

УДК 629.421.4

*А. В. ПУТЯТО, доктор технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого*

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА РЕСУРСА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Приведен перечень основных работ, необходимых для оценки остаточного ресурса металлоконструкций грузовых вагонов с целью обоснования их дальнейшей безопасной эксплуатации, включающий пять этапов. Для повышения оперативности определения ресурса несущих конструкций вагонов с целью продления их срока службы предложено автоматизировать ряд этапов работ. Приведено описание расчетно-экспериментальной методики оценки остаточного ресурса на основе результатов виртуальных и натуральных испытаний металлоконструкций вагонов, а также разработанной компьютерной модели ее автоматизации.

**Введение.** Практика эксплуатации и техническое состояние ряда типов и моделей грузовых вагонов показывают, что указанный в технических условиях срок службы в большинстве случаев оказывается меньшим предельного. Во многом это связано как с существенным запасом прочности, заложенным при проектировании, так и с особенностями эксплуатации конкретного типа вагонов, в том числе сезонностью их использования [1].

В настоящее время в Республике Беларусь и иных странах, использующих железнодорожную колею 1520 мм, принято решение о частичном отказе от регламентированных нормативных сроков службы для тех единиц подвижного состава, индивидуальный ресурс которых позволял разрешить их дальнейшую безаварийную эксплуатацию. В этом направлении разработана довольно непростая технология продления срока службы вагонам, основы которой регулируются Положением о продлении срока службы грузовых вагонов, курсирующих в международном сообщении [2]. Технология предусматривает ряд этапов работ, среди которых выполнение комплекса расчетов и испытаний несущих конструкций длительно эксплуатируемых вагонов, в результате выполнения которых имеет место достаточно большой объем данных, подлежащих дальнейшему анализу.

Целью настоящего исследования является разработка моделей и программ, позволяющих автоматизировать обработку результатов расчетов и испытаний для оперативного расчета остаточного ресурса несущих конструкций вагонов.

**Основные этапы работ при оценке остаточного ресурса.** К основным этапам работ, проводимых для вынесения технического решения о продлении срока службы вагону, относятся следующие позиции [1].

1 Изучаются особенности конструкции вагона, устанавливаются материалы, из которых изготовлены несущие элементы, выполняется анализ информации, связанной с проведением технических освидетельствований и ремонтов, изучаются условия эксплуатации.

2 Разрабатываются диагностические карты, 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; отмечается наличие дефектов (трещин, деформаций и т. п.), а также даются характеристики применяемого оборудования. По результатам технического обследования выполняется отбраковка вагонов, не подлежащих ремонту согласно действующей нормативной документации, а также отбирается типовой представитель для дальнейшего проведения контрольных испытаний.

3 Выполняется комплекс виртуальных испытаний (расчетов) с целью установления соответствия конструкции вагона, имеющей износ в результате длительной эксплуатации, актуальной нормативной документации.

4 По результатам выполнения расчетов, с учетом информации, полученной при техническом обследовании вагонов, разрабатывается схема наклейки тензометрических датчиков для дальнейшего проведения контрольных испытаний типового представителя. Выполняется комплекс контрольных испытаний, включающих режимы нагружения, характерные специфике эксплуатации: соударение вагонов, поездной режим движения в поезде или его имитация, загрузка-разгрузка.

5 Оценка остаточного ресурса несущей конструкции на основе результатов расчетов и испытаний.

В контексте поставленной цели, автоматизации среди перечисленных основных этапов работ в большей степени поддаются этапы 3 и 5.

**Автоматизация виртуальных испытаний вагонов.** Опыт выполнения конструкторских работ показал, что для расчета прочности кузовов вагонов, как правило, используется метод конечных элементов и необходима разработка моделей, адаптивных к оперативному внесению конструктивных изменений. В связи с этим в процессе разработки конечно-элементных моделей, создавались программные коды, в которых параметрически задавались как линейные характеристики самой конструкции (размеры элементов, толщины и пр.), так и механические характеристики материалов. С использованием описанных подходов специалистами отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» разработано более двадцати многофакторных конечно-элементных моделей различных типов и моделей эксплуатируемых вагонов (рисунок 1).

