

# Влияние надежности колесных пар инновационных вагонов в эксплуатации на потребность в новых колесах



**Ю. П. Бороненко,**  
д-р техн. наук, профессор,  
зав. кафедрой «Вагоны  
и вагонное хозяйство»  
Петербургского госу-  
дарственного универси-  
тета путей сообщения  
Императора Александра I  
(ПГУПС)



**А. Б. Гайипов,**  
аспирант ПГУПС



**Т. М. Белгородцева,**  
зав. научно-исследова-  
тельской лабораторией  
«Динамика вагонов»  
кафедры «Вагоны и вагон-  
ное хозяйство» ПГУПС

В статье определены показатели надежности колесных пар инновационных вагонов по результатам поднадзорной эксплуатации. Проведен сравнительный анализ вероятности безотказной работы инновационных и обычных вагонов. Показано, что, благодаря увеличенной надежности инновационных вагонов при увеличении их доли в парке грузовых вагонов, потребность в колесах будет снижаться.

Парк грузовых вагонов Российской Федерации растет благодаря производству нового подвижного состава. Сегодня средний возраст работающего на сети грузового вагонного парка составляет около 13 лет, а это самый лучший показатель в Европе [1]. В то же время поступление вагонов на внеплановый ремонт непрерывно возрастает (рис. 1). В 2018 г. количество отцепленных вагонов в текущий ремонт превысило 1,3 млн. Согласно статистическим данным, рост количества отцепок 2018 г. по отношению к 2017 г. составил 0,9%. В 2019 г. эта тенденция сохранилась.

Основной причиной отцепок являются неисправности колесных пар и буксовых узлов вагонов (рис. 2). Согласно данным статистики, отцепка вагонов в среднем осуществляется 3458 раз в сутки, что равно 144 вагонам в час или 2,4 вагона в минуту. Рост отцепок грузовых вагонов в текущий внеплановый ремонт вызывает увеличение расходов на ремонт и задержку сформированных составов или транзитных поездов [2].

Как показал анализ, рост отцепок вагонов вызван не усилением контроля за толщиной гребня колесных пар (ОАО «РЖД» начало широкое применение автоматизированной диагностической системы по контролю параметров колес-

№	Причина отцепки	Кол-во отцепок, тыс. вагонов
1.	Колесная пара	491
2.	Кузов	402
3.	Тележка	279
4.	Буксовый узел	64
5.	Рама	49
6.	Автотормоз	46
7.	Автосцепка	39
8.	Прочие	26

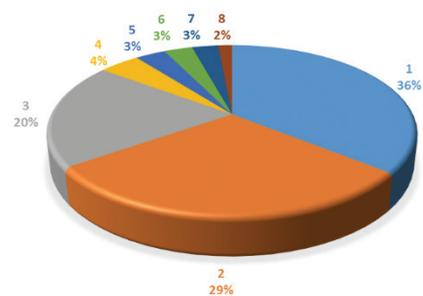


Рис. 2. Структура и причина отцепок в текущий ремонт грузовых вагонов в 2018 г.

ных пар вагонов «Комплекс»), а в первую очередь:

- низким качеством ремонта тележек, ведущим к быстрому износу гребней колес в эксплуатации;
- подачей под погрузку вагонов с толщиной гребня колеса менее 26 мм;
- обточкой колес при ремонтах на толщину гребней до 28 и 30 мм;
- использованием колесных пар от исключенных из эксплуатации вагонов [3–5].

С целью уменьшения отцепок приказом Минтранса № 349 от 05.10.2018



Рис. 1. Количество отцепленных вагонов ОАО «РЖД» во внеплановый ремонт за 5 лет

№	Причина отцепки	Кол-во отцепок, тыс. вагонов
1.	Тонкий гребень	335
2.	Выщербины обода колеса	96
3.	Неравномерный прокат	34
4.	Остроконечный накат гребня	14
5.	Ползун	12

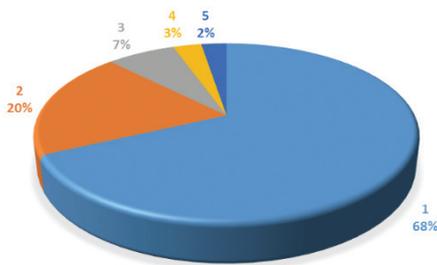


Рис. 3. Структура отцепок в текущий ремонт грузовых вагонов по неисправностям колесных пар за 2018 г.

