

УДК 629.466:629.4.018

А.В. ПУТЯТО, д-р техн. наук; Е.Н. КОНОВАЛОВ  
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВАГОНОВ СПЕЦИАЛЬНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ

*Предложена методика прогнозирования ресурса несущих конструкций вагонов с различным техническим состоянием на основе результатов испытаний типового представителя, реализованная в виде компьютерной программы. Приведены результаты апробации предложенной методики на примере вагонов специального подвижного состава после длительной эксплуатации. Получены зависимости остаточного ресурса для различных областей несущей конструкции от их технического состояния (утонения) для вагона хоппер-дозатора и вагона-платформы для перевозки рельсошпальной решетки. Определен «вклад» в расход ресурса различных характерных режимов нагружения. Установлено, что при прогнозировании ресурса несущей конструкции вагона с учетом изменения ее технического состояния следует рассматривать совокупность зависимостей ресурса контрольных областей конструктивных элементов от их геометрических параметров. Разработанный подход прогнозирования ресурса предлагается использовать как при оценке остаточного ресурса вагонов после длительной эксплуатации, так и при разработке модифицированных конструкций вагонов с увеличенной долговечностью.*

**Ключевые слова:** специальный вагоны, испытания, техническое состояние, несущая конструкция, типовой представитель, прогнозирование, ресурс

**Введение.** Практика эксплуатации и техническое состояние вагонов, в особенности специальных, показывают, 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.

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, индивидуальный ресурс которых позволял разрешить их дальнейшую безаварийную эксплуатацию [5]. Отметим, что проблема оценки ресурса вагонов выработавших нормативный срок службы также актуальна и для других стран [1, 2, 6].

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 в части соответствия актуальной нормативной документации, но и фактические физико-механические характеристики металла. В то же время остается не решенной задача определения остаточного ресурса (или установления его отсутствия) несущей конструкции вагона при техническом состоянии отличном от состояния вагона (типового представителя), прошедшего комплекс соответствующих испытаний. Под типовым представителем будем понимать аналогичную модель (конструкцию) вагона.

**Методика прогнозирования ресурса несущих конструкций вагонов с различным техническим состоянием.** Реализация описанной в [4] расчетно-экспериментальной методики позволяет для  $i$ -й контрольной точки

несущей конструкции испытанного вагона с  $j$ -м техническим состоянием (толщиной металла  $t_i$ ) получить значение остаточного ресурса  $T_i^j$ . Для определения остаточного ресурса  $i$ -й контрольной точки несущей конструкции с  $(j + 1)$ -м техническим состоянием необходимо иметь массив амплитудных значений динамических напряжений в рассматриваемой контрольной точке с толщиной  $\delta_{i,j}^j \cdot t_i$  при  $k$ -м характерном режиме нагружения. Здесь  $\delta_{i,j}^j$  — коэффициент  $j$ -го состояния системы, учитывающий износ (утонение) несущей конструкции в  $i$ -й контрольной точке.

Учитывая, что получение массива экспериментальных данных динамических напряжений для каждого характерного режима нагружения и широкого диапазона изменений  $\delta_{i,j}^j$  задача весьма дорогостоящая и зачастую не выполнимая, необходимо разработать процедуру определения массива соответствующих амплитудных напряжений на основе имеющихся экспериментальных данных типового представителя. Решение поставленной задачи выполнено на основе результатов виртуальных испытаний несущей конструкции вагона (комплекс расчетов на основе компьютерного моделирования), которые позволяют получить изменение напряжений в  $i$ -й контрольной точке для  $k$ -го характерного режима нагружения в зависимости от технического состояния  $j$ .

