

УДК 629.4.023.1

*П. М. АФАНАСЬКОВ, Е. Н. КОНОВАЛОВ, кандидат технических наук, В. В. КОМИССАРОВ, кандидат технических наук, А. К. ГОЛОВНИЧ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; А. В. ПУТЯТО, доктор технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого; А. В. ШИЛОВИЧ, доктор технических наук*

## ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С УЧЕТОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В рамках реализации процедуры оценки остаточного ресурса несущих конструкций вагонов метрополитена после выработки срока службы выполнено обследование их технического состояния и получены значения остаточных толщин конструктивных элементов. Установлено, что коррозионный износ не превышает 7 % от номинальных значений. Разработаны конечно-элементные модели металлоконструкций вагонов моделей 81-717 (головной вагон) и 81-714 (промежуточный вагон). Выполнен комплекс расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций головного и промежуточного вагона на нагрузки, регламентированные актуальной нормативной документацией. Установлено, что несущие конструкции вагонов метрополитена соответствуют установленным требованиям прочности.

**Введение.** Эксплуатация поездов Минского метрополитена началась с 29 июня 1984 года, по одной линии. Сегодня Минский метрополитен насчитывает три линии, общая протяженность которых составляет 40,8 км с 33 станциями. Инвентарный парк вагонов составляет 390 единиц, из которых сформировано 73 пятивагонных и 6 четырехвагонных составов. Перспективный план развития предполагает, что метрополитен будет состоять из четырех линий, общей протяженностью 87,9 км, и насчитывать 64 станции.

Подвижной состав Минского метрополитена преимущественно состоит из вагонов моделей 81-717 (головной) и 81-714 (промежуточный), которые также эксплуатируются или же эксплуатировались во многих странах мира в России, Украине, Беларуси, Азербайджане, Грузии, Польше, Чехии и др. (рисунок 1). Срок

службы указанных моделей вагонов, назначенный заводом-изготовителем, составляет 31 год, и у ряда единиц подвижного состава истек к настоящему времени.

Установление фактического технического состояния вагонов метрополитена выполнялось методами неразрушающего контроля (визуальный контроль и ультразвуковая толщинометрия). С целью структуризации результатов обследования технического состояния разработано два комплекта диагностических протоколов (для головного вагона модели 81-717 и промежуточного вагона модели 81-714), включающие основные конструктивные элементы металлоконструкции вагонов: рама, боковые стены, торцевые стены, крыша. Измерение остаточной толщины элементов выполнялось на ремонтных позициях после зачистки мест под контрольные точки.



Рисунок 1 – Составы на ремонтных позициях

По результатам обследования технического состояния металлоконструкций 68 вагонов установлено, что коррозионный износ не превышает 7 % от номинальных значений конструктивных элементов. В то же время визуальный контроль несущих конструкций позволил выявить ряд конструктивных областей и элементов, для которых характерно появление трещин [1]:

- зона крепления сцепного устройства на хребтовой балке (рисунок 2, а);
- вертикальные листы шкворневой балки по границам отверстий (рисунок 2, б);
- кронштейны крепления подвески автосцепки;
- вертикальные стенки продольных балок, за шкворневой балкой.

а)



б)

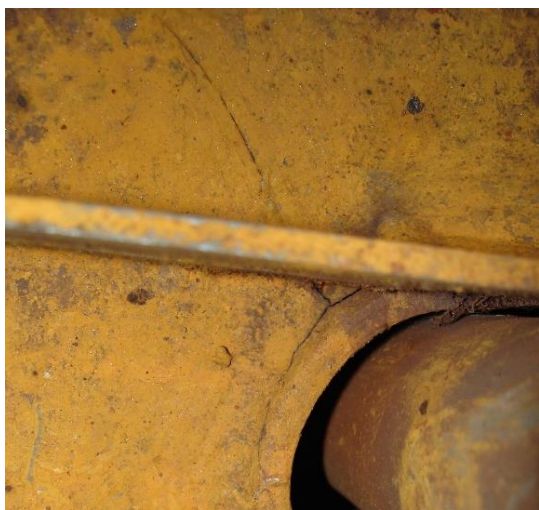


Рисунок 2 – Эксплуатационные повреждения элементов несущих конструкций вагонов:

а – трещина в хребтовой балке в районе крепления сцепного устройства; б – трещина в вертикальном листе шкворневой балки вагона

Полученные при ультразвуковой толщинометрии данные легли в основу разработки конечно-элементных моделей исследуемых вагонов для оценки их прочности с учетом выявленного коррозионного износа.