в «Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» внесено изменение, позволяющее уменьшать допускаемую толщину гребня колеса вагонов до 24 мм. Чтобы уменьшить износ гребней колес, ОАО «РЖД» принимает меры по увеличению объемов лубрикации рельсов. Минпромторгом согласована закупка колес в Китайской Народной Республике. Но, несмотря на это, ряд авторов высказывают мнение, что на железных дорогах колеи 1520 мм ожидается сохранение дефицита колесных пар [6–8].

С другой стороны, в России освоено производство новых, инновационных вагонов на колесах из стали марки «Т», имеющих существенно большую наработку на отказ по неисправностям колесных пар [9, 10]. Часть обычных вагонов также производится с колесами, изготовленными из стали марки «Т», которая позволяет увеличить их ресурс, что подтверждено данными исследований [11]. Доля инновационных и обычных вагонов на колесах из стали марки «Т» постоянно увеличивается, и в будущем это должно привести к сокращению потребности в колесах.

Чтобы оценить влияние особенностей инновационных вагонов на потребность в колесах, были проанализированы результаты поднадзорной эксплуатации в 2013–2018 гг. полувагонов модели 12-9853 (рис. 4) и вагонов-хопперов модели 19-9870-01 (рис. 5), построенных соответственно в 2013 и 2014 гг. на Тихвинском вагоностроительном заводе.

Эти вагоны отличаются от обычных: более высокой нагрузкой на ось — до 25 т/ось, увеличенным межремонтным пробегом до 500 тыс. км и повышенной надежностью. В рассматриваемых вагонах установлены тележки нового поколения модели 18-9855 [1] с колесными парами РВ2Ш-957-Г с колесами из стали марки «Т» с криволинейной формой диска. Количество вагонов в поднадзорной эксплуатации составляло 400 единиц по каждому типу вагонов.

На первом этапе анализа результатов поднадзорной эксплуатации вагонов были определены показатели надежности их колес в эксплуатации.

Действующими нормативными документами отдельные показатели надежности как для колесных пар, так и для колес не установлены. Колесные пары — восстанавливаемый сменный элемент вагона, поэтому показатели их надежности определялись в соответствии с ГОСТ 27.002-2015 [12].

Надежность восстанавливаемых объектов оценивается следующими показателями: вероятность безотказной работы —  $P(t)$ , параметр потока отказов —  $w(t)$ , наработка на отказ —  $L_0$ . При определении показателей надежности колесных пар предлагаем использовать в качестве

аргумента не время, а пробег в километрах. Ниже приведены формулы для вычисления основных статистических показателей.

Вероятность безотказной работы:

$$P(L) = \frac{N(L)}{N} = 1 - \frac{r(L)}{N}; \quad (1)$$

где  $N(L)$  — число работоспособных вагонов к пробегу  $L$ ;

$N$  — общее число вагонов;

$r(L)$  — общее число отказов за пробег  $L$ .

Плотность распределения наработки до отказа:

$$f(L) = \frac{r(\Delta L_i)}{N\Delta L_i}; \quad (2)$$

где  $r(\Delta L_i)$  — число отказов в течение интервала  $\Delta L_i$ ;

$\Delta L_i$  — длина интервала пробега ( $i = 1, k$ ).

Интервал пробега принимался равным 50 тыс. км для полувагонов и 25 тыс. км для вагонов-хопперов.

Параметр потока отказов:

$$w(L) = \frac{r'(\Delta L_i)}{N\Delta L_i}; \quad (3)$$

где  $r'(\Delta L_i)$  — суммарное число отказов в интервале  $\Delta L_i$  ( $r'(\Delta L_i) \neq N\Delta L_i$ , так как вагоны в период наблюдения могут отказать несколько раз).

Наработка на отказ (средний пробег):

$$L_0 = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{r(L)}; \quad (4)$$



Рис. 4. Инновационный полувагон модели 12-9853

Технико-экономические показатели полувагона модели 12-9853:

- увеличена грузоподъемность до 75,5 т;
- снижена тара вагона до 24,5 т;
- увеличен объем кузова до 88 м<sup>3</sup>;
- применена новая тележка с допускаемой нагрузкой 25 т/ось.