Практика выполнения расчетов, в том числе применительно к объектам исследования настоящей работы [3, 7], показала, что изменение эквивалентных напряжений от толщины элементов при различных режимах нагружения с высокой достоверностью аппроксимируются уравнением вида  $\sigma = at + b$ , где  $t$  — толщина конструктивного элемента в контрольной точке,  $a$ ,  $b$  — некоторые постоянные. Кроме того, установлено, что процент изменения напряжений в полученных зависимостях для широкого спектра нагрузок в пределах каждого шага изменения  $\delta_{i,j}^j$  остается практически неизменным. Так для  $i$ -й контрольной точки при  $k$ -м режиме нагружения для  $n$ -го грузового состояния можно записать [3]:

$$\left\{ \frac{\sigma_i^{j+1} - \sigma_i^j}{\sigma_i^j} 100 \% \right\}_{k_n} \approx const.$$

Таким образом, базируясь на экспериментальных данных испытаний типового представителя (обозначим с индексом «э») и полученных расчетных значений (обозначим с индексом «р»), получена возможность определения прогнозных, расчетно-экспериментальных значений динамических напряжений (обозначим с индексом «рэ») в  $i$ -й контрольной точке конструкции вагона в зависимости от  $j$ -го технического состояния для  $k$ -го характерного режима нагружения. Исходя из вышеизложенного, для получения прогнозных расчетно-экспериментальных зависимостей при режиме нагружения с широким спектром нагрузок достаточно воспользоваться одной из расчетных зависимостей, что существенно облегчает объем вычислений. Так для  $k$ -го режима нагружения и  $j + 1$  технического состояния массив динамических напряжений в  $i$ -й контрольной точке можно определить по формуле:

$$\left\{ \sigma_i^{j+1} \right\}_{k_n}^{pэ} = \left[ 1 + \left\{ \frac{\sigma_i^{j+1} - \sigma_i^j}{\sigma_i^j} \right\}_{k_n}^p \right] \cdot \left\{ \sigma_i^j \right\}_{k_n}^э.$$

Полученный массив фактически представляет собой совокупность зависимостей вида  $\sigma_i^{j+1} = f(\delta_{i_i}^j \cdot t_i)$ . Приведенные зависимости подставляются в методику оценки остаточного ресурса, причем в качестве дополнительной экзогенной переменной, наряду со значениями механических характеристик материала, сезонностью эксплуатации и т. п., выступает параметр, связанный с геометрическими характеристиками области в контрольной точке или ее аналог относительно характеристики контрольной области типового представителя.

Таким образом, для любого  $j$ -го технического состояния получена возможность оценки ресурса  $i$ -й контрольной области, т. е. получения массива долговечностей  $\{T_i^j\}$ .

**Апробация методики прогнозирования остаточного ресурса на примере несущих конструкций вагонов специального подвижного состава.** В работах [4, 7] выполнена оценка остаточного ресурса несущих конструкций вагонов специального подвижного состава: хоппер-дозатора и вагона-платформы для перевозки рельсошпальной решетки, прошедших полный комплекс соответствующих испытаний. Рассмотрим реализацию описанной методики прогнозирования остаточного ресурса при изменении технического состояния базовых конструктивных элементов применительно к указанным типам вагонов, базируясь на имеющихся экспериментальных данных. К рассмотрению приняты три характерных режима нагружения: соударение вагонов (режим *A*), движение в составе поезда (режим *B*), режим загрузки-разгрузки (режим *C*).

На рисунке 1 приведены значения остаточного ресурса в контрольных точках, а также диаграмма «вкладов» в его расход различных режимов нагружения для вагона хоппер-дозатора [4]. К наиболее нагруженным конструктивным областям вагона хоппер-дозатора относятся: нижняя полка хребтовой балки вблизи сочленения со шкворневой с внутренней стороны вагона (контрольные точки № 1 и № 15, нижний и верхний пояс); нижний лист шкворневой балки вблизи сочленения с хребтовой (контрольная точка № 3).

