , предела текучести  $\sigma_T$ , относительного удлинения  $\delta$  и относительного сужения  $\psi$  стали при одноосном растяжении проводилось в соответствии с ГОСТ 9651 и ГОСТ 1497. Испытания были выполнены на разрывной машине типа «Time WDW – 100E», обеспечивающей максимальную растягивающую нагрузку 100 кН. Скорость нагружения соответствовала 2 мм/мин, что обеспечивает получение диаграммы растяжения  $\sigma$ – $\epsilon$  с выраженной площадкой текучести. Образцы для механических испытаний изготавливались в виде цилиндров переменного сечения с диаметром рабочего сечения 8 мм и длиной рабочей части 80 мм. Образцы № 3.1–№ 3.4 вырезались из верхней полки хребтовой балки, а № 4.1–№ 4.8 — из вертикальной стойки. Порядок нумерации представлен на рисунке 3.

Результаты определения механических характеристик стали 09Г2Д представлены в таблице 3. Получено, что по показателю «Относительное удлинение» сталь хребтовой балки удовлетворяет требованиям класса прочности 345, установленным ГОСТ 19281. В то же время экспериментально полученные минимальные значения предела текучести и предела прочности стали хребтовой балки ниже минимального предела, соответствующего классу прочности 345.

Согласно Примечаниям к таблице 1 ГОСТ 19281, «при заказе класса прочности 295 из марки стали 09Г2,

Таблица 1 — Химический состав стали хребтовой балки рамы вагона

Содержание элементов	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	
				не более		не более			
по ГОСТ 19281 – 09Г2 – 09Г2Д	не > 0,12	0,17–0,37 0,17–0,37	1,4–1,8 1,4–1,8	0,035	0,040	0,30	0,30	0,3	
				0,035	0,040	0,30	0,30	0,15–0,30	
в материале хребтовой балки	1	0,111	0,395	1,7819	0,0207	0,0286	0,034	0,024	0,167
	2	0,073	0,350	1,7206	0,0202	0,0279	0,029	0,028	0,156
	3	0,068	0,342	1,7111	0,0200	0,0264	0,028	0,028	0,152
	4	0,072	0,342	1,7060	0,0197	0,0274	0,028	0,027	0,152
среднее значение	0,081	0,357	1,729	0,0201	0,0276	0,03	0,027	0,157	

Таблица 2 — Твердость материала хребтовой балки рамы вагона

Твердость	Значения показателей												Среднее значение
по Роквеллу	82	83	82	84	81	83	86	82	81	83	82	84	82,75
по Бринеллю	156	156	156	164	153	156	163	170	156	159	156	163	159

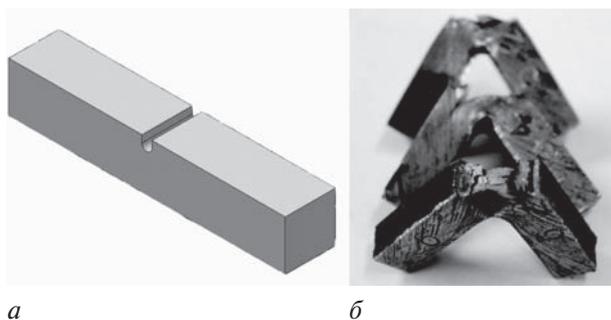


Рисунок 4 — Схема испытаний на ударную и образцы из стали хребтовой балки после испытаний

09Г2Д, толщиной до 20 мм предел текучести должен быть не менее 305 Н/мм<sup>2</sup>, а временное сопротивление (предел прочности) — не менее 440 Н/мм<sup>2</sup>. В то же время результаты исследований показали, что сталь хребтовой балки вагона по показателям «Предел текучести» и «Предел прочности» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к стали класса прочности 295.

Учитывая длительную эксплуатацию вагона хоппер-дозатора, представляет интерес распределение указанных характеристик по высоте вертикальной

стойки балки. Из приведенных в таблице 3 (образцы № 4.1–№ 4.8) данных следует, что корреляция между показателями механических характеристик  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$ ,  $\Psi$  стали и расстоянием от границы между вертикальной стойкой и нижней полкой хребтовой балки отсутствует. Таким образом, установлено, что длительная эксплуатация вагона не вызвала заметного снижения механических свойств стали несущей конструкции.