Для углубленного и детального исследования зон, подверженных возникновению трещин, было принято решение провести дополнительную серию расчетов с поэтапным уменьшением толщины металла шкворневых и хребтовых балок в данных зонах на 5, 10 и 15 %.

Учитывая практику эксплуатации (вагоны курсируют по одному маршруту) и ремонта вагонов (обслуживаются в депо приписки), а также отсутствие отказов металлоконструкций вагонов, есть основания предполагать, что ресурс их несущих конструкции не исчерпан.

Процедура оценки остаточного ресурса несущих конструкций нашла широкое применение для железнодорожного подвижного состава в целом [2–5], а также и вагонов метрополитена [6]. Одним из этапов этой работы является определение технического состояния металлоконструкций вагонов после длительной эксплуатации, а также установление соответствия их прочности требованиям актуальной нормативной документации, что и явилось целью настоящей статьи.

Конечно-элементные модели на основе комплектов конструкторской документации на вагоны метрополитена моделей 81-717 и 81-714 разработаны с учетом результатов технического обследования и реального физического состояния наихудших представителей.

Кинематические граничные условия включают в себя ограничение степеней свободы в местах крепления упоров сцепного устройства и пятников. При подготовке модели учтены также места крепления подвагонного оборудования и массы перевозимых пассажиров. Силовые граничные условия для оценки прочности приняты в соответствии с нормативными требованиями [7].

Вертикальные силы состоят из собственной силы тяжести полностью оборудованного вагона и силы тяжести пассажиров при максимальной населенности. Расчетная масса пассажира с багажом принималась равной 70 кг. Максимальное количество пассажиров в вагоне определяется количеством сидящих пассажиров, а также стоящих пассажиров из расчета 10 человек на 1 м<sup>2</sup> свободной от сидений площади, за исключением участков шириной 100 мм от края сиденья.

Динамические составляющие вертикальной силы от колебаний кузова на рессорном подвешивании определялись умножением силы тяжести кузова на расчетное значение показателя отношения динамической составляющей вертикальной силы к максимальной статической нагрузке во второй ступени рессорного подвешивания, который равен 0,2.

Вертикальная составляющая (добавка) на кузов от продольной силы инерции кузова определена по формуле

$$\Delta P = P_{ик} \frac{h_k}{2L}, \quad (1)$$

где  $P_{ик}$  – сила инерции массы брутто кузова;  $h_k$  – расстояние от центра тяжести кузова до плоскости опор на тележку;  $2L$  – база кузова.

Центробежная сила для кузова определена исходя из непогашенного ускорения, равного 0,7 м/с<sup>2</sup>.

Сила давления ветра получена из расчета удельного давления ветра на боковую проекцию кузова, равного 300 Н/м<sup>2</sup>.

Силы взаимодействия между вагонами прикладываются по оси сцепления устройства по двум расчетным схемам: с обоих концов вагона, с одного конца. Последняя уравновешена силами инерции вагона.

Продольные силы, действующие на кузов:

- для I режима: усилие сжатия 0,4 МН (для консольной части 0,5 МН); усилие растяжения 0,3 МН;
- для II режима: усилие сжатия 0,12 МН; усилие растяжения 0,12 МН.

Силы инерции, действующие на отдельные узлы и элементы вагона, приложены к центрам тяжести их масс и определены для II режима по формуле

$$P_{ii} = F_A \frac{m_i}{m_k}, \quad (2)$$

где  $F_A$  – продольное усилие, обусловленное силами тяги или торможения;  $m_i$  – масса узла;  $m_k$  – масса вагона.

Инерционные силы для расчета узлов связи кузова с тележкой определялись исходя из ускорения массы те-



лежки вдоль оси пути равного 2g для моторных и 4g для немоторных тележек.

**Результаты оценки прочности при фактическом состоянии вагонов.** Выполнен комплекс расчетов металлоконструкций головного и промежуточного вагонов для описанных режимов нагружения. На рисунке 3, *а* приведено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу для головного вагона при действии нагрузок,

характерных для I режима нагружения при действии растягивающих продольных сил. На рисунке 3, *б* приведены фрагменты распределения эквивалентных напряжений при II режиме нагружения при сжатии.

