

УДК 629.4.015:629.424.24:004.94

Д. П. РУСОВ, А. О. ШИМАНОВСКИЙ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

НАХОЖДЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА ДРБ1

Разработаны геометрическая модель рамы тележки прицепного вагона дизель-поезда ДРБ1 со сроком эксплуатации 43 года в среде программы Autodesk Inventor и на ее основе конечно-элементная модель в среде ANSYS Workbench. Получены распределения напряжений и деформаций в конструкции под действием статических и динамических нагрузок, аналогичных испытательным, которые достаточно хорошо соответствуют результатам экспериментов. На основе расчетно-экспериментальной оценки выявлено, что рама тележки рассматриваемого прицепного вагона обладает остаточным ресурсом не менее 19 лет.

Ключевые слова: дизель-поезд, прицепной вагон, рама тележки, конечно-элементная модель, остаточный ресурс.

Первые дизель-поезда типа ДРБ1 появились на Белорусской железной дороге в 1969 г. Их назначенный срок службы составляет 20 лет с возможностью продления до 35 лет. В ближайшее время к сроку эксплуатации 35 лет подойдут около 67 % вагонов. В то же время с учетом отсутствия отказов металлоконструкций таких вагонов можно предположить, что ресурс их несущих конструкций до конца не выработан. Поэтому имеется потребность в анализе технического состояния металлоконструкций головных и прицепных вагонов дизель-поезда типа ДРБ1 после длительной эксплуатации, а также оценки остаточного ресурса их несущих конструкций.

Оценка безопасности эксплуатации по техническому состоянию определяется процессами, проходящими в металлоконструкции вагонов, которые вызывают появление трещин и последующие разрушения [1]. Поэтому такая оценка непосредственно связана с анализом напряженно-деформированного состояния конструкций вагонов. Анализ ресурса железнодорожного подвижного состава различного назначения посвящено значительное число публикаций, однако они главным образом связаны с исследованиями грузовых вагонов и локомотивов [2–5]. Лишь относительно недавно появились публикации, в которых рассматривается подвижной состав для пассажирских перевозок.

Так, выполненная в статье [6] оценка напряженно-деформированного состояния длительно эксплуатировавшихся вагонов метрополитена типа E и E_M показала, что срок их службы может быть продлен до 50 лет. Аналогичный анализ кузовов вагона метрополитена серии 81 показал, что в этом случае срок службы можно увеличить на 15 лет [7].

Результаты экспериментально-теоретической оценки прочности балок центрального подвешивания дизель-поездов ДР1А, а также варианты модернизации с целью увеличения прочности конструкции приведены в статье [8]. Анализ возможности продления срока службы рессорного подвешивания электропоезда *Afrosiyob* представлен в работе [9].

В статье [10] проведен анализ неисправностей дизель-поездов серии ДР1 и рассмотрены особенности построения моделей для оценки напряженно-деформированного состояния кузова. Экспериментальный анализ напряжений в элементах несущих конструкций и узлах передачи тяги головных вагонов дизель-поездов ДР1А, позволивший разработать модели для численных расчетов уровней напряжений и сил, рассмотрен в публикации [11].

В работе [12] выполнена оценка усталостной прочности опытного варианта рамы тележки дизель-поезда ДПКр-2 и сделан вывод о необходимости усиления её конструкции.

Техническое состояние дизель-поездов серии ДДБ1 после длительной эксплуатации рассмотрено в статье [13]. Установлено, что прочность при всех расчетных режимах удовлетворяет всем необходимым требованиям. На основе расчетов определены зоны, в которых необходимо выполнять контроль толщины основного металла при осуществлении плановых видов ремонта. Аналогичные исследования для вагонов дизель-поездов серии ДРБ1 представлены в работе [14], причем в ней установлены значения толщин конструктивных элементов, которые следует использовать при анализе их прочности с учетом длительной эксплуатации.

Таким образом, выполненный анализ показывает, что на данный момент решены некоторые частные вопросы, связанные с техническим состоянием вагонов дизель-поездов серии ДРБ1, обусловленным их длительной эксплуатацией, но определение остаточного ресурса не осуществлялось. Целями представленной работы стали разработка конечно-элементной модели рамы тележки прицепного вагона данного дизель-поезда и оценка на ее основе остаточного ресурса конструкции.