Предел выносливости материала хребтовой балки определялся в соответствии с ГОСТ 25.502 путем построения кривой усталости. С этой целью подготовлена серия образцов, вырезанных из консольной части хребтовой балки в зоне установки поглощающих аппаратов. Испытания проведены на машине УВМ 200тС по схеме нагружения при чистом изгибе с вращением образца круглого сечения с частотой 50 Гц. Испытания образцов выполнялись непрерывно до достижения предельного состояния (разделение образца на две части) или до базового числа циклов, принимаемого равным 10<sup>7</sup>.

Для построения кривой усталости и определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  испытано 11 образцов, 2 из которых испытаны до базового числа циклов без

Таблица 3 — Механические характеристики стали хребтовой балки рамы вагона

Номер образца	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
По ГОСТ 19281-89 класс прочности 345	Таблица 1 ГОСТ 19281-89 - Сортовой и фасонный прокат			
	не < 345	не < 480	не < 21	—
Образцы, вырезанные из верхней полки				
3.1	325	480	24,1	74
3.2	365	480	24,3	75
3.3	375	490	24,1	72
3.4	355	<b>465</b>	26,3	75
Среднее значение	355	478,85	24,7	74
Образцы, вырезанные из вертикальной стойки				
4.1	350	485	23,5	71
4.2	370	480	25,0	74
4.3	390	500	24,8	75
4.4	<b>320</b>	<b>455</b>	23,7	68
4.5	405	500	23,6	73
4.6	<b>325</b>	470	25,3	76
4.7	355	475	24,0	71
4.8	365	470	25,4	76
Среднее значение	360	479,4	24,48	73

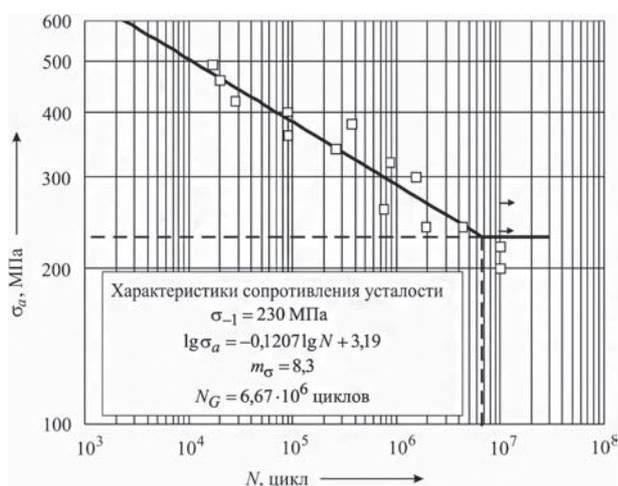


Рисунок 5 — Кривая механической усталости материала хребтовой балки после длительной эксплуатации

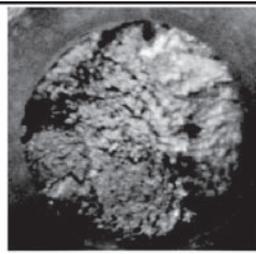
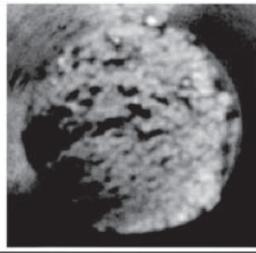
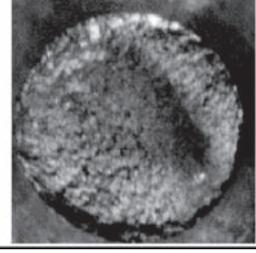
достижения предельного состояния. По результатам испытаний методом графической интерполяции построена кривая усталости в координатах «логарифм амплитуды напряжений цикла  $\sigma_a$  — логарифм числа циклов  $\lg N$ » до достижения предельного состояния (рисунок 5). Обработка результатов испытаний выполнена методом наименьших квадратов. Уравнения кривой усталости, численные значения предела выносливости  $\sigma_{-1}$ , абсциссы точки перелома кривой усталости  $N_G$  и показателя наклона левой ветви кривой усталости  $m_\sigma$  приведены на рисунке 5.

В таблице 4 представлены фотографии характерных изломов образцов, выбранные для каждого из характерных участков кривой усталости. Видно, что характер изломов меняется с изменением нагрузки и количества циклов до разрушения образца.