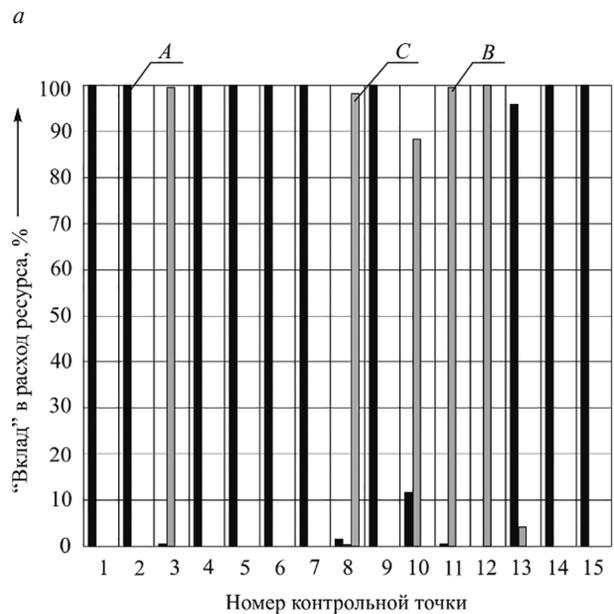
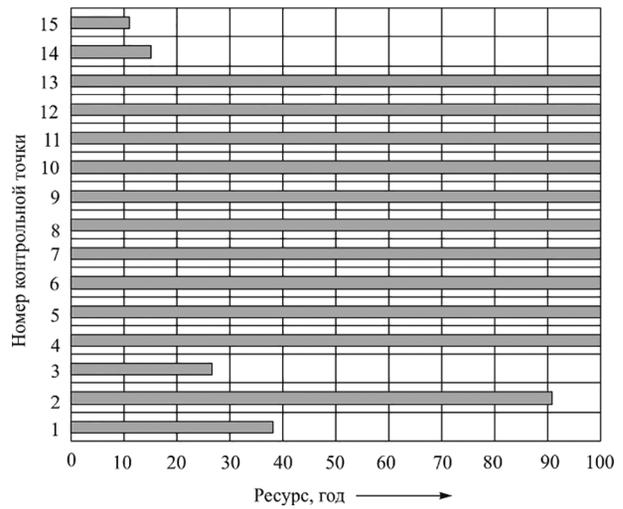
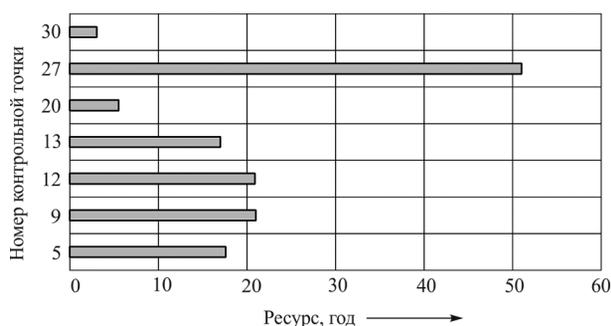


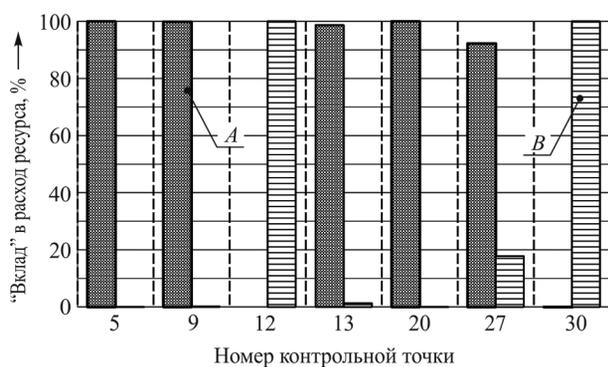
Рисунок 1 — Остаточный ресурс в контрольных точках конструкции и процент «вклада» различных режимов нагружения в расход остаточного ресурса (вагон хоппер-дозатор)