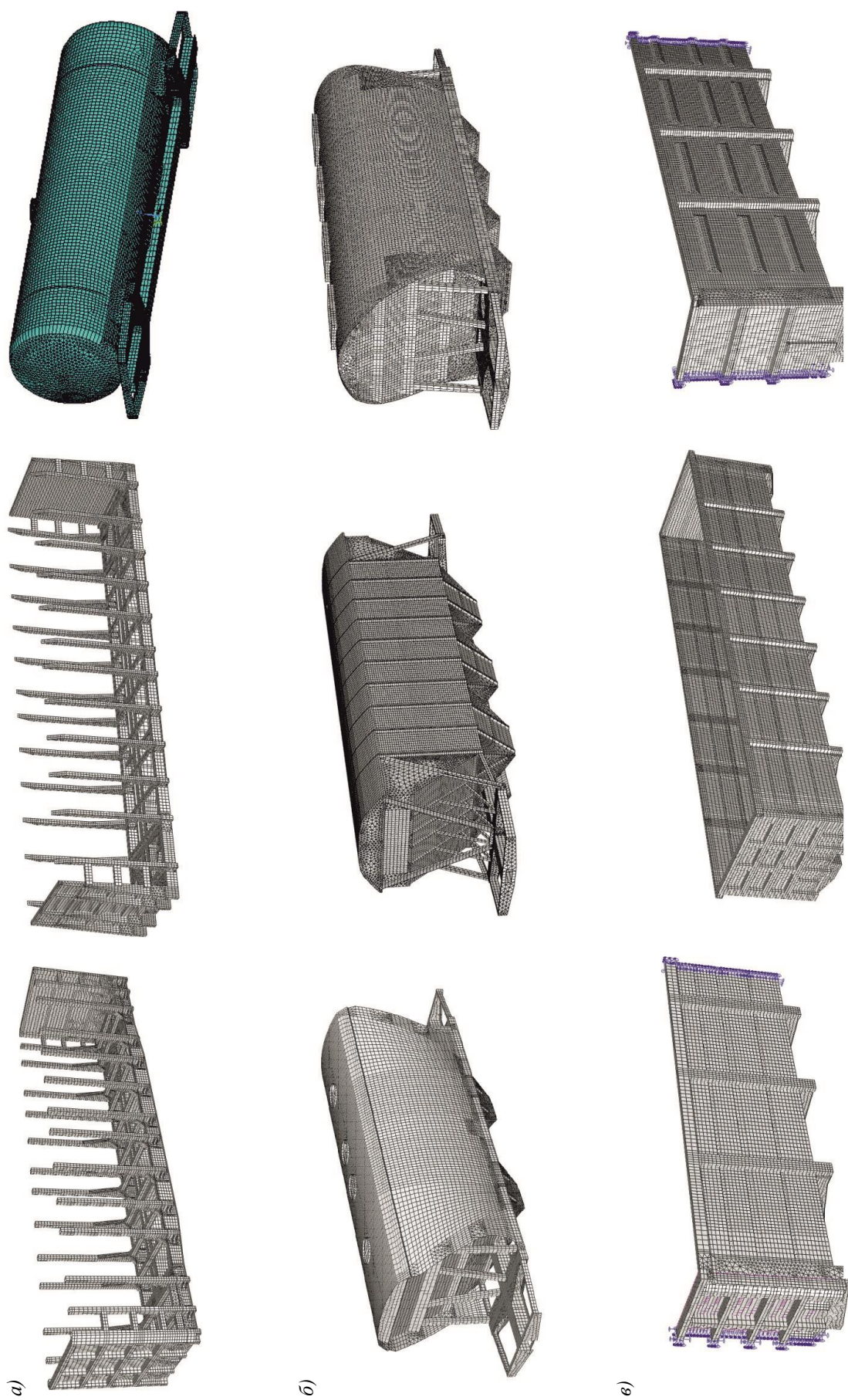


Рисунок 1 – Многофакторные расчетные модели различных типов и моделей эксплуатируемых вагонов:  
*а* – вагон-платформа для перевозки лесных грузов и вагон-цистерна для перевозки нефтепродуктов; *б* – вагон-бункерного типа для перевозки цемента, зерна и минеральных удобрений;  
*в* – универсальный полувагон

**Методика оценки остаточного ресурса и ее автоматизация.** Параметром, характеризующим циклическую прочность, является коэффициент запаса сопротивления усталости, который представляет собой отношение предела выносливости ( $\sigma_{a,N}$ ) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов  $N_0 = 10^7$  к величине амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла ( $\sigma_{a,\varepsilon}$ ), приведенной к базовому числу циклов  $N_0$  и эквивалентной повреждающему воздействию эксплуатационных напряжений за расчетный срок службы.