В ходе предварительного обследования установлено, что коррозионный износ несущих конструкций выбранной рамы тележки, функционировавшей в вагоне модели 63-367 со сроком эксплуатации 43 года, незначителен, в ней отсутствуют изломы и трещины. От нее был отрезан образец, который представлял собой левую часть рамы.

Испытания (рисунок 1) производились с целью оценки напряжений, возникающих в несущей конструкции под действием статических и периодических динамических нагрузок, и дальнейшего обоснования остаточного срока службы. На основе выполненного анализа определены места возникновения наибольших напряжений, где затем располагались тензометрические датчики. Схема их наклейки при ресурсных испытаниях рамы тележки дизель-поезда ДРБ1 представлена на рисунке 2.



Рисунок 1 – Проведение натуральных испытаний рамы тележки

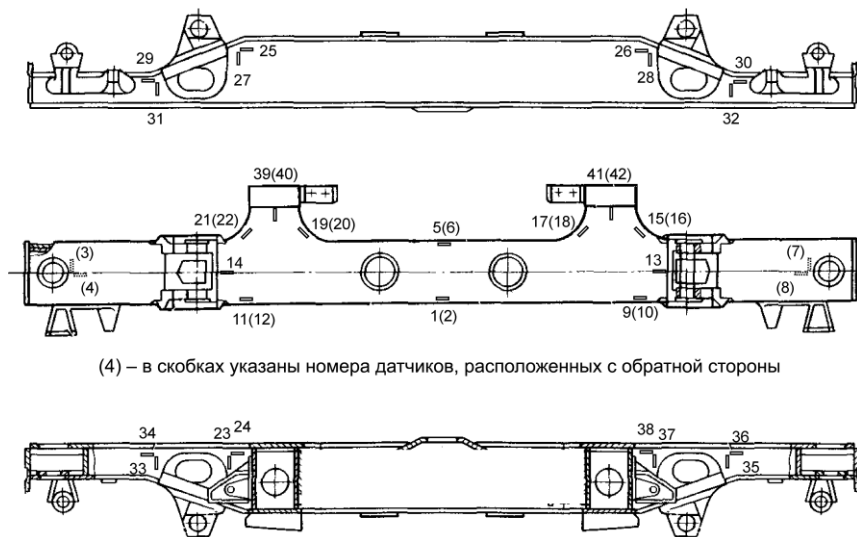


Рисунок 2 – Схема наклейки тензометрических датчиков при ресурсных испытаниях рамы тележки дизель-поезда ДРБ1

Режим испытаний устанавливался исходя из того, что амплитуды динамических напряжений должны в 1,2–2,0 раза превышать расчетный предел выносливости при базовом числе циклов. При этом расчетное число циклов испытаний должно составлять от $5 \cdot 10^5$ до 10^7 циклов. По результатам натуральных испытаний построены два графика: статических (рисунок 3) и амплитудных (рисунок 4) напряжений, сумма которых дает максимальные значения напряжений в конструкции при движении по перегону.