Рис. 5. Инновационный хоппер для перевозки зерна модели 19-9870-01

Технико-экономические показатели вагона-хоппера модели 19-9870-01:

- увеличена грузоподъемность до 76,5 т;
- снижена тара вагона до 22,5 т;
- увеличен объем кузова до 101 м<sup>3</sup>;
- применена новая тележка с допускаемой нагрузкой 25 т/ось.

Табл. 1. Вероятность безотказной работы колес полувагонов модели 12-9853

Показатели	Пробег, тыс. км									
	0–150	150–200	200–251	250–300	300–350	350–400	400–450	450–500	500–550	550–600
тонкий гребень										
Количество отцепок	0	20	38	50	68	55	39	19	12	6
Вероятность безотказной работы	1	0,93	0,87	0,83	0,77	0,65	0,57	0,26	0,19	0,11
выщербина обода колеса										
Количество отцепок	0	4	8	15	26	28	18	11	7	2
Вероятность безотказной работы	1	0,96	0,93	0,87	0,78	0,76	0,65	0,58	0,46	0,35

Табл. 2. Вероятность безотказной работы колес вагонов-хопперов модели 19-9870-01

Показатели	Пробег, тыс. км									
	0–50	50–75	75–100	100–120	125–150	150–175	175–200	200–225	225–250	250–275
тонкий гребень										
Количество отцепок	0	0	5	15	47	74	85	73	35	9
Вероятность безотказной работы	1	1	0,98	0,95	0,83	0,64	0,43	0,25	0,12	0,05
выщербина обода колеса										
Количество отцепок	0	3	9	39	71	48	34	30	22	13
Вероятность безотказной работы	1	0,99	0,97	0,88	0,70	0,58	0,49	0,42	0,25	0,11

Табл. 3. Показатели надежности колесных пар по результатам поднадзорной эксплуатации

Тип вагона	Код неисправности	Наработка на отказ	Среднее количество отказов на 1 млн км	Максимальный темп износа гребней, мм/км 10 <sup>-4</sup>
Полувагон 12-9853	102	348 тыс. км	3,6	0,23
	107	423 тыс. км	2,8	
Хоппер 19-9870-01	102	164 тыс. км	6,3	0,49
	107	139 тыс. км	6,7	
Полувагон 12-132	102	101 тыс. км	7,9	0,8
	107	109 тыс. км	7,5	

Кроме того, в вагонном хозяйстве часто определялся показатель среднего количества отказов на 1 млн км пробега:

$$K_{1\text{млн}} = 10^6 \frac{r(L)}{L_{\Sigma}}; \quad (5)$$

где  $L_{\Sigma}$  – суммарный пробег вагонов за рассматриваемый период.

Для расчета потребности в колесах оценивается темп износа гребня колеса. Он обычно измеряется в миллиметрах на 10 тыс. км пробега:

$$t = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^N \left( \left( \sum_{j=1}^8 \sigma_{ij} \right) \frac{1}{L_i} \right), \quad (6)$$

где  $\sigma_{ij}$  – величина износа гребня в мм колеса  $j$  вагона номер  $i$ ;  $L_i$  – пробег вагона номер  $i$  в км.

Оценка показателей надежности колесных пар проводилась по двум самым распространенным видам отказов:

- тонкий гребень (код неисправности – 102);
- выщербина обода колеса (код неисправности – 107).

Первый вид отказа – деградационный, он обусловлен естественным процес-

сом износа гребня колеса при соблюдении установленных правил изготовления и эксплуатации колес [12].

Второй вид отказа обычно относят к эксплуатационным отказам, так как в большинстве случаев выщербины появляются на месте ползунов, образующихся при нарушениях правил и условий эксплуатации подвижного состава.

Некоторая часть выщербин образуется в результате выкрашивания металла из-за высоких контактных напряжений, у вагонов с большими осевыми нагрузками или из-за производственных дефектов, связанных с материалом колеса. Потому эту часть выщербин можно отнести как к деградационным, так и к производственным дефектам.