Параметр  $\sigma_{a,\varepsilon}$  включает в себя срок службы металлоконструкции и определяется при  $k$  режимах нагружения по формуле

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

где  $m$  – показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах;  $N_c^k$  – суммарное число циклов динамических напряжений за расчетный срок службы для  $k$ -го режима нагружения;  $N_0$  – базовое число циклов;  $\sigma_{ai}^k$  – уровень амплитуд напряжений в  $i$ -м интервале  $k$ -го режима нагружения;  $p_i^k$  – вероятность (частота) действия уровня амплитуд  $\sigma_{a,\varepsilon}$  в  $i$ -м 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, учитывающий условия и интенсивность эксплуатации, а также связывающий суммарное число циклов динамических напряжений с расчетным суммарным сроком службы для  $k$ -го режима нагружения;  $T_p$  – суммарный расчетный срок службы.

Таким образом, оценка остаточного ресурса выполняется по следующей формуле:

$$T_k = \frac{\left( \frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m N_0}{N_c^I \sum_i (\sigma_{ai}^I)^m p_i^I + N_c^{II} \sum_j (\sigma_{aj}^{II})^m p_j^{II} + N_c^{III} \sum_k (\sigma_{ak}^{III})^m p_k^{III}},$$

где  $\sigma_{a,N}$  – предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов  $N_0 = 10^7$ ,

$$\sigma_{a,N} = \bar{\sigma}_{a,N} (1 - z_p v_{\sigma_{a,N}}),$$

$\bar{\sigma}_{a,N}$  – медианное значение предела выносливости контрольной зоны,

$$\bar{\sigma}_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{(\bar{k}_{\sigma})_k},$$

$\bar{\sigma}_{-1}$  – среднее значение предела выносливости гладкого стандартного образца из материала при симметричном цикле изгиба на базе  $10^7$ ;  $(\bar{k}_{\sigma})_k$  – среднее значение общего коэффициента снижения предела выносливости в выбранной контрольной зоне по отношению к пределу выносливости гладкого стандартного образца;  $z_p$  – квантиль распределения  $\sigma_{a,N}$ , соответствующий односторонней вероятности 95 %;  $v_{\sigma_{a,N}}$  – коэффициент вариации предела

выносливости материала;  $[n]$  – минимально допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости для выбранной зоны вагона;  $m$  – показатель степени в уравнении кривой усталости;  $N_c^I, N_c^{II}, N_c^{III}$  – числа циклов за 1 год эксплуатации для каждой из эксплуатационных нагрузок соответственно;  $\sigma_{ai}^I, \sigma_{ai}^{II}, \sigma_{ai}^{III}$  – амплитуды динамических напряжений приведенные к симметричному циклу для различных эксплуатационных нагрузок и их диапазонов;  $p_i^I, p_j^{II}, p_k^{III}$  – вероятности действия уровня амплитуд  $\sigma_{ai}^I, \sigma_{ai}^{II}, \sigma_{ai}^{III}$ .

Выполнение испытаний несущей конструкции вагона выполняется в соответствии с требованиями [3]. При этом рассматривается три вида нагружения конструкции вагона: режим «сброс с клиньев», имитирующий колебания вагона при движении по участку пути; режим соударения вагонов и режим загрузки и разгрузки вагона. При режиме «сброс с клиньев» вагон накатывается на клинья, расположенные под колесами и далее «сбрасывается» с них, в результате чего выполняется регистрация динамических напряжений в контрольных областях несущей конструкции (посредством тензометрирования), а также определяется коэффициент вертикальной динамики. При режиме соударения вагонов выполняется ударное нагружение испытуемого вагона посредством наката и последующего удара в него вагоном-бойком. При этом выполняется регистрация сил соударения вагонов с использованием тензометрической автосцепки, а также запись изменения динамических напряжений в контрольных зонах несущей конструкции вагона. При режиме загрузки и разгрузки вагона также выполняется регистрация изменения напряжений в контрольных зонах конструкции.