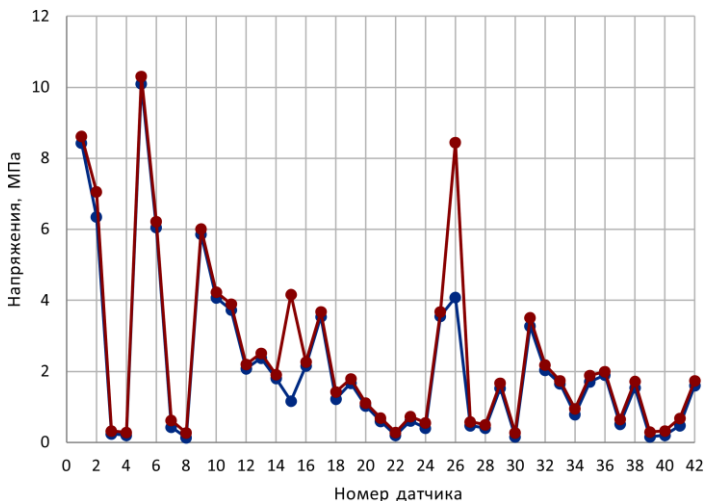


Рисунок 3 – Статические напряжения

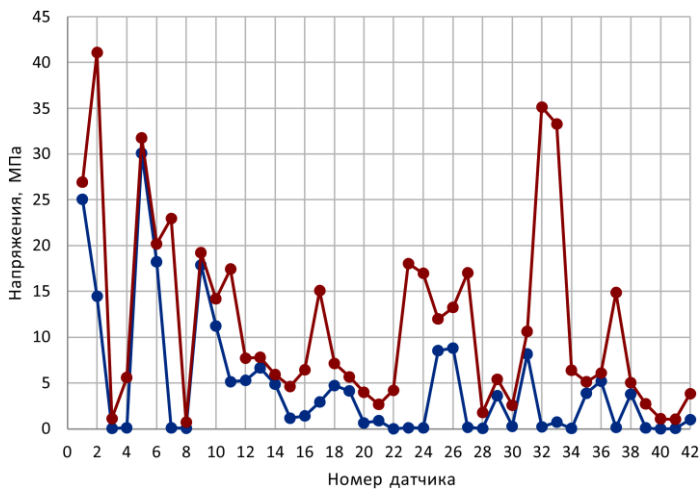


Рисунок 4 – Амплитудные напряжения

Из приведенных графиков следует, что наибольшие напряжения возникают вблизи мест приложения нагрузки и расположения опор. В дальнейшем полученные значения использованы для сравнения с напряжениями, найденными расчетом.

В среде программного комплекса Autodesk Inventor на основе имеющейся конструкторской документации и измерений конструкции в испытательном центре БелГУТа была создана 3D-модель рамы тележки прицепного вагона дизель-поезда ДРБ1 (рисунок 5). Она соответствовала образцу, с которым проводился натурный эксперимент.

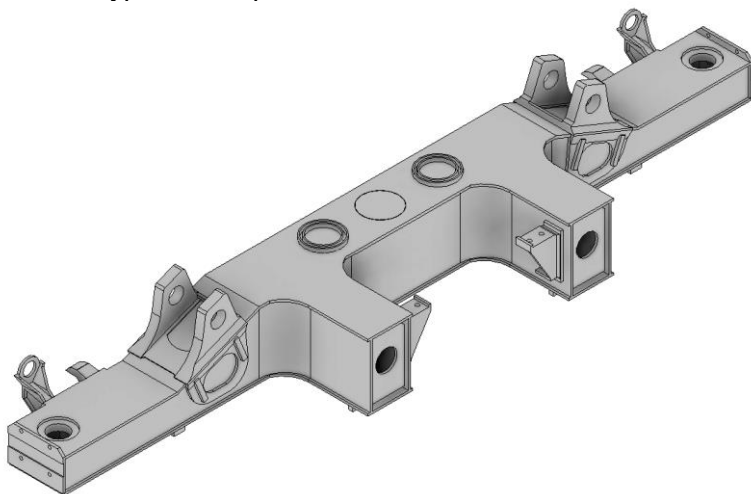


Рисунок 5 – 3D-модель фрагмента рамы тележки

В среде программного комплекса ANSYS Workbench на основе созданной геометрической модели была разработана конечно-элементная модель. При ее разработке учитывалось, что материал конструкции – сталь с модулем Юнга $2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициентом Пуассона 0,3. С учетом степени сложности геометрии и требуемой точности решения использован десятиузловой элемент SOLID187, который рекомендуется применять для моделирования объемов с большим количеством поверхностей [15]. Характерный размер сетки принят равным 7 мм. Созданная модель включала 256354 конечных элемента и 501398 узлов. На рисунке 6 показан ее фрагмент.

В ходе испытаний рама опиралась на горизонтальную поверхность в четырех местах [16], как это показано на рисунке 7. При задании граничных условий было принято, что все опоры гладкие. Также введены дополнительные связи для обеспечения неподвижности конструкции в горизонтальной плоскости. К скользунам боковой балки прикладывалась периодическая вертикальная сила с амплитудой 55 кН.

