

*Юрий Водяников  
Татьяна Шелейко  
Елена Макеева*

## **ОЦЕНКА РИСКА ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЯ О СООТВЕТСТВИИ ТОРМОЗНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАГОНА НОРМАТИВНЫМ ТРЕБОВАНИЯМ**

*Представлен вероятностный метод оценивания тормозной эффективности вагонов на соответствие нормативным требованиям, когда в качестве оценочной величины степени риска принимается вероятность выхода измеренных значений параметра за нормированную величину в пределах интервала рассеяния, а в качестве критерия используются квантили случайных величин с порядком  $p$ . Приведен пример оценивания результатов поездных тормозных испытаний грузового вагона.*

*Подано імовірнісний метод оцінювання гальмівної ефективності вагонів на відповідність нормативним вимогам, коли як оціночну величину ступеня ризику приймається імовірність виходу зміни вимірних значень параметра за нормовану величину в межах інтервалу розсіяння, а як критерій використовуються квантілі випадкових величин з порядком  $p$ . Наведено приклад оцінювання результатів поїзних гальмівних випробувань вантажного вагона.*

*Proposed probabilistic approach of freight cars braking efficiency conformance evaluation to the normative requirements, when estimated value of the risk level is expressed by a probability of parameter measured values overranging specified value in the interval of concentration, and random values with order  $p$  quantiles are used as criterion. An example of brake tests results estimation for freight cars was given.*

**Ключевые слова:** оценка риска, квантили распределения, тормозная эффективность, нормативные требования

**Постановка проблемы.** Для создания рациональной, долговечной и надежной конструкции вагона, наряду с расчетно-теоретическими исследованиями, предусматриваются также и экспериментальные исследования, которые, как правило, являются завершающим этапом в создании нового типа вагона. Экспериментальные исследования (испытания) проводятся также и при модернизации существующих в эксплуатации вагонов, а также для дальнейшего развития и совершенствования теории их проектирования, изучения особенностей поведения в эксплуатации тех или иных узлов и деталей вагонов при высоких скоростях движения и осевых нагрузках.

© Водяников Ю. Я., Шелейко Т. В., Макеева Е. Г., 2013

---

Все большее распространение получают статистические методы, основанные на понятии неопределенности измерений [1, 2]. Метод неопределенности измерений базируется на эффективной системе менеджмента измерений, который устанавливает, какие средства измерений и измерительные процессы подходят в том или ином случае, для достижения целей по качеству продукции и управлению рисками получения неправильных результатов измерений. Неопределенность измерений (или просто неопределенность) – параметр, который характеризует рассеяние измеряемых значений при принятой доверительной вероятности.

Целью системы менеджмента измерений является управление рисками, связанными с неправильными результатами измерений и измерительными процессами, которые могут нанести ущерб качеству производимой организацией продукцией.

Тормозная система вагона относится к одной из важнейших составных частей вагона, основной задачей при проектировании является выбор таких ее параметров, которые удовлетворяют действующим требованиям к безопасности, тормозной эффективности и требованиям международных стандартов.

В этой связи, особую актуальность приобретают вопросы оценки и анализа результатов экспериментальных исследований тормозной системы вагона и принятия решения о соответствии (несоответствии) ее нормативным требованиям с учетом неопределенности измерений (интервала рассеяния измеряемого параметра). Принятие решения сопровождается определенной степенью риска, обусловленного случайным характером измеряемой величины, и важное значение при этом имеют вопросы оценки степени риска принимаемых решений.

**Цель статьи.** Предложить метод оценивания тормозной эффективности вагонов на соответствие нормативным требованиям, где в качестве оценочной величины степени риска при принятии решения принять вероятность выхода измеренных значений параметра за нормированные пределы.

**Изложение основного материала.** Критерием оценки тормозной эффективности вагонов является расчетный коэффициент силы нажатия тормозных колодок (далее – тормозной коэффициент), величина которого должна составлять для пассажирских вагонов при скорости 160 км/ч с композиционными колодками при электропневматическом торможении не менее 0,28, при пневматическом – не менее 0,3, для грузовых вагонов – 0,14 и 0,22 соответственно в груженом и порожнем состояниях [3]. Кроме того, для допустимых максимальных скоростей движения поездов установлено единое наименьшее тормозное нажатие в пересчете на чугунные колодки на каждые 100 тс веса поезда [4].