На рисунке 3 приведены диаграммы с результатами максимальных эквивалентных напряжений по конструктивным элементам головного вагона для обоих режимов нагружения.

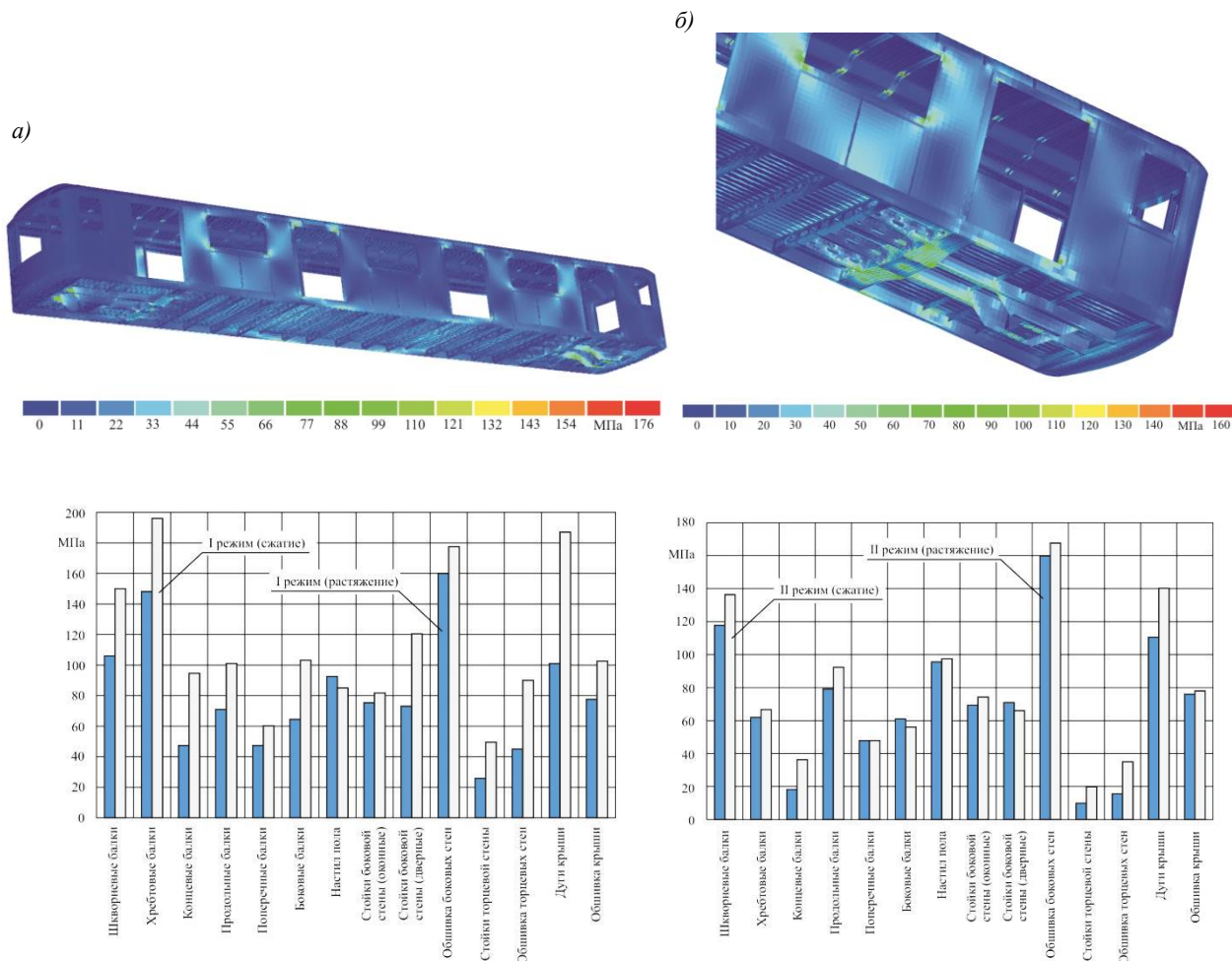


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений в кузове головного вагона и диаграммы максимальных напряжений по конструктивным элементам головного вагона при I (*а*) и II (*б*) расчетных режимах нагружения