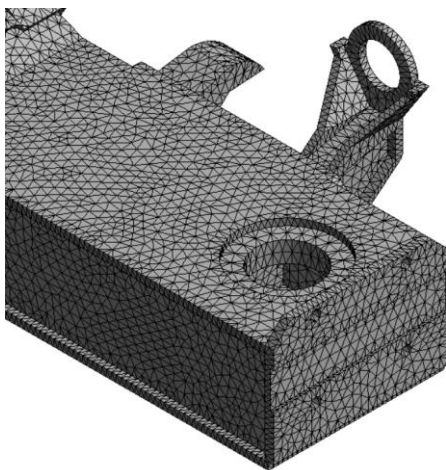


Рисунок 6 – Фрагмент конечно-элементной сетки

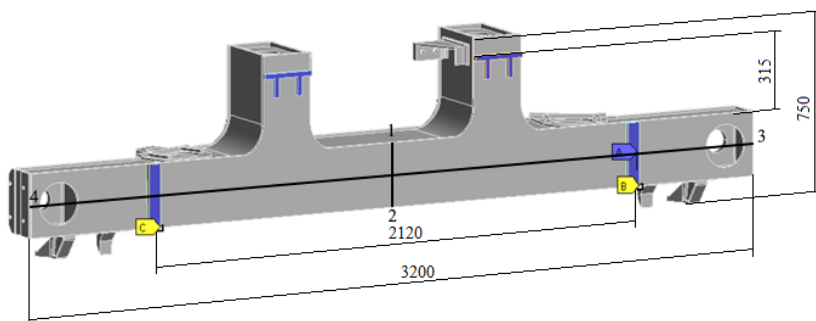


Рисунок 7 – Места крепления рамы при испытаниях

В результате расчетов получены картины распределения напряжений, Па , и деформаций, м , в конструкции (рисунок 8, 9). Как и при эксперименте, наиболее нагруженными оказались области вблизи места приложения нагрузки и креплений опор (см. рисунок 8). Результаты для случаев статического и динамического нагружений отличались незначительно. Отличие полученных значений от результатов испытаний при динамическом воздействии было связано, возможно, с отрывом рамы от основания при испытаниях и соответствующими изменениями граничных условий, которые не учитывались при расчетах.

Также были получены зависимости напряжений вдоль линий на поверхностях листов рамы тележки. На рисунке 10 представлены графики, соответствующие линиям 1–2 и 3–4 (см. рисунок 7) для внешних и внутренних сторон листа.

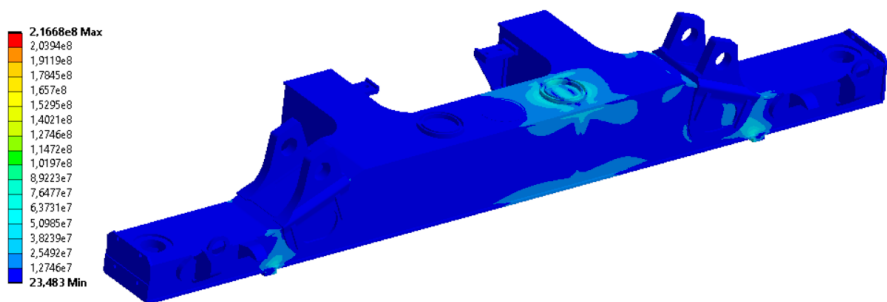


Рисунок 8 – Эквивалентные по Мизесу напряжения, Па, в раме

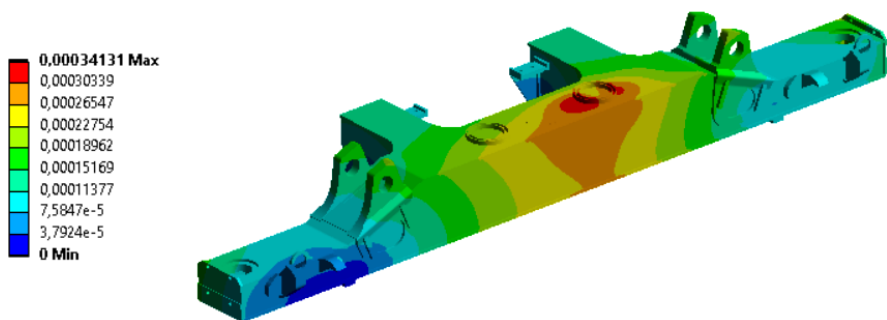


Рисунок 9 – Полная деформация, м

Из рисунка 10, *a* видно, что наибольшие напряжения возникают вблизи сварного соединения, причем на внешней поверхности листа они на 10 % больше, чем на внутренней. Рисунок 10, *б* показывает, что максимальные напряжения возникают вблизи места приложения нагрузки. Они также достаточно велики в местах крепления опор. Если в центральной части листа напряжения на внутренней его поверхности больше, чем на внешней, то в местах расположения опор и на концах балки ситуация меняется на противоположную.