Количество отцепок и результаты расчетов по определению вероятности безотказной работы полувагонов модели 12-9853 приведены в табл. 1 и рис. 6. Первые отцепки на внеплановый ремонт по кодам неисправностей «тонкий гребень» и «выщербина обода колеса» начали появляться после пробега свыше 150 тыс. км.

Количество отцепок вагонов в текущий ремонт по неисправности колесных пар и вероятности безотказной работы вагонов-хопперов модели 19-9870-01 приведены в табл. 2 и рис. 7.

Вагоны-хопперы модели 19-9870-01 из-за тонкого гребня и выщербин обода

колеса начали отцепляться на внеплановый ремонт после пробега 50 тыс. км.

Для сравнения: по данным проектно-конструкторского бюро вагонного хозяйства ОАО «РЖД» (ПКБ ЦВ), обычные полувагоны модели 12-132 постройки 2013 г. по вышеуказанным неисправностям начали отцепляться на пробеге 35 тыс. км. По результатам эксплуатационных наблюдений за полувагонами построен график вероятности безотказной работы от пробега вагонов до отцепки по неисправностям колесных пар (рис. 8). Из графика видно, что колесные пары инновационных полувагонов могут пробегать до 600 тыс. км и при этом не отцепляться в текущий отцепочный ремонт по неисправностям «тонкий гребень» и «выщербина».

На графике (рис. 9) показаны пробег обычных и инновационных вагонов до отцепки в текущий отцепочный ремонт и количество отцепленных вагонов в процентах.

Средний пробег до появления неисправности у инновационных полувагонов в 3,5 раза больше.

В табл. 3 приведены полученные сводные данные о показателях надежности колесных пар обычных и инновационных вагонов в эксплуатации.

По данным ПКБ ЦВ, темп износа колес грузовых вагонов в среднем по парку грузовых вагонов составляет  $0,53 \cdot 10^{-4}$  мм/км.

Полученные данные в целом согласуются с данными ПКБ ЦВ, но из них видно, что вагоны-хопперы имеют увеличенное число отказов, особенно по причинам эксплуатационного характера.

Чтобы определить, как повлияет повышенная надежность колесных пар на потребности в новых колесах, была рассмотрена потребность в колесах на выполнение годового грузооборота  $\Sigma PI$  железнодорожного транспорта России.

Оценка потребности в колесах велась по суммарной толщине ободов колес. Для грузовых вагонов минимальная толщина обода — 22 мм. Уменьшение толщины обода до этой величины ведет к исключению колеса из эксплуатации. Толщина ободов колес учитывалась отдельно для инновационных вагонов с осевой нагрузкой 25 т/ось и обычных вагонов с осевой нагрузкой 23,5 т/ось. Расход колес на выполнение годового грузооборота составит

$$N = N_{\text{и}} + N_{\text{о}}, \quad (7)$$

где  $N_{\text{и}}$  — расход колес в год для вагонов с осевой нагрузкой 25 т/ось;

$N_{\text{о}}$  — расход колес в год для вагонов с осевой нагрузкой 23,5 т/ось.

Расход толщины обода колеса бывает при обточках, вызванных появлением:

- тонкого гребня толщиной менее 24 мм (код неисправности — 102): ~70% случаев отцепок;