Из рисунка 3, *а* видно, что наибольшие напряжения возникают в хребтовой балке, причем при действии продольных сжимающих нагрузок при I режиме нагружения они близки к допускаемым. Наибольшие напряжения в элементах шкворневой балки не превышают 150 МПа, причем наблюдается их концентрация вблизи границ отверстий на обоих вертикальных листах. В элементах боковых балок напряжения не превышают 48 % от допускаемых значений. В обшивке боковой стены максимальные напряжения составляют 177,5 МПа. Уровень напряжений в дугах крыши не превышает 87 % от допускаемого значения.

Анализ диаграмм (см. рисунок 3, *б*) показал, что наибольшие напряжения в несущей металлоконструкции, возникают в шкворневых балках, где их значения составили 88 % от допускаемых. Следует отметить, что напряжения концентрируются на внутреннем листе в зоне сочленения с продольными балками и местах расположения отверстий. Наибольшие напряжения в элементах хребтовой балки не превышают 66,65 МПа.

В элементах продольных балок напряжения не превышают 50 % от допускаемых значений. В элементах каркаса боковой стены максимальные напряжения возникают в дверных стойках и составляют 70,95 МПа. Уровень напряжений в обшивке крыши не превышает 39 % от допускаемого значения. Уровень напряжений в дугах крыши не превышает 90 % от допускаемого.

Аналогичный комплекс расчетов выполнен для промежуточного вагона. На рисунке 4 приведены сводные диаграммы с результатами максимальных эквивалентных напряжений по конструктивным элементам промежуточного вагона для обоих режимов нагружения.

Из диаграмм на рисунке 4, *а* видно, что наибольшие напряжения при первом режиме возникают в хребтовой балке, где расчетные напряжения составили 97 % от допускаемого значения. Наибольшие напряжения в элементах шкворневой балки не превышают 144 МПа и, также как и в головном вагоне, сконцентрированы

к границам отверстий на обоих вертикальных листах. В элементах боковых балок напряжения не превышают 48 % от допускаемых значений. В элементах обшивки боковой стены максимальные напряжения составляют 177,5 МПа. Уровень напряжений в дугах крыши не превышает 86 % от допускаемого значения.

Анализ диаграмм (рисунок 4, б) показал, что в элементах несущей конструкции вагона наибольшие напряжения возникают в шкворневых балках, где их значения составили 87 % от допускаемых. Напряжения концентрируются на внутреннем листе в зоне сочленения с продольными балками и местах расположения отверстий. Напряженное состояние хребтовой балки

промежуточного вагона практически не отличается от напряженного состояния балки головного вагона. В элементах продольных балок напряжения не превышают 46 % от допускаемых значений. В элементах каркаса боковой стены максимальные напряжения возникают в дверных стойках и составляют 68 МПа. Уровень напряжений в обшивке крыши не превышает 36 % от допускаемого значения.

В целом можно отметить, что несущие конструкции вагонов моделей 81-717 (головной вагон) и 81-714 (промежуточный вагон) после их длительной эксплуатации соответствуют требованиям прочности, установленным в [7, 8].