Диаграмма, приведенная рисунке 11, показывает, что значения напряжений, которые получены при проведении натурного эксперимента и в ходе компьютерного моделирования, отличаются незначительно. Погрешность результатов составляет в среднем менее 8 %, и только в некоторых точках достигает 15 %, что говорит об адекватности созданной модели. Таким образом, появляется возможность с помощью созданной модели в дальнейшем проводить численные эксперименты для любых параметров конструкции, не затрачивая на это значительные материальные ресурсы. Следовательно, с помощью расчетов по созданной модели можно принимать решение о дальнейшей эксплуатации конструкции либо необходимости ее модернизации.

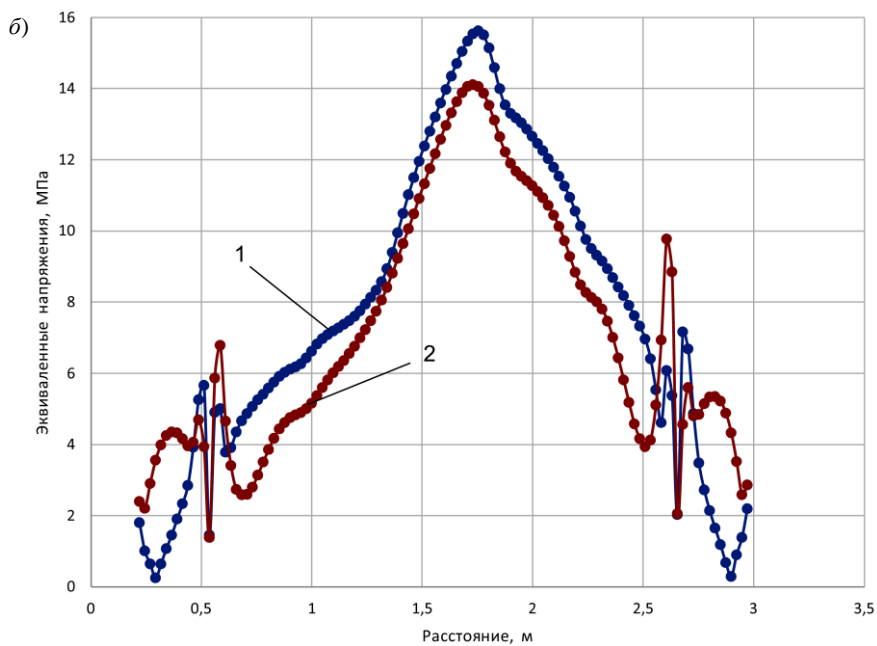
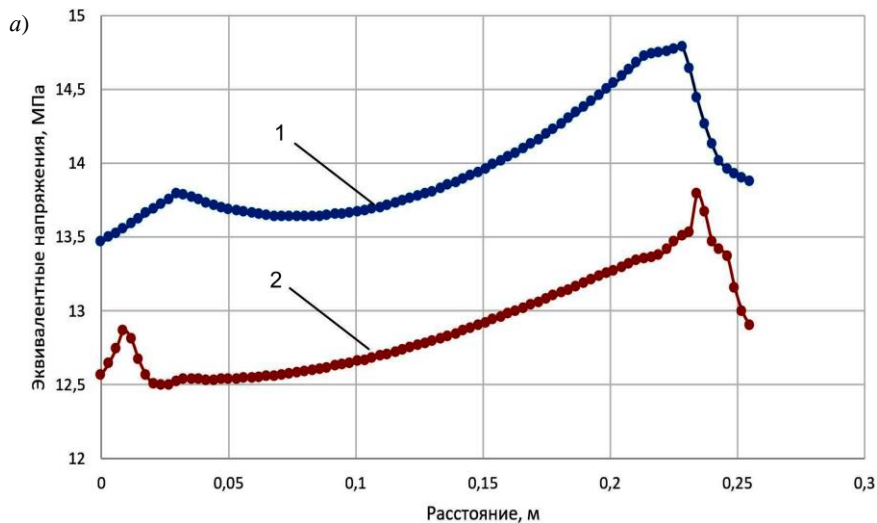