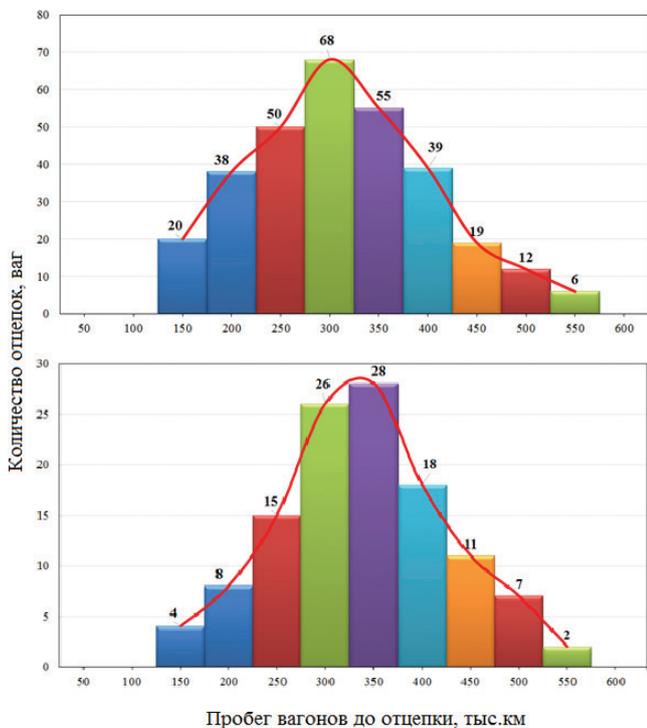


Рис. 6. Зависимость количества отцепленных в текущий ремонт полувагонов модели 12-9853 по неисправности — тонкий гребень (а) и выщербина обода колеса (б) — от пробега вагонов

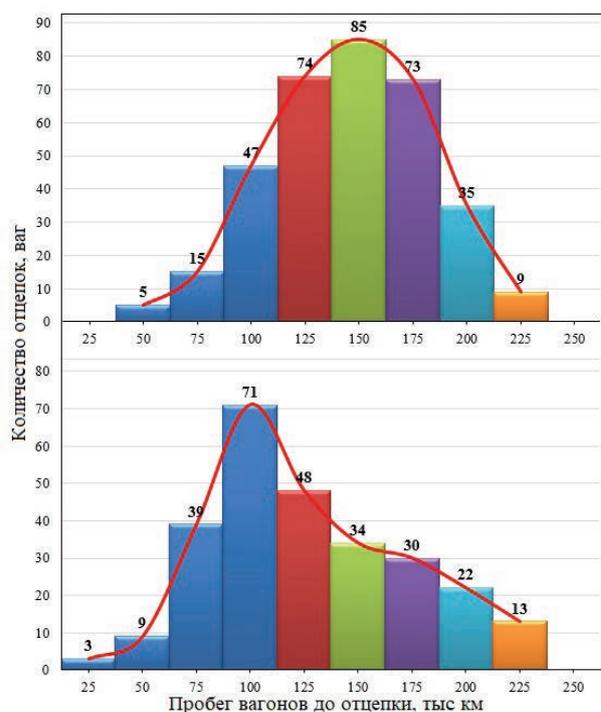


Рис. 7. Зависимость количества отцепленных в текущий ремонт вагонов-хопперов модели 19-9870-01 по неисправности — тонкий гребень (v) и выщербина обода колеса (r) — от пробега вагонов

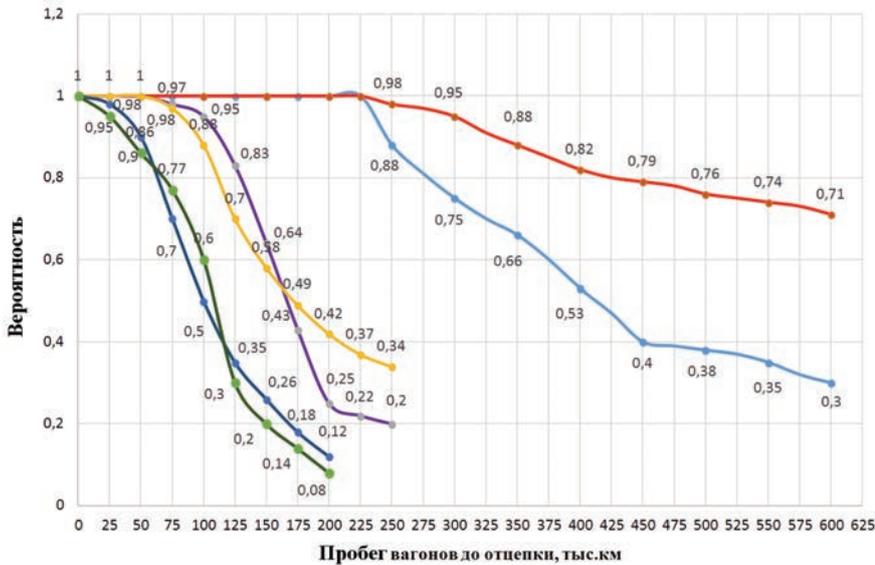


Рис. 8. График вероятности безотказной работы от пробега полувагонов моделей 12-9853, 12-132 и хопперов модели 19-9870-01 до отцепки: 1 – отцепка по тонкому гребню 12-132; 2 – отцепка по выщербине 12-132; 3 – отцепка по тонкому гребню 19-9870-01; 4 – отцепка по выщербине 19-9870-01; 5 – отцепка по тонкому гребню 12-9853; 6 – отцепка по выщербине 12-9853