Длина тормозного пути пассажирских и грузовых поездов на нормированных спусках (6 ‰ и 10 ‰) регламентируется инструкцией [5].

Величина тормозного коэффициента имеет ограничения как «снизу», так и «сверху». Ограничение «снизу» обусловлено минимально допустимым значением, исходя из требуемой тормозной эффективности, а «сверху» – недопущением юза (заклинивания колесной пары) при торможении.

Первое ограничение записывается в виде нестрогого неравенства:

$$\delta \geq |\delta|, \quad (1)$$

где  $|\delta|$  – нормативное минимальное значение тормозного коэффициента.

Верхняя граница тормозного коэффициента определяется по допустимому коэффициенту сцепления колеса с рельсом  $|\psi_k|$  по формуле [3, 6, 7]:

$$|\psi_{\kappa}| = \psi(q_0) \cdot \psi(V), \quad (2)$$

где  $\psi(q_0)$  – коэффициент, зависящий от осевой нагрузки на колесную пару:

$$\psi(q_0) = 0,17 - 0,0015 \cdot (q_0 - 5), \quad (3)$$

$\psi(V)$  – коэффициент, зависящий от скорости движения, равный [6, 7]:

– для вагонов на тележках грузового типа –

$$\psi(V) = \frac{V + 81}{2,4 \cdot V + 81}; \quad (4)$$

– для вагонов на тележках пассажирского типа –

$$\psi(V) = \frac{V + 576}{4 \cdot V + 576}, \quad (5)$$

где  $q_0$  – нагрузка на колесную пару (осевая нагрузка) вагона, тс;

$V$  – скорость, км/ч.

Условием недопущения юза является [1, 6, 7]:

$$\delta \cdot \varphi_{mp} \leq |\psi_{\kappa}| \quad (6)$$

или с учетом рекомендуемого запаса по юзу [1] –

$$\delta \leq 0,85 \cdot \frac{|\psi_{\kappa}|}{\varphi_{mp}}, \quad (7)$$

где  $\varphi_{mp}$  – коэффициент трения фрикционной пары тормозной системы. Для дискового тормоза является величиной постоянной и не зависит от скорости движения при торможении; для колодочного тормоза [6, 7]:

– с композиционными колодками –

$$\varphi_{mp} = 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150}; \quad (8)$$

– с чугунными стандартными колодками –

$$\varphi_{mp} = 0,27 \cdot \frac{V + 100}{5 \cdot V + 100}. \quad (9)$$

Применение вероятностных методов обуславливает получение интервала изменения исследуемого параметра (рис. 1) при принятой доверительной вероятности (0,95 и более). В качестве оценочной величины степени риска при принятии решения предлагается принимать вероятность выхода измеренных значений параметра за нормированную границу в пределах интервала рассеяния, а в качестве критерия использовать квантили случайных величин с порядком  $p$ . (Квантиль порядка  $p$  одномерного распределения вероятности – такое значение  $x_p$  случайной величины  $x$ , для которого вероятность попадания в интервал  $x < x_p$  не превышает  $p$ , т.е.  $P(x < x_p) \leq p$ ) [8]. Таким образом, при принятии решения о соответствии тормозной системы нормативным требованиям оценочными критериями степени риска принимаются квантили распределения для фиксированного порядка  $|p|$  (уровень значимости). Степень риска принимается равной  $|p| = 0,05$  (5 %).