К наиболее нагруженным конструктивным областям вагона-платформы для перевозки рельсошпальной решетки относятся [7]: верхняя полка хребтовой балки вблизи сочленения со шкворневой в консольной части вагона (контрольные точки № 30); нижний лист хребтовой балки вблизи сочленения со шкворневой с внутренней стороны вагона (контрольная точка № 12); нижняя полка боковой балки вблизи сочленения с основной поперечной балкой (контрольные точки № 20) и промежуточной поперечной балкой (контрольные точки № 5). На рисунке 2 приведены значения остаточного ресурса в указанных контрольных точках, а также диаграмма «вкладов» в его расход различных режимов нагружения для вагона-платформы. Отметим, что режим *C*, как показали ранее проведенные исследования не оказывает практически никакого влияния на показатель долговечности для вагона-платформы.

Приведенные результаты исследований показали, что каждый из рассматриваемых режимов нагружения



а



б

Рисунок 2 — Остаточный ресурс в контрольных точках конструкции и процент «вклада» различных режимов нагружения в расход остаточного ресурса (вагон-платформа)

вносит свой «вклад» в расход ресурса, величина значения которого зависит от расположения контрольной точки.

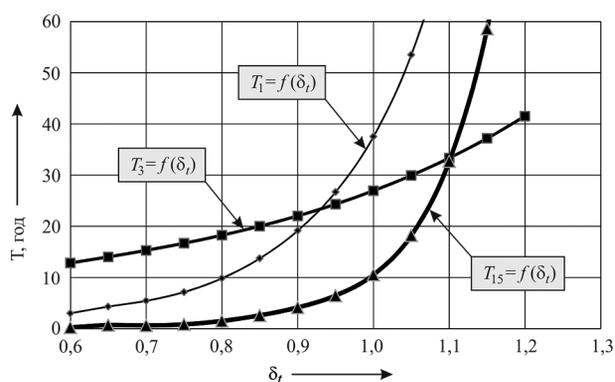
Так, рассматривая несущую конструкцию вагона хоппер-дозатора, наибольший «вклад» в расход ресурса контрольной точки № 15 вносит нагруженность, соответствующая режиму *A*, а для точки № 3 — режиму *B*. Используя полученные диаграммы, можно существенно сократить объем экспериментальных исследований при оценке ресурса конструкции.

На рисунке 3 приведены зависимости остаточного ресурса в различных областях несущих конструкций рассматриваемых типов вагонов от утонения их элементов в соответствующих контрольных точках.

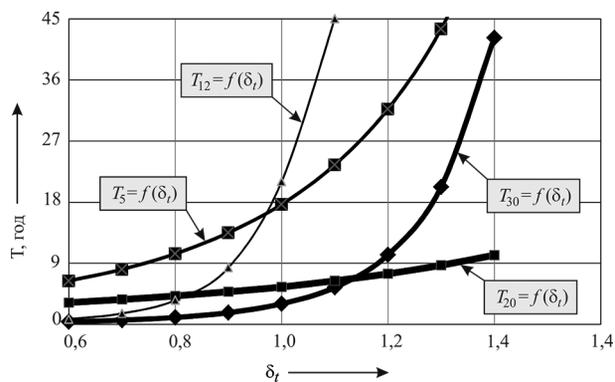
Результаты расчетов показали, что прогнозирование ресурса несущей конструкции с техническим состоянием, отличным от испытанного вагона, следует выполнять не по наиболее «слабому элементу», а по совокупности контрольных точек, поскольку градиент изменения ресурса для различных контрольных точек существенно различен. Например, в рассмотренном случае применительно к конструкции вагона хоппер-дозатора для вагона испытанного и объекта с меньшими толщинами «ресурсопределяющей» является контрольная точка № 15. В то же время, при толщинах более чем на 10% больших от  $t_{исп}$  (толщина конструктивного элемента в испытанном вагоне) — определяющим станет ресурс для контрольной области № 3.