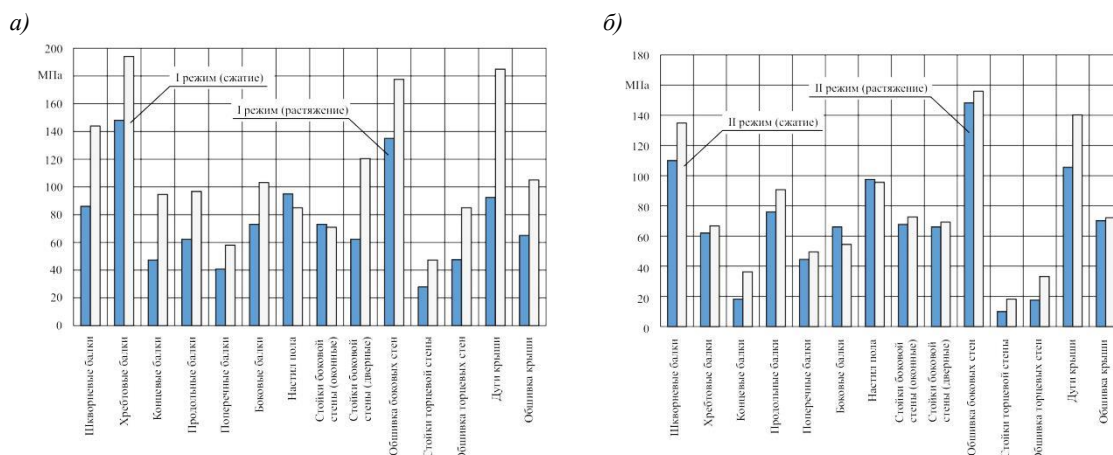


Рисунок 4 – Диаграммы максимальных напряжений по конструктивным элементам промежуточного вагона при I (а) и II (б) расчетных режимах нагружения

На примере промежуточного вагона модели 81-714 продемонстрируем комплекс дополнительных расчетов, проведенных с учетом описанных выше режимов нагружения. На рисунке 5, а приведены фрагменты

распределения эквивалентных напряжений по Мизесу при действии нагрузок, характерных для I режима нагружения при действии сжимающих продольных сил, с учетом десятипроцентного уменьшения толщины металла.

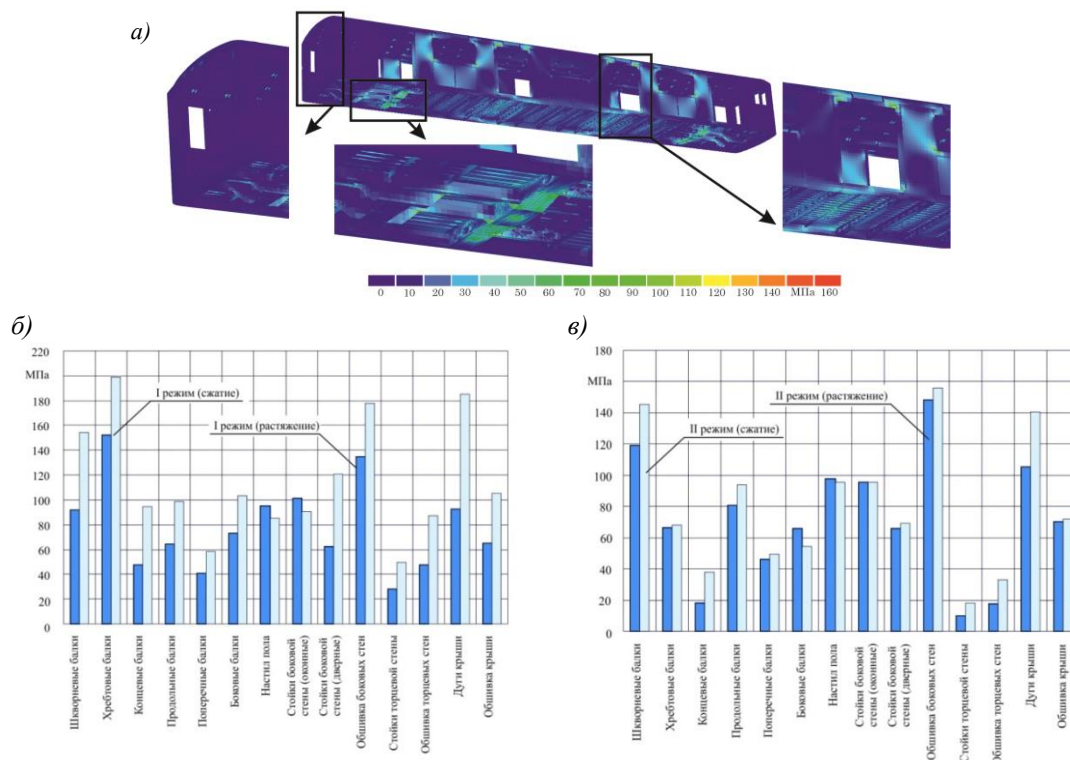


Рисунок 5 – Распределение эквивалентных напряжений в кузове вагона и диаграммы максимальных напряжений по конструктивным элементам промежуточного вагона: а – общий вид; б – при I расчетном режиме нагружения; в – при II расчетном режиме

На рисунке 5, б, в приведены диаграммы с результатами максимальных эквивалентных напряжений по конструктивным элементам промежуточного вагона для I и II режимов нагружения с учетом уменьшения толщины металла на 10 %.