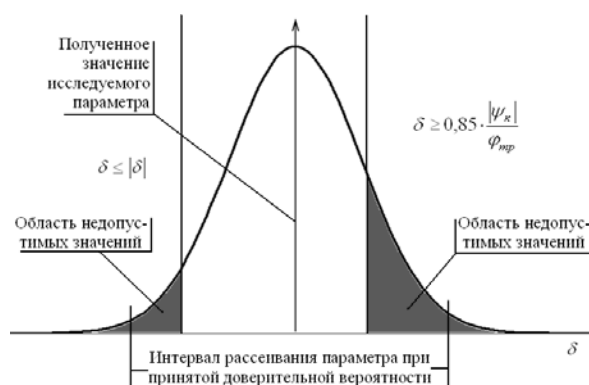


Рис. 1. Рассеяние измеряемого параметра

При принятии положительного решения о соответствии исследуемого параметра нормативному значению должны выполняться условия:

– для ограничений снизу –

$$П_{|p|} \geq |П|, \quad (10)$$

где  $|П|$  – минимальное допустимое нормативное значение параметра;

$П_{|p|}$  – квантиль распределения порядка  $|p|$ ;

– для ограничений сверху –

$$П_{1-|p|} \leq |П|, \quad (11)$$

где  $П_{1-|p|}$  – квантиль распределения порядка  $1 - |p|$ .

При определении квантиля распределения полагается, что измеренный массив значений параметра подчиняется нормальному закону распределения, для которого [8, 9]:

$$\text{функция распределения} - F(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2 \cdot \sigma^2}\right); \quad (12)$$

$$\text{плотность вероятности} - p(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), \quad (13)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение;

$\bar{x}$  – среднее значение случайной величины.

В формулах (12) и (13) в качестве среднего значения принимается измеренное значение исследуемого параметра, а в качестве среднего квадратичного отклонения – одна треть половины интервала изменений (неопределенности измерений).

Базовый алгоритм расчета неопределенности измерений состоит из таких операций [2]:

составление модельного уравнения;

оценивание входных величин, внесения исправлений на известные систематические эффекты;

оценивание результатов измерений;

определение стандартной неопределенности входных величин как стандартных среднее квадратичных отклонений;

определение коэффициентов чувствительности;

вычисление вклада неопределенности каждой входной величины в неопределенность величины, которую измеряют;  
определение попарной корреляции входных величин (при необходимости);  
вычисление суммарной стандартной неопределенности измеряемой величины;  
вычисление коэффициента покрытия;  
вычисления расширенной неопределенности величины – интервала результата измерения, в пределах которого, как можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые достаточно обоснованно могли бы быть приписаны измеряемой величине.

Суммарная стандартная неопределенность тормозного коэффициента определяется по формуле [10]:

$$u_{\delta}(V_0) = \sqrt{\left(d(V_0) \cdot c(V_0) \cdot S(V_0)^{d-1} \cdot u_s\right)^2 + u_{\Delta_{cd}}^2}, \quad (14)$$

где  $c$  и  $d$  – соответственно масштабный множитель и показатель степени функции выравнивания экспериментальных данных (значений тормозных путей) методом наименьших квадратов, которая имеет вид:

$$\delta(V_0) = c(V_0) \cdot S(V_0)^{d(V_0)}, \quad (15)$$

$V_0$  – скорость в начале торможения, км/ч;

$u_s$  – суммарная стандартная неопределенность измерения тормозного пути;

$u_{\Delta_{cd}}$  – стандартная неопределенность тормозного коэффициента, обусловленная определением коэффициентов  $c$  и  $d$ .

Расширенная неопределенность определяется по формуле [1, 2, 10]:

$$U_{\delta} = k \cdot u_{\delta}, \quad (16)$$

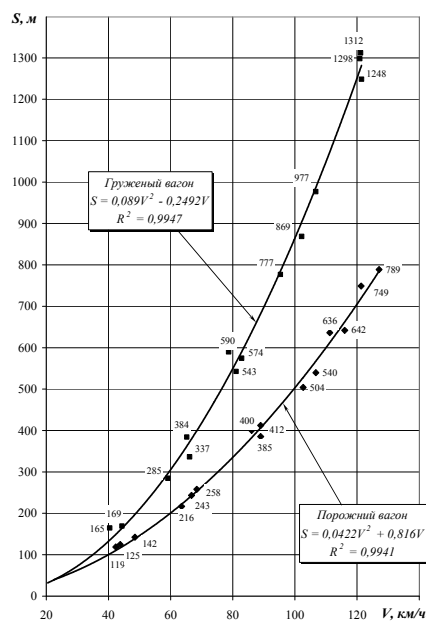
где  $k$  – коэффициент охвата, определяемый как коэффициент из распределения Стьюдента для доверительной вероятности 0,95 и эффективного числа степеней свободы  $\nu_{eff}$ , определяемого по формуле Велча-Сатерсвейта:  $\nu_{eff} = \infty$ ,  $k(\infty) = 1,96$ .