**Определение остаточного ресурса несущей конструкции вагона.** Исходными данными для определения остаточного ресурса выступили фактические механические свойства материала после длительной эксплуатации вагона, а также результаты экспериментальных натурных исследований напряженного состояния металлоконструкции вагона в контрольных точках (см. рисунок 1) при различных характерных режимах нагружения (соударение вагонов, вертикальные колебания, загрузка/выгрузка вагона щебнем). В качестве примера в таблице 5 приведены результаты экспериментального определения напряжений в контрольных точках при сбросе с клиньев (имитация вертикальных колебаний вагона при движении по перегону).

Принимаемые при оценке остаточного ресурса частоты диапазонов продольных усилий, воз-

Таблица 4 — Фото характерных изломов образцов из различных участков кривой усталости

	Область квазистатического разрушения: $\sigma_\sigma = 494$ МПа, $N_\sigma = 16\ 921$ циклов
	Область малоциклового разрушения: $\sigma_\sigma = 320$ МПа, $N_\sigma = 866\ 180$ циклов
	Область многоциклового разрушения: $\sigma_\sigma = 240$ МПа, $N_\sigma = 4\ 350\ 000$ циклов

действующих на автосцепное устройство, а также диапазонов скоростей в процессе эксплуатации приведены на рисунке 6.

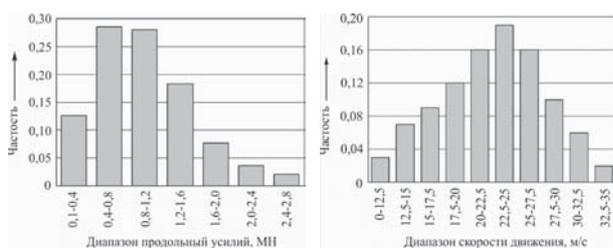
Методика оценки остаточного ресурса реализована в программе *Microsoft Excel*. Опуская промежуточные расчеты, на диаграмме рисунка 7 приведены результаты определения долговечности для установленных контрольных зон (для контрольных точек не указанных на диаграмме, остаточный ресурс составляет более 100 лет).

Таким образом, по результатам расчетно-экспериментальной оценки долговечности по критерию усталостной прочности опытного образца вагона хоппер-дозатора модели ЦНИИ ДВЗ № 30669022 после 50 лет эксплуатации, можно сделать заключение, что несущая металлоконструкция опытного образца обладает остаточным ресурсом не менее 11 лет эксплуатации.

На рисунке 8 приведена зависимость остаточного ресурса  $T$  хребтовой балки в области сочленения со шкворневой вагона хоппер-дозатора от толщины конструктивного элемента в контрольной точке №15  $\delta_i$  (в долях относительно значения на испытанном вагоне). Полученная зависимость с

Таблица 5 — Результаты определения напряжений при сбросе с клиньев (коэффициент вертикальной динамики равен 0,5)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\sigma$ , МПа	min	-28	-24	-15	-19	-21	-10	-4	-9	-2	-10	-28	-5	-5	-30	-29
	max	30	25	19	12	11	11	2	17	6	14	22	12	2	44	46



а б

Рисунок 6 — Частоты диапазонов продольных ударных усилий и диапазонов скоростей при эксплуатации

высокой достоверностью ( $R^2 = 0,9999$ ) аппроксимируется полиномом пятой степени.

Аналогичные зависимости могут быть получены для иных контрольных точек и использованы при оценке остаточного ресурса вагонов рассматриваемой модели с учетом разницы в техническом состоянии.

**Заключение.** 1. В результате обследования технического состояния металлоконструкций вагонов хоппер-дозаторов модели ЦНИИ ДВЗ после длительной эксплуатации (свыше полуторного назначенного срока службы) установлен незначительный процент их отбраковки, что свидетельствует о наличии остаточного ресурса конструкции и необходимости разработки процедуры его определения.