Рисунок 10 – Результаты расчета эквивалентных напряжений для точек, расположенных на линии 1–2 (а) и линии 3–4 (б) (см. рисунок 7):
 1 – внешняя; 2 – внутренняя сторона листа

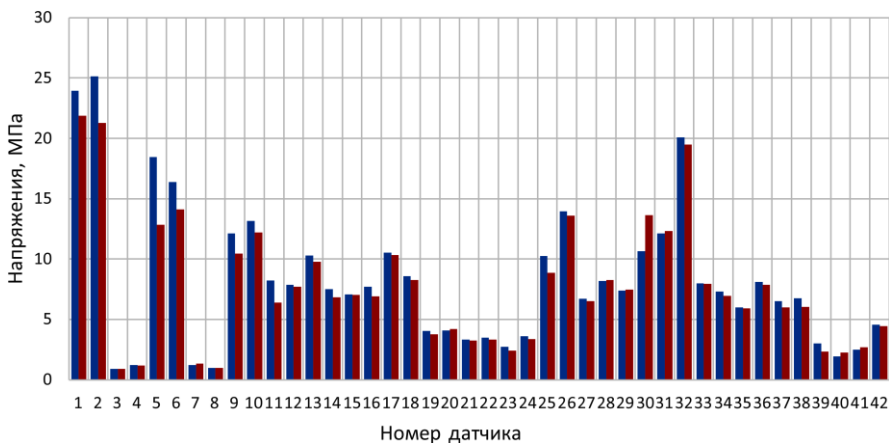


Рисунок 11 – Сравнение результатов эксперимента (левый столбец) и расчета

На основе результатов определения напряжений выполнен расчет остаточного ресурса рамы тележки по критерию многоциклового усталости в соответствии с методикой, представленной в [17, 18].

Нормативное количество циклов динамических напряжений от продольных сил, которые действуют на вагон через автосцепку, за 1 год эксплуатации $N_{c1} = 20200$. Полученные в результате расчета долговечности в контрольных зонах – местах расположения тензорезисторов (см. рисунок 2) – представлены в таблице 1, из которой следует, что усталостная прочность конструкции рамы тележки определяется центральной зоной балки, где прикладывается нагрузка от кузова вагона. При этом остаточный ресурс составляет не менее 19,2 года.

Таблица 1 – Долговечность исследуемых зон

| Номер тензорезистора | Остаточный ресурс, лет |
|----------------------|------------------------|
| 1 | 30,9 |
| 2 | 32,9 |
| 5 | 19,2 |
| 6 | 58,3 |
| 32 | 50,5 |
| 3, 4, 7–31, 33–42 | >100,0 |

Таким образом, в ходе выполнения работы получены следующие основные результаты.

1 Проведенные стендовые испытания образца отслужившей нормативный срок службы рамы тележки дизель-поезда ДРБ1 показали, что наибольшие статические напряжения составляют от 8 до 10 МПа, а динамические – от 35 до 40 МПа и наблюдаются в местах приложения нагрузки и закрепления на опорах.

2 Разработана геометрическая 3D-модель рамы тележки в программном комплексе Autodesk Inventor. На ее основе создана конечно-элементная модель в среде программного комплекса ANSYS Workbench. Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния рамы тележки при действии статических и динамических нагрузок, использованных при проведении натуральных испытаний. Результаты расчетов показали достаточное хорошее совпадение с результатами натуральных экспериментов. Наибольшее отклонение не превысило 15 %.

3 По результатам расчетно-экспериментальной оценки долговечности по критерию многоциклового усталости, сделано заключение о том, что несущая металлоконструкция опытного образца обладает остаточным ресурсом не менее 19,2 года эксплуатации, который определяется прочностью в центральной части рамы тележки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Сычев, П. В.** Применение метода влияния рассеянных микрповреждений на сопротивление росту трещин при оценке остаточного ресурса подвижного состава железных дорог / П. В. Сычев // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 1. – С. 53–58.

2 **Сенько, В. И.** Итоги комплексной оценки остаточного ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов / В. И. Сенько, И. Ф. Пастухов, М. И. Пастухов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2006. – № 1–2 (12–13). – С. 5–10.

3 **Сычев, П. В.** Выбор моделей оценки остаточного ресурса подвижного состава при продлении срока его службы / П. В. Сычев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2015. – Т. 8, № 8. – С. 156–160.