Для иллюстрации предложенной методики рассматриваются результаты ходовых тормозных испытаний грузового вагона в груженом и порожнем состояниях (рис. 2).

Рассчитанные значения неопределенности измерений представлены в табл. 1 и 2, а предельное значение тормозного коэффициента по недопущению юза – в табл. 3.

**Таблица 1. Неопределенность измерений тормозного коэффициента вагона в груженом состоянии**

$V_0$ , км/ч	Тормозной коэффициент				
	$\delta$ при $P = 0,95$	$\delta_{\min}$	$\bar{\delta}$	$\delta_{\max}$	$\sigma$
40	0,1616±0,0262	0,1354	0,1616	0,1879	0,00874
50	0,1554±0,0151	0,1403	0,1554	0,1705	0,00503
60	0,1523±0,0098	0,1425	0,1523	0,1622	0,00328
70	0,1510±0,0069	0,1441	0,1510	0,1580	0,00231
80	0,1508±0,0051	0,1457	0,1508	0,1560	0,00171
90	0,1509±0,0040	0,1469	0,1509	0,1549	0,00133
100	0,1511±0,0032	0,1479	0,1511	0,1543	0,00106
110	0,1515±0,0026	0,1489	0,1515	0,1541	0,00087
120	0,1520±0,0022	0,1499	0,1520	0,1542	0,00072



**Рис. 2. Фактические значения тормозных путей грузового вагона, измеренные в процессе ходовых тормозных испытаний**

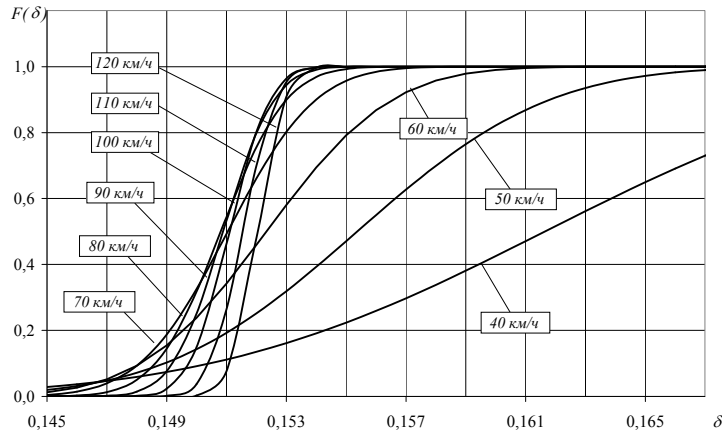
**Таблица 2. Неопределенность измерений тормозного коэффициента для вагона в порожнем состоянии**

$V_0$ , км/ч	Тормозной коэффициент				
	$\delta$ при $P = 0,95$	$\delta_{\min}$	$\bar{\delta}$	$\delta_{\max}$	$\sigma$
40	0,3681±0,0579	0,3102	0,3681	0,4260	0,01930
50	0,3643±0,0367	0,3276	0,3643	0,4010	0,01222
60	0,3643±0,0256	0,3387	0,3643	0,3899	0,00853
70	0,3654±0,0189	0,3465	0,3654	0,3843	0,00631
80	0,3673±0,0146	0,3527	0,3673	0,3819	0,00487
90	0,3698±0,0117	0,3581	0,3698	0,3814	0,00389
100	0,3724±0,0096	0,3628	0,3724	0,3820	0,00319
110	0,3752±0,0080	0,3672	0,3752	0,3832	0,00267
120	0,3781±0,0068	0,3713	0,3781	0,3850	0,00227