2. Предложена процедура прогнозирования остаточного ресурса несущей конструкции вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации,

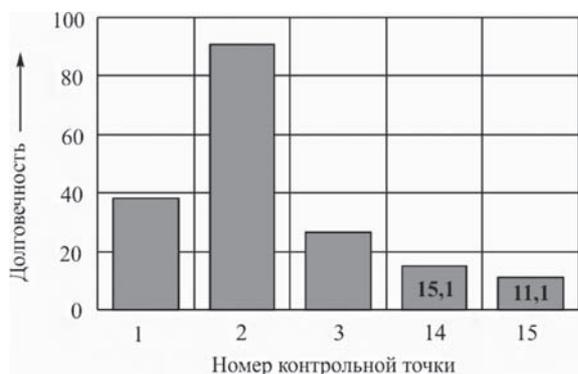


Рисунок 7 — Результаты определения долговечности

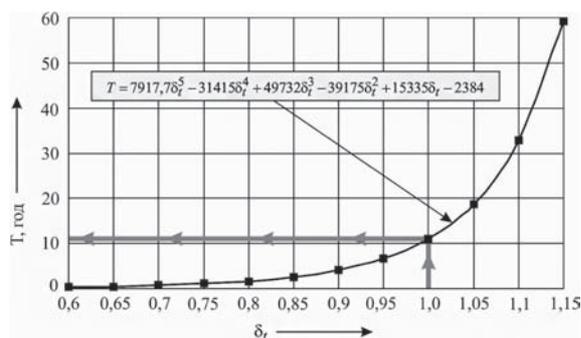


Рисунок 8 — Зависимость остаточного ресурса хребтовой балки в контрольной точке №15 от толщины конструктивного элемента (в долях относительно значения на испытанном вагоне)

включающая семь этапов, предусматривающих установление фактического технического состояния вагона, в том числе физико-механических характеристик материала; проведение виртуальных и натурных испытаний металлоконструкции в соответствии с актуальной нормативной документацией; определение остаточного ресурса на основе полученных результатов.

3. Предложена расчетно-экспериментальная методика оценки остаточного ресурса, отличающаяся учетом условий и интенсивности эксплуатации вагона, а также фактических механических характеристик несущей конструкции.

4. Выполнены виртуальные и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния несущей конструкции вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации. Установлено, что конструкция соответствует актуальным нормативным требованиям.

5. Выполнены исследования по определению химического состава и физико-механических свойств материала несущей конструкции вагона после длительной эксплуатации ( $\sigma_T, \sigma_B, \sigma_{-1}, \delta, \psi, HB, KCU$ ).

6. На основе полученных экспериментальных данных выполнена оценка остаточного ресурса несущей конструкции вагона после 50 лет эксплуатации. Установлено, что остаточный ресурс составляет не менее 11 лет.

#### Список литературы

1. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества: РД 24.050.37–95. — Введ. 02.02.1995. — М.: ГосНИИВ, 1995. — 101 с.
2. Жарова, Е.А. Обоснование вариантов продления сроков службы специализированных вагонов-платформ: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / Е.А. Жарова; ПГУПС. — СПб., 2008. — 129 с.
3. Зимакова, М.В. Продление срока службы вагонов-цистерн с учетом изменения физико-механических свойств металлоконструкций базовых узлов: дис. ... канд. техн. наук / М.В. Зимакова; ПГУПС. — СПб., 2012. — 144 с.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. — М., 1996. — 319 с.
5. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. — М., 1983. — 260 с.
6. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. — М., 1971. — 180 с.
7. 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.
8. Сычев, В.П. Разработка и модернизация средств технического обслуживания железнодорожного пути: дис. ... докт. техн. наук / В.П. Сычев; РГОТУПС. — М., 2007. — 308 с.
9. Третьяков, А.В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации: [монография] / А.В. Третьяков. — СПб.: Изд-во ОМ-Пресс, 2004. — 348 с.
10. Boiko, A. Assessment of remaining resource of tank wagons with expired life time: Summary of Doctoral Dissertation: Engineering sciences / A. Boiko; Riga Technical University. — Riga, 2013. — 39 p.

PUTYATO Artur V., Dr. Techn. Sc., Associate Professor  
 Head of the Department “Dynamics, strength and wear resistance of vehicles”<sup>1</sup>  
 E-mail: putiato@belsut.gomel.by

KONOVALOV Evgeniy N.  
 Researcher of ISL “TTERRSU”<sup>1</sup>  
 E-mail: konovalov@belsut.gomel.by

AFANASKOV Pavel M.  
 Post-Graduate Student<sup>1</sup>  
 E-mail: pavel.afanaskou@gmail.com  
<sup>1</sup>Belarusian State University of Transport, Gomel, The Republic of Belarus

Received 09 July 2015.