4 Evaluation of railway vehicle car body fatigue life and durability using a multidisciplinary analysis method / В. Miao [et al.] // International Journal of Vehicle Structures and Systems. – 2009. – Vol. 1, is. 4. – P. 85–92.

5 Investigation of the stress-strain state of a wheel flange of the locomotive by the method of finite element modeling / К. Zhussupov [et al.] // Mechanika. – 2018. – Vol. 24, no. 2. – P. 174–181.

6 **Борисов, С. В.** Прогнозирование остаточного ресурса и продление срока службы вагонов метрополитена / С. В. Борисов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006. – № 4 (9). – С. 39–44.

7 **Закс, М. Н.** Продление срока службы вагонов метрополитена / М. Н. Закс, И. А. Рюмин // Тяжелое машиностроение. – 2021. – № 1–2. – С. 44–50.

8 **Бондарев, А. М.** Экспериментально-теоретическая оценка показателей прочности балок центрального подвешивания дизель-поездов ДР1А / А. М. Бондарев, Д. А. Ягода, В. М. Скобленко // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2011. – № 37. – С. 7–19.

9 **Хромова, Г. А.** Разработка методики продления срока службы рессорного подвешивания высокоскоростного электропоезда Afrosiyob / Г. А. Хромова, М. А. Махамдалиева // Universum: технические науки. – 2022. – № 2–3 (95). – С. 66–70.

10 **Огородников, Л. В.** Анализ неисправностей дизель-поездов серии ДР1 и подготовка для оценки напряженно-деформированного состояния несущих металлоконструкций / Л. В. Огородников, Г. Е. Брильков, С. М. Пытлев // Проблемы безопасно-

сти на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 125–127.

11 Разработка мероприятий по улучшению показателей прочности несущих конструкций головных вагонов дизель-поездов ДР1А на основании выполненных экспериментально-теоретических работ / А. М. Бондарев [и др.] // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2014. – № 1 (49). – С. 132–141.

12 Оценка напряжённо-деформированного состояния рамы тележки дизель-поезда ДПКр-2 при действии расчётных и эксплуатационных нагрузок / С. А. Костица [и др.] // Наука и прогресс транспорта. – 2019. – № 1 (79). – С. 128–138.

13 **Афанаськов, П. М.** Техническое состояние дизель-поездов ДДБ1 после длительной эксплуатации / П. М. Афанаськов, Р. И. Чернин, И. А. Титович // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2019. – С. 102–104.

14 **Пустьято, А. В.** Анализ технического состояния парка вагонов дизель-поездов серии ДРБ-1 Белорусской железной дороги / А. В. Пустьято, Л. В. Огородников, С. М. Пытлев // Механика. Исследования и инновации. – 2021. – Вып. 14. – С. 190–194.

15 Инженерный анализ в ANSYS Workbench : учеб. пособ. / В. А. Бруяка [и др.]. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.

16 **Русов, Д. П.** Конечно-элементное моделирование деформирования рамы тележки дизель-поезда / Д. П. Русов // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XXVI Респ. науч. конф. студентов и аспирантов. В 2 ч. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2023. – Ч. 1. – С. 70–71.

17 **Гасюк, А. С.** Расчётно-экспериментальные методы оценки ресурса базовых частей подвижного состава / А. С. Гасюк, Э. С. Оганьян // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 285–291.

18 Оценка остаточного ресурса несущей конструкции вагона пассажирского после длительной эксплуатации / А. В. Пустьято [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 2 (41). – С. 42–45.

D. P. RUSOV, A. O. SHIMANOVSKY

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

DETERMINATION OF THE DIESEL TRAIN DRB1 BOARD FRAME REMAINING RESOURCE

A bogie frame geometric model for a diesel train DRB1 trailed car with a service life of 43 years is developed in the Autodesk Inventor environment and a finite element model in the ANSYS Workbench environment is created on its base. The distributions of stresses and deformations in the structure under the influence of static and dynamic loads, similar to the test ones, are obtained and correspond quite well to the experimental results. Based on a computational and experimental assessment, it is revealed that the considered trailed car bogie frame has a residual resource of at least 19 years.

Keywords: diesel train, trailer car, bogie frame, finite element model, residual life.

Получено 05.10.2023