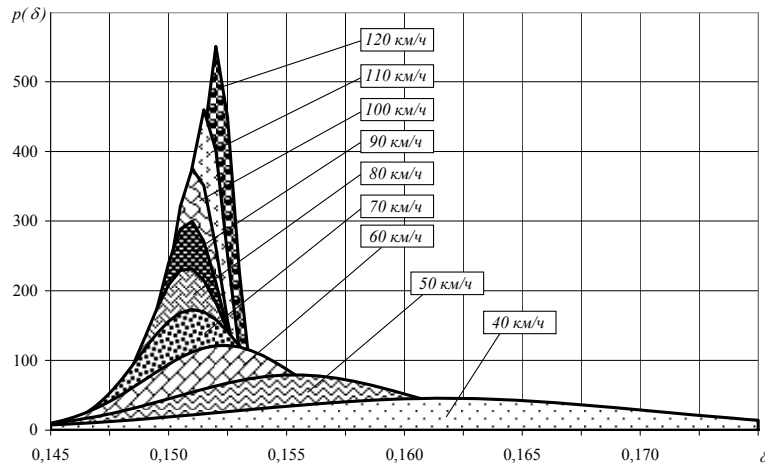
**Таблица 3. Предельное значение тормозного коэффициента при отсутствии юза**

$V_0$ , км/ч	$\varphi_{mp}$	$\psi(q_0)$	$\psi(V)$	$ \delta  = 0,85 \cdot \frac{\psi_{\kappa}}{\varphi_{mp}}$
40	0,2974	0,1685	0,83696	0,403
50	0,2880	0,1685	0,80670	0,401
60	0,2800	0,1685	0,77941	0,399
70	0,2731	0,1685	0,75467	0,396
80	0,2671	0,1685	0,73214	0,393
90	0,2618	0,1685	0,71154	0,389
100	0,2571	0,1685	0,69262	0,386
110	0,2530	0,1685	0,67520	0,382
120	0,2492	0,1685	0,65909	0,379

Функции и плотности распределения тормозных коэффициентов представлены на рис. 3-6.