Применительно к вагону-платформе установлено, что «ресурсопределяющей» является контрольная точка № 30. В то же время при необходимости управления (повышения) остаточным ресурсом «ресурсопределяющей» станет точка № 20.

**Заключение.** В результате выполнения работы получены следующие основные результаты:



а



б

Рисунок 3 — Зависимости остаточного ресурса в контрольных зонах от толщины соответствующих конструктивных элементов  $\delta_t$  (в долях относительно значения на испытанном вагоне) для вагона хоппер-дозатора (а) и вагона-платформы (б)

1. Предложена методика прогнозирования ресурса несущих конструкций вагонов с различным техническим состоянием на основе результатов испытаний типового представителя.

2. Выполнена апробация методики при оценке остаточного ресурса несущих конструкций вагонов хоппер-дозаторов и вагонов-платформ для перевозки рельсошпальной решетки, по результатам которой получены зависимости ресурса от технического состояния (утонения конструктивных элементов) установленных контрольных точек.

3. Установлено, что оценку ресурса несущей конструкции вагона, в том числе остаточного, с техническим состоянием отличным от состояния типового представителя можно выполнять с использованием результатов экспериментальных исследований последнего, причем при прогнозировании следует рассматривать совокупность зависимостей ресурса контрольных областей конструктивных элементов от их геометрических параметров.

4. Наряду с оценкой остаточного ресурса предложенный подход может быть использован при разработке модифицированных конструкций вагонов, отличающихся от базовой модели повышенной долговечностью.

#### Список литературы

1. Жарова, Е.А. Обоснование вариантов продления сроков службы специализированных вагонов-платформ: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Жарова. — СПб., 2008. — 129 с.
2. Зимакова, М.В. Продление срока службы вагонов-цистерн с учетом изменения физико-механических свойств металлоконструкций базовых узлов: дис. ... канд. техн. наук / М.В. Зимакова. — СПб., 2012. — 144 с.

3. Коновалов, Е.Н. Прогнозирование ресурса несущих конструкций вагонов с различным техническим состоянием на основе результатов испытаний типового представителя / Е.Н. Коновалов, А.В. Пулято // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2016. — № 3(51). — С. 208–214.
4. Пулято, А.В. Прогнозирование остаточного ресурса вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации с учетом фактических физико-механических характеристик материала несущей конструкции / А.В. Пулято, Е.Н. Коновалов, П.М. Афанасьев // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016. — № 1(34). — С. 26–35.
5. Третьяков, А.В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации / А.В. Третьяков. — СПб.: Изд-во ОМ-Пресс, 2004. — 348 с.
6. Boiko, A. Assessment of remaining resource of tank wagons with expired life time: Summary of Doctoral Dissertation: Engineering sciences / A. Boiko. — Riga, 2013. — 39 p.
7. Putsiata, A. Prediction of a Resource of Flat Wagon's Frame for Transportation of Packages of Rail and Ties after Long Term Operation / A. Putsiata, Y. Kanavalau // Mechanika-2017: Proc. of 22nd International Conference, Kaunas, 2017 / University of Technology. — Pp. 312–317.

---

Putsiata A.V., Kanavalau Y.N.

**Prediction of the resource of bearing structures of cars of special rolling stock with the different technical condition**

The technique of prediction of a resource of cars's construction with a different technical condition is offered. It is based on use of tests's results of the typical representative and realized in the form of the computer program. Results of application of a technique for cars of a special rolling stock after long-term service are resulted. Dependences of a residual resource for different areas of a bearing construction from their technical condition for the car a hopper-batcher and the flat wagon for transportation of packages of rail and ties are received. Importance to expense of a resource of different types of loads is defined. Results have shown, that at prediction of a resource taking into account change of its technical condition set of dependences of a resource of control areas of constructive elements from their geometrical parameters follows it is necessary to consider. The technique can to be used for an estimation of a residual resource of wagons after long-term service and by working out of the modified constructions with the increased durability.

*Поступил в редакцию 04.07.2017.*