## PREDICTION OF THE RESIDUAL RESOURCE OF THE COACH HOPPER-BATCHER AFTER LONG OPERATION TAKING INTO ACCOUNT ACTUAL PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE MATERIAL OF THE BEARING STRUCTURE

*Procedure of prediction of a residual resource of a bearing structure of the special railway car hopper-batcher after long-term service has been developed. The procedure includes following steps: study of engineering data, operating conditions and analyzing the technical tests and repair information; development the diagnostic charts for body and frame, visual control and thickness measuring of the construction elements, control of weld seams and body metal, car screening and test sampling the worst technical condition parts; development of computer models and virtual testing of the carriage, taking into consideration real thickness of construction elements, in order to determine the relevance of degraded structure to the requirements of actual engineering data; loaded testing of the car bearing structure; analysis of the results of calculations and tests, determining the problem areas on the bearing structure, developing sampling scheme and sampling for chemical and physical-mechanical properties of the bearing construction material; investigation of chemical and physical-mechanical properties of the bearing construction material having long-term operational life; experiment-calculated evaluation of residual in-use utility for the bearing construction of the car, taking into account real test data and established properties of the material. The calculation-experimental technique of an estimation of the resource, differing by the account of conditions and intensity of service of the special railway car, actual physicomechanical properties of its bearing structure, and also results of the spent virtual and natural tests is offered. Results of virtual and experimental researches of the stress-strain condition of a bearing structure of the car are shown, and also research of physical and mechanical properties of a material of a bearing structure after long-term service has been resulted. It has been established, that the construction corresponds to actual standard requirements. The estimation of a residual resource of a bearing structure of the car after 50 years of service has been executed. It has been established the residual resource makes not less than 11 years.*

**Keywords:** coach hopper-batcher, long-term service, bearing structure, material properties, residual resource

### References

1. RD 24.050.37–95. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i hodovye kachestva [Railway cars cargo and passenger. Test methods on durability and road performance]. Moscow, GosNIIV. 101 p.
2. Zharova E. Obosnovanie variantov prodleniya srokov sluzhby specializirovannykh vagonov-platform: dis. kand. tehn. nauk. [Substantiation of variants of prolongation of service life of specialised cars-platforms. Cand. Techn. Sci. Diss.]. SPb., PGUPS, 2008. 129 p.
3. Zimakova M. Prodlenie sroka sluzhby vagonov-cistern s uchetom izmeneniya fiziko-mehaniicheskikh svoystv metallokonstrukcij bazovykh uzlov: dis. kand. tehn. nauk [Substantiation of variants of prolongation of service life of specialised cars-platforms. Cand. techn. sci. diss.]. SPb., PGUPS, 2012. 129 p.
4. Normy dlja rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnykh) [Standard for calculation and designing of cars of railways of Ministry of Railways of a track of 1520 mm (not automotive)]. Moscow, GosNIIV-VNIIZHT 1996. 319 p.
5. Normy dlja rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnykh) [Standard for calculation and designing of cars of railways of Ministry of Railways of a track of 1520 mm (not automotive)]. Moscow, GosNIIV-VNIIZHT, 1983. 260 p.
6. Normy dlja rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnykh) [Standard for calculation and designing of cars of railways of Ministry of Railways of a track of 1520 mm (not automotive)]. Moscow, GosNIIV-VNIIZHT, 1971. 180 p.
7. Boronenko Y.P. [et al.]. O korektirovke “Polozheniya o prodlenii sroka sluzhby gruzovykh vagonov, kursirujushchih v mezhdunarodnom soobshhenii” [About updating “Positions about prolongation of service life of the freight cars plying in the international message”]. *Evrasijskaja vesti* [Eurasia news], 2012, no. X, pp. 13–14.
8. Sichev V. Razrabotka i modernizacija sredstv tehniicheskogo obsluzhivaniya zheleznodorozhnogo puti: dis. dokt. tehn. nauk [Assessment of remaining resource of tank wagons with expired life time. Doct. techn. sci. diss.]. Moscow, RGOTUPS, 2007. 308 p.
9. Tretyakov A.V. Upravlenie individual'nym resursom vagonov v jekspluatacii [Management of an individual resource of cars in operation]. SPb., OOO “Izdatel'stvo OM-Press”, 2004. 348 p.
10. Boiko A. Assessment of remaining resource of tank wagons with expired life time. Summary of Doctoral Dissertation: Engineering sciences. Riga, Riga Technical University. 2013. 39 p.