Анализируя диаграммы (см. рисунки 4 и 5, б, в) видим, что с уменьшением толщины металла в элементах хребтовых и шкворневых балок уровень напряжений в них возрастает. При I расчетном режиме нагружения максимальные напряжения возникают в элементах хребтовых балок при действии продольных сжимающих нагрузок и составили 197 МПа, при допускаемых напряжениях 200 МПа. В элементах шкворневых балок наибольшие напряжения также имеют место при сжа-

тии и составили 84 % от допускаемых. При II расчетном режиме нагружения картина распределения напряжений в основных элементах металлоконструкции изменяется, и максимальные эквивалентные напряжения концентрируются в вертикальных листах шкворневых балок, при сжатии они достигают значения в 146 МПа, что составляет 94 % от допускаемых напряжений. В элементах хребтовых балок уровень напряжений не превышает 68 МПа.

Динамика изменения коэффициента запаса прочности по допускаемым напряжениям от пошагового уменьшения толщины металла для основных несущих элементов кузова вагона метрополитена (хребтовых и шкворневых балок) представлена на рисунке 6.

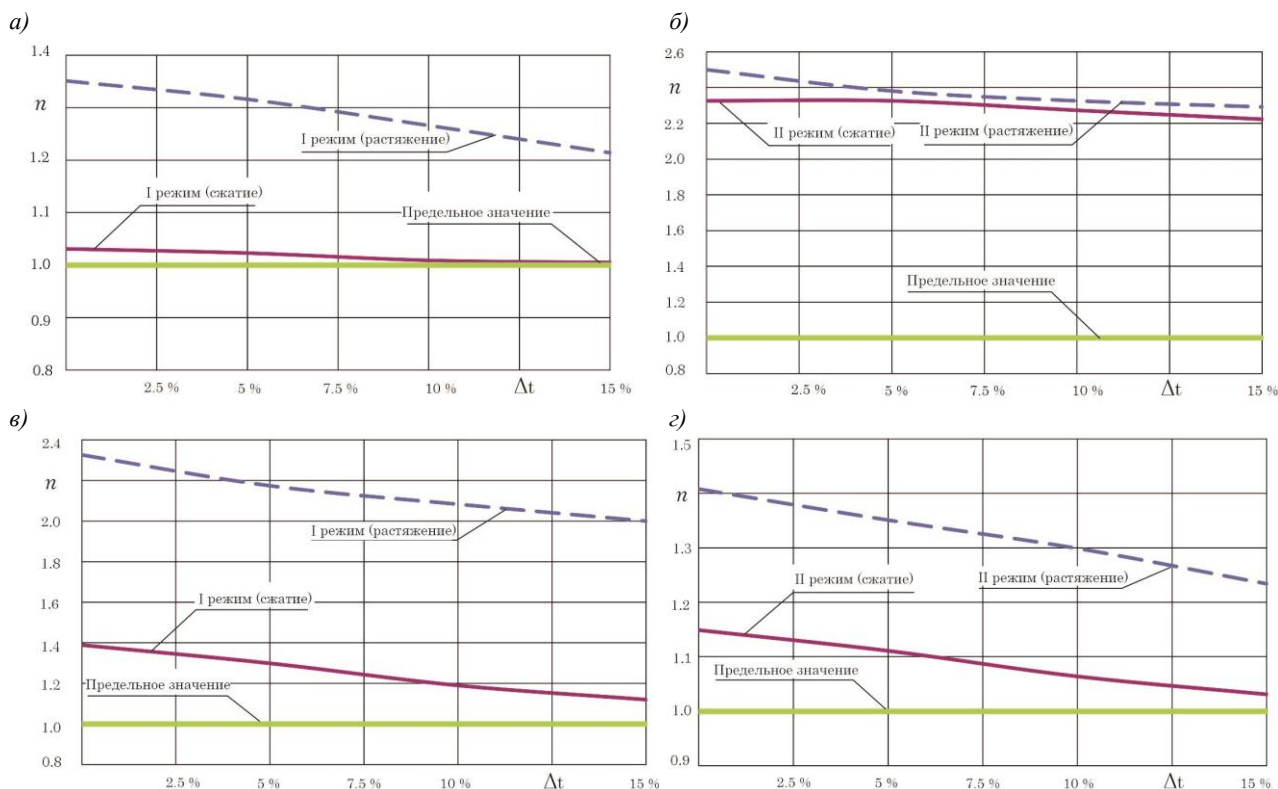


Рисунок 6 – Графики зависимости: хребтовые балки при I (а), II (б); шкворневые балки при I (в) и II (з) режимах нагружения