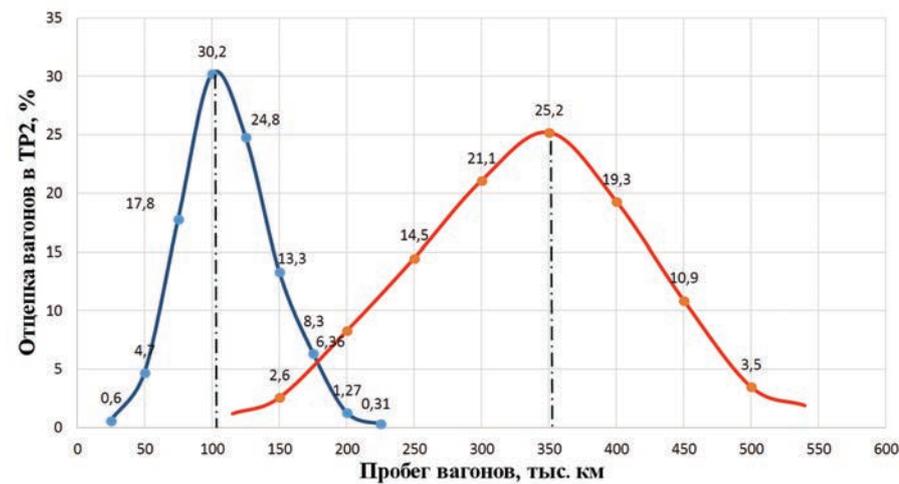


Рис. 9. Пробег полувагонов, построенных в 2013 г., до отцепки по тонкому гребню в межремонтный период (2013–2018 гг.): 1 – типовые вагоны, 2 – инновационные вагоны

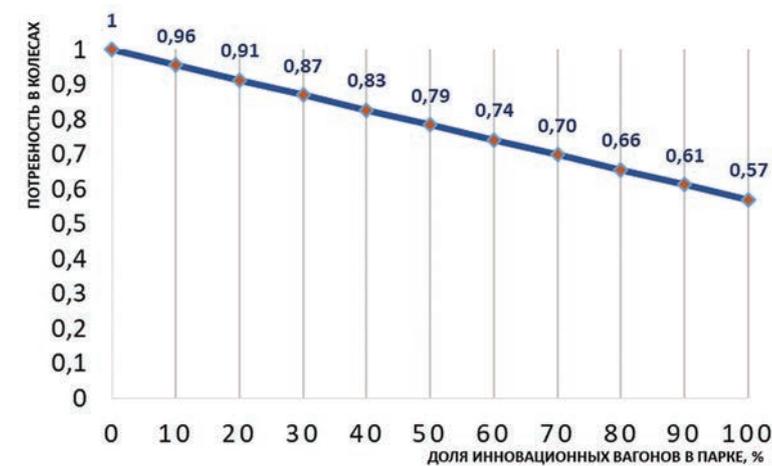


Рис. 10. График потребности в колесах в зависимости от доли инновационных вагонов (за единицу принята потребность в колесах для парка обычных вагонов)

• выщербин глубиной более 10 мм или длиной более 50 мм (код неисправности – 107): ~20% случаев отцепок.

На остальные неисправности приходится менее 10% случаев, и в дальнейших расчетах они не учитывались.

Для перехода от расхода толщины ободов за год эксплуатации к расходу колес использовались соотношения

$$N_{и} = \frac{R_{и}}{T_{пол}}; N_{о} = \frac{R_{о}}{T_{пол}}, \quad (8)$$

где  $R_{и}, R_{о}$  – соответственно расход (уменьшение) толщины ободов колес всех вагонов за год на выполнение годового грузооборота;

$T_{пол} = T_{изг} - T_{мин}$  – полезная толщина обода;

$T_{изг} = 75$  мм – средняя толщина обода при изготовлении;

$T_{мин} = 22$  мм – минимально допустимая толщина обода в эксплуатации.