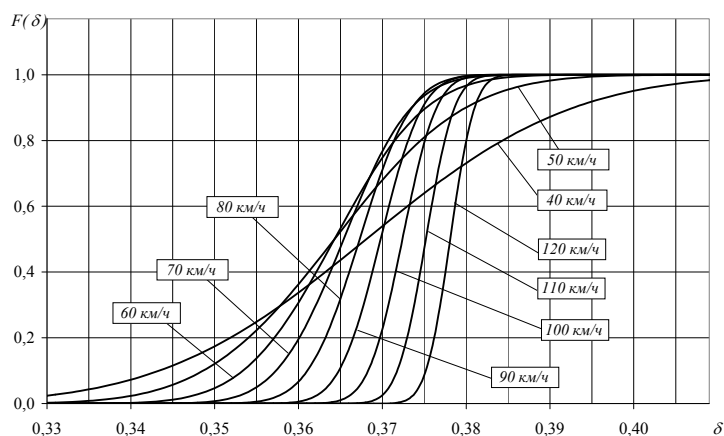


**Рис. 3. Функция распределения тормозного коэффициента грузового вагона в груженом состоянии**

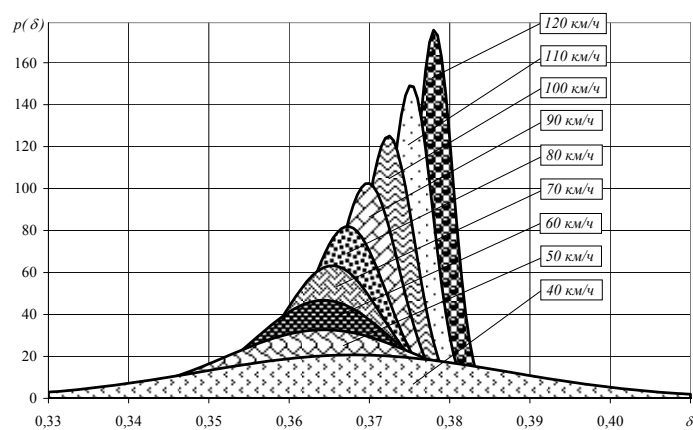


**Рис. 4. Плотность распределения тормозного коэффициента грузового вагона в груженом состоянии**

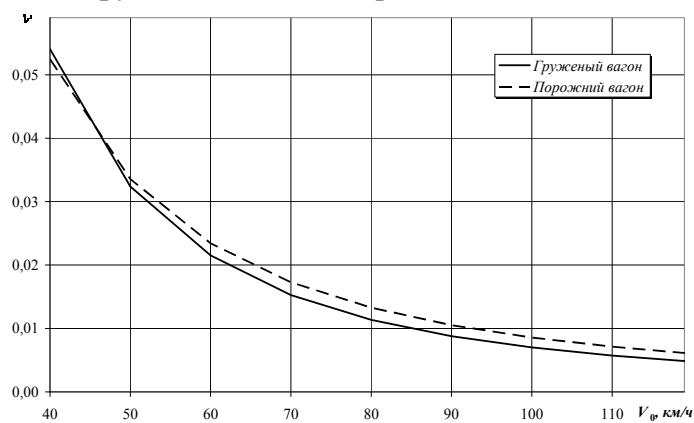
Анализ плотности распределения свидетельствует, что коэффициент вариации значений тормозного коэффициента уменьшается с ростом скорости (рис. 7).



**Рис. 5. Функция распределения тормозного коэффициента грузового вагона в порожнем состоянии**



**Рис. 6. Плотность распределения тормозного коэффициента грузового вагона в порожнем состоянии**

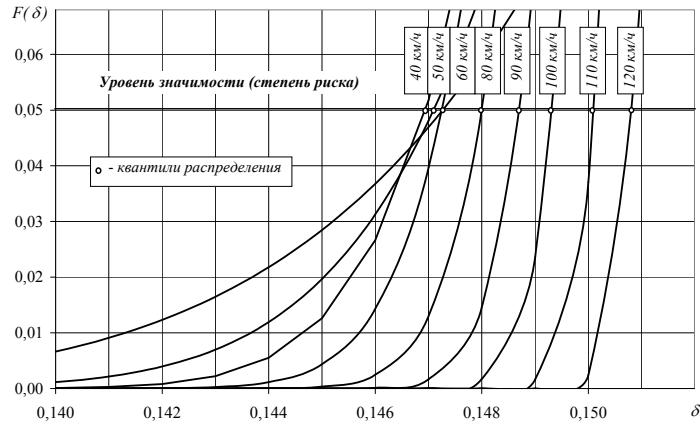


**Рис. 7. Коэффициент вариации тормозного коэффициента**

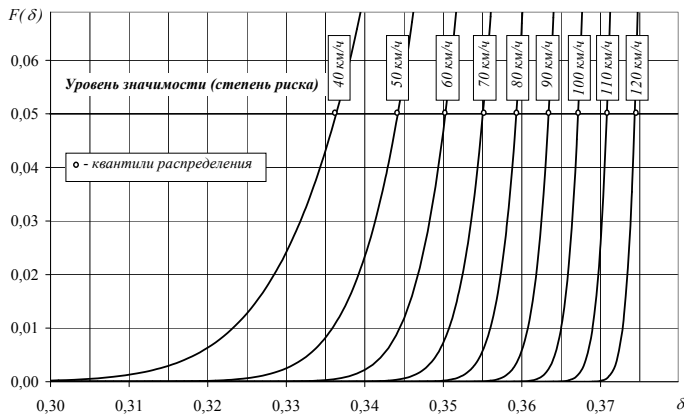
Квантили распределения довольно легко определяются с применением программного пакета «Excel» и использованием функции НОРМОБР, которая возвра-



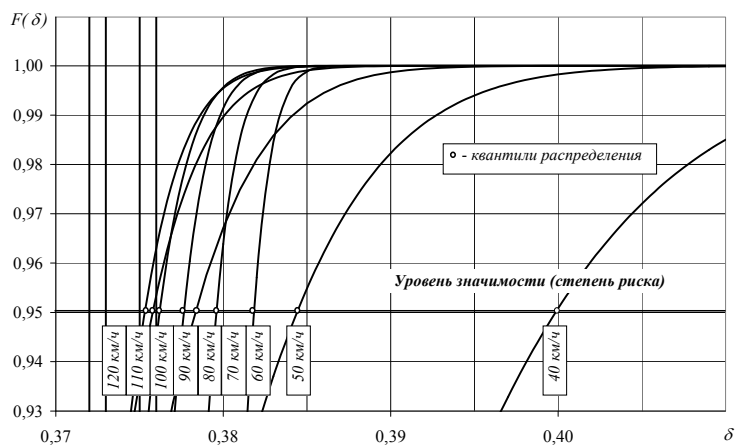
щает квантиль нормального распределения для указанной доверительной вероятности (рис. 8-10).