### Заключение.

1 В рамках реализации процедуры оценки остаточного ресурса несущих конструкций вагонов метрополитена после выработки срока службы выполнено обследование их технического состояния и получены значения остаточных толщин конструктивных элементов. Установлено, что коррозионный износ в целом не превышает 7 % от номинальных значений.

2 Разработаны конечно-элементные модели металлоконструкций вагонов метрополитена моделей 81-717 (головной вагон) и 81-714 (промежуточный вагон), позволяющие производить оценку прочности конструкции индивидуально для каждого вагона с учетом его фактического коррозионного износа.

3 Выполнен комплекс расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций головного и промежуточного вагона при фактическом техническом состоянии на нагрузки, регламентированные актуальной нормативной документацией. Установлено, что с учетом выявленных значений коррозионного износа

несущие конструкции вагонов метрополитена соответствуют требованиям прочности.

4 Выполнена серия расчетов на прочность с учетом прогнозируемого технического состояния при назначении нового срока службы. Установлено, что в паре областей значения напряжений при 15 % утонении приближаются к предельно допустимым значениям.

5 Показана динамика изменения коэффициента запаса прочности по допускаемым напряжениям от пошагового уменьшения толщины металла для хребтовых и шкворневых балок, которые являются одними из основных несущих элементов кузова вагона метрополитена.

### Список литературы

1 **Афанаськов, П. М.** Прогнозирование напряженно-деформированного состояния несущих конструкций вагонов метрополитена по критерию коррозионного износа / П. М. Афанаськов, В. В. Белогуб, Л. В. Огородников // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2019. – С. 96–97.

2 Оценка остаточного ресурса несущей конструкции вагона пассажирского после длительной эксплуатации / А. В. Путьто

[и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 2(41). – С. 42–45.

3 **Воико, А.** Assessment of remaining resource of tank wagons with expired life time. Summary of Doctoral Dissertation / A. Boiko // Engineering sciences. – 2013. – 39 p.

4 **Бороненко, Ю. П.** О корректировке «Положения о продлении срока службы грузовых вагонов, курсирующих в международном сообщении» / Ю. П. Бороненко, А. В. Третьяков, Е. А. Жаровой // Евразия Вести. – 2012. – № X. – С. 13–14.

5 **Afanaskou, P.** Estimation of the Residual Resource of a Dumping Wagon for Transportation of Bulky Cargo after Long-

term Operation / P. Afanaskou, R. Charnin // Transport means 2021. – 2021. – Part I. – P. 402–405.

6 **Борисов, С. В.** Прогнозирование остаточного ресурса и продление срока службы вагонов метрополитена / дис. ... канд. техн. наук (05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация) / С. В. Борисов // ПГУПС. – 2006. – 168 с.

7 Нормы для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена колеи 1520 мм : СТО СДС ОПЖТ-05. – М., 2010. – 120 с.

8 Положение о продлении срока службы вагонов метрополитена. – Минск, 2015. – 7 с.

Получено 31.10.2022

**P. M. Afanaskou, Ye. N. Kanavalau, V. V. Komissarov, A. K. Golovnich, A. V. Putsiata, A. V. Shilovich.** Assessment of the strength of bearing structures of metro cars with prediction of their technical condition.

As part of the implementation of the procedure for assessing the residual life of the supporting structures of subway cars after the end of their service life, a survey of their technical condition was carried out and the values of the residual thicknesses of structural elements were obtained. It has been established that corrosive wear does not exceed 7 % of the nominal values. Finite element models of metal structures of cars of models 81-717 (first car) and 81-714 (intermediate car) have been developed. A set of calculations of the stress-strain state of the structures of the head and intermediate car for loads regulated by the current regulatory documentation has been completed. It has been established that the supporting structures of subway cars meet the established strength requirements.