Расход толщины обода  $R$  при обточках колесных пар через пробег представляется зависимостью

$$R_{и} = 8 \cdot L_{и} \cdot k_{и} \cdot k_{об}; R_{о} = 8 \cdot L_{о} \cdot k_{о} \cdot k_{об}, \quad (9)$$

где 8 – количество колес в вагоне;

$L_{и}, L_{о}$  – соответственно пробег инновационных и обычных вагонов в груженом и порожнем состоянии в километрах за год;

$k_{и}, k_{о}$  – соответственно темп износа колес инновационных и обычных вагонов;

$k_{об} = 1, 2, \dots, 3$  – коэффициент обточки.

Расчет ресурса обычных колес и значения коэффициентов обточки приведены в табл. 4.

Пробег вагонов в груженом состоянии определяется из грузооборота  $\Sigma Pl$ , статнагрузки обычных вагонов  $P_{о}$ , инновационных вагонов  $P_{и}$ , численности общего парка вагонов  $N$ , количества инновационных  $N_{и}$  и обычных  $N_{о}$  вагонов:

$$L_{и} = \frac{\Sigma Pl}{P_{и}} \frac{N_{и}}{N} \quad (10)$$

$$L_{о} = \frac{\Sigma Pl}{P_{о}} \frac{N_{о}}{N}$$

Вводя коэффициент увеличения статнагрузки  $k_y = \frac{P_{и}}{P_{о}}$  и подставив в выражение (1) зависимости (1–4), получаем формулу для расчета потребности в колесах на выполнение годового грузооборота:

$$N = \frac{8 \Sigma Pl k_{об}}{P_{о} T_{пол}} \left( k_{о} - (k_{о} \cdot k_y - k_{и}) \frac{N_{и}}{N} \right) \quad (11)$$

Анализируя это выражение, можно заключить, что потребность в колесах будет уменьшаться по мере увеличения численности парка инновационных вагонов по линейной зависимости. На темп уменьшения влияют темп износа колес и коэффициент увеличения статнагрузки инновационных вагонов. На рис. 10 показан график потребности в колесах

Табл. 4. Определение ресурса колеса обычных вагонов и коэффициента отбочки от варианта отбочки колес по тонкому гребню

Тип отбочки	Кол-во отбоков	Расчет ресурса колеса	Ресурс колеса, тыс. км	Пробег между отбочками, тыс. км		Отношение снятого металла при отбочке к износу гребня		Средний коэф. отбочки при номин. толщ. обода
				1 отбочка	последующие	1 отбочка	последующие	
33-24-30	3	1×3×3,3+4×5×19+4×1×25	490	120	110	1,53	2,30	1,97
33-25-30	4	1×3×3,3+5×5×19	485	95	95	1,44	2,30	2,00
<b>33-26-30</b>	6	1×3×3,3+4×7×19	<b>542</b>	86	76	1,29	2,25	1,96
33-27-30	7	1×3×3,3+8×3×19	466	57	57	1,17	2,33	2,04
33-24-33	3	4×3×3,3+4×5×19+4×1×25	520	<b>130</b>	130	1,83		1,83
33-25-33	3	4×3×3,3+4×5×19	440	105	105	1,61		1,61
33-26-33	4	5×3×3,3+5×4×19	430	86	86	1,33		1,33
33-27-33	4	5×3×3,3+5×3×19	335	67	67	1,17		1,17

Расчет произведен с учетом темпа износа гребня 33-32-31 — 1 мм на 3300 км; 30-25 — 1 мм на 19000 км; 25-24 — 1 мм на 25000 км

в зависимости от доли инновационных вагонов при темпе износа обычных колес  $k_o = 0,55 \text{ мм/км} \cdot 10^{-4}$ , темпе износа  $k_{и} = 0,34 \text{ мм/км} \cdot 10^{-4}$  для инновационных вагонов (принят средний темп износа колес вагонов на тележках 18-9855 и 18-194) и коэффициенте увеличения статнагрузки  $k_y = 1,06$  [13]. За единицу принята потребность в колесах для парка обычных вагонов. Из графика видно снижение потребности в колесах на 4,3% на каждые 10% увеличения доли инновационных вагонов в парке.