Автоматизация расчета по приведенной выше методике реализована в компьютерной программе, разработанной в среде Visual Basic for Applications в EXCEL. Она позволяет программно получить значения повреждаемости для различных режимов эксплуатации, а также значение остаточного ресурса контрольной зоны несущей конструкции вагона. Программа включает пять этапов.

На этапе 1 (рисунок 2) пользователь выполняет ввод общих исходных данных, характерных для данного типа вагона и контрольной области его конструкции, ресурс которой определяется: среднесуточный груженный пробег вагона, среднетехническая скорость вагона, количество дней эксплуатации в году, статический прогиб рессорного подвешивания, предел выносливости материала контрольной области конструкции, коэффициент снижения предела выносливости контрольной области конструкции, предел прочности материала контрольной области конструкции, значение допустимого коэффициента запаса усталостной прочности.

На этапе 2 (рисунок 3) выполняется расчет повреждающего воздействия на контрольную область при действии вертикальных нагрузок, возникающих в результате вертикальных колебаний вагона при движении по рельсовой колее. В программном поле этапа 2 предусмотрены окна для ввода значений максимального и минимального напряжений цикла, возникающих в контрольной области конструкции, а также коэффициента вертикальной динамики вагона, которые получены экспериментальным путем при режиме «сброс вагона с клиньев».



Рисунок 2 – Экранная копия этапа 1 программы



Рисунок 3 – Экранная копия этапа 2 программы

На этапе 3 (рисунок 4) выполняется расчет повреждающего воздействия на контрольную область при действии продольных нагрузок, возникающих в результате соударения вагонов в процессе эксплуатации. В программном поле этапа 3 предусмотрены окна для ввода значений максимального и минимального напряжений цикла, возникающих в контрольной области конструкции при различных значениях силы соударения вагонов, которые получены экспериментальным путем.



Рисунок 4 – Экранная копия этапа 3 программы

На этапе 4 (рисунок 5) выполняется расчет повреждающего воздействия на контрольную область при действии нагрузок, возникающих в результате загрузки и разгрузки вагона в процессе эксплуатации. В программном поле этапа 4 предусмотрены окна для ввода значений максимального и минимального напряжений

цикла, возникающих в контрольной области конструкции, которые получены экспериментальным путем.



Рисунок 5 – Экранная копия этапа 4 программы

Этап 5 является заключительным и предусматривает расчет остаточного ресурса контрольной области несущей конструкции грузового вагона.

Компьютерная программа представлена одним основным файлом resource.xlsm. Программа может быть реализована в операционной системе не ниже Windows 7. Обязательным условием работы программы является наличие установленной программы Microsoft Excel версии не ниже 2007 с включенными макросами.

#### Заключение.

1 Приведено описание основных этапов работ по оценке остаточного ресурса несущих конструкций грузовых вагонов.

2 Для автоматизации определения ресурса разработаны конечно-элементные многофакторные расчетные модели ряда моделей металлоконструкций грузовых вагонов для оценки прочности с учетом коррозионных повреждений.

3 Разработана компьютерная программа автоматизации расчета ресурса на основе расчетно-экспериментальной методики, базирующейся на результатах виртуальных и натуральных испытаний.

#### Список литературы

1 **Путято, А. В.** Прогнозирование остаточного ресурса вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации с учетом фактических физико-механических характеристик материала несущей конструкции / А. В. Путято, Е. Н. Коновалов, П. М. Афанасьев // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 1 (34). – С. 26–35.

2 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.

3 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.

Получено 17.04.2022

**A. Putsiata.** Automation of calculation of resource of freight cars after long-term operation.

The stages of evaluation of the residual resource of metal structures of freight cars are given. To increase the efficiency of determining the resource of bearing structures of cars in order to extend their service life, it is proposed to automate some stages. The description of the calculation and experimental methodology for estimation of the residual resource based on the results of calculation and tests of cars, as well as the developed computer model of its automation are given.