Полученные результаты показывают, что по мере увеличения количества инновационных вагонов в парке число отцепок в текущий ремонт должно начать снижаться, а потребность в колесах — уменьшаться.

Согласно результатам выполненного исследования, колесные пары инновационных вагонов (модели 12-9853 и 19-9870) по сравнению с колесными парами, установленными на вагонах с тележками модели 18-100, пробегает до отцепки по тонкому гребню и выщербинам в межремонтный период в 1,7–3 раза большее расстояние:

- у полувагонов модели 12-9853 износ гребня колеса доходит до предельной величины при среднем пробеге 359 тыс. км, а выщербина обода колеса появляется при среднем пробеге 397 тыс. км;
- у хопперов модели 19-9870-01 износ гребня колеса доходит до предельной величины при среднем пробеге 175 тыс. км, а выщербина обода колеса появляется при среднем пробеге 153 тыс. км.

На ресурс колес оказывает влияние не только материал колес и ходовых частей, но и устройство самого вагона и условия

его эксплуатации. Ресурс колес одного типа в одинаковых тележках оказался существенно ниже у вагонов-хопперов модели 19-9870-01.

При расчете потребности в колесах на перспективу следует учитывать, что по мере увеличения числа инновационных вагонов в парке ОАО «РЖД» эта потребность будет снижаться. ■

**Литература**

1. Соколов А. М., Орлова А. М., Романов А. В., Наркизова Е. А., Семенов Е. Ю. Эффективность эксплуатации вагонов с повышенной осевой нагрузкой // Транспорт РФ. 2018. № 1 (74). С. 62–65.
2. Бороненко Ю. П., Наркизова Е. А., Иванов Г. Ю. Обобщенный анализ работ по оценке эффективности эксплуатации и экономической эффективности грузовых инновационных вагонов с нагрузкой 27 т/ось // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : мат-лы XIV Междунар. науч.-техн. конф., С.-Петербург, 9–13 июля 2019 г. СПб. : ПГУПС, 2019. С. 9–16.
3. Орлова А. М., Лесничий В. С., Артамонов Е. И. Исследование влияния состояния тележек грузовых вагонов на боковой износ гребней колес по результатам математического моделирования и обследования вагонов в эксплуатации // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008. С. 69–75.
4. Орлова А. М. Анализ существующей ситуации взаимодействия колес и рельсов. Постановка задач исследования // Тез. докл. XI Междунар. науч.-техн. конф. «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (С.-Петер-

бург, 6–10 июля 2016 г.). СПб. : ПГУПС, 2016. С. 121–123.

5. Ромен Ю. С., Орлова А. М., Лесничий В. С. Состояние ходовых частей подвижного состава и износы в системе «колесо – рельс» // Вестник ВНИИЖТ. 2010. № 2. С. 42–45.
6. Калетин С. В. Изменение геометрических параметров колесных пар грузовых вагонов в части снижения критериев браковки по толщине гребня // Техника железных дорог. 2018. № 1 (41). С. 57–61.
7. Калетин С. В. Колесные пары. Реальность и прогнозы // Техника железных дорог. 2019. № 1 (45). С. 14–15.
8. Гончаров С. Е. Износ гребней колесных пар грузовых вагонов // Техника железных дорог. 2017. № 4 (40). С. 32–37.
9. Воробьев А. А., Керенцев Д. Е., Федоров И. В. Испытания колесных сталеи на износ и контактную усталость // Изв. ПГУПС. 2017. № 4. С. 628–636.
10. Воробьев А. А., Орлова А. М., Саидова Д. Е. Определение параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации полувагона // Изв. ПГУПС. 2015. № 2. С. 74–84.
11. Федорова В. И. Теоретический расчет ресурса поверхности катания колес на основе экспериментальных наблюдений за вагонами модели 12-9853 на тележках 18-9855 с осевой нагрузкой 25 тс // Изв. ПГУПС. 2017. № 4. С. 664–672.
12. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2016.
13. Отчет ФГБОУ ВО ПГУПС о научно-исследовательской работе «Разработка методики расчета баланса колесных пар подвижного состава». СПб. : ПГУПС, 2018.