**Рис. 8. Квантили распределения тормозного коэффициента грузового вагона в груженом состоянии (проверка эффективности)**



**Рис. 9. Квантили распределения тормозного коэффициента грузового вагона в порожнем состоянии (проверка эффективности)**



**Рис. 10. Квантили распределения тормозного коэффициента грузового вагона в порожнем состоянии (проверка на возможность юза)**

Результаты исследования, приведенные в таблицах 4 и 5, показывают, что тормозная эффективность (тормозной коэффициент) соответствует нормативным требованиям, однако для скорости 120 км/ч условие на отсутствие юза не выполняется (табл. 6).

**Таблица 4. Результаты исследования тормозной эффективности грузового вагона в груженом состоянии**

$V_0$ , км/ч	$ \delta $	Квантиль $\delta$	Проверка соответствия	Решение
40	0,14	0,1473	0,1473>0,14	Соответствует
50	0,14	0,1471	0,1471>0,14	Соответствует
60	0,14	0,1469	0,1469>0,14	Соответствует
70	0,14	0,1473	0,1473>0,14	Соответствует
80	0,14	0,1480	0,1480>0,14	Соответствует
90	0,14	0,1487	0,1487>0,14	Соответствует
100	0,14	0,1494	0,1494>0,14	Соответствует
110	0,14	0,1501	0,1501>0,14	Соответствует
120	0,14	0,1508	0,1508>0,14	Соответствует

**Таблица 5. Результаты исследования тормозной эффективности грузового вагона в порожнем состоянии**

$V_0$ , км/ч	$ \delta $	Квантиль $\delta$	Проверка соответствия	Решение
40	0,22	0,336386708	0,3364>0,22	Соответствует
50	0,22	0,344206819	0,3442>0,22	Соответствует
60	0,22	0,350310429	0,3503>0,22	Соответствует
70	0,22	0,355026566	0,3550>0,22	Соответствует
80	0,22	0,359263363	0,3593>0,22	Соответствует
90	0,22	0,363374985	0,3634>0,22	Соответствует
100	0,22	0,36716825	0,3672>0,22	Соответствует
110	0,22	0,370836337	0,3708>0,22	Соответствует
120	0,22	0,374400527	0,3744>0,22	Соответствует

**Таблица 6. Результаты проверки на безюзное торможение порожнего вагона**

$V_0$ , км/ч	$ \delta $	Квантиль $\delta$	Проверка соответствия	Решение
40	0,403	0,399885467	0,3999<0,403	Соответствует
50	0,401	0,384402088	0,3844<0,401	Соответствует
60	0,399	0,378381154	0,3784<0,399	Соответствует
70	0,396	0,375787377	0,3758<0,396	Соответствует
80	0,393	0,375278746	0,3753<0,393	Соответствует
90	0,389	0,376171662	0,3762<0,389	Соответствует
100	0,386	0,377662478	0,3777<0,386	Соответствует
110	0,382	0,379617383	0,3796<0,382	Соответствует
120	0,379	0,381876846	0,3819>0,379	Не соответствует

---

**Выводы.** Использование вероятностных методов для принятия решения о соответствии тормозной системы вагонов нормативным требованиям позволяет получить уточненную оценку ее характеристик, а также оценить степень риска при принятии решения.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First Edition. – ISO, Switzerland, 1993. – 101 p.
- 2 ДСТУ-Н РМГ 43-2006 Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43:2001, ИДТ). – [Чинний від 2007-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 27 с. – (Національний стандарт України)
- 3 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 260 с.
- 4 ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015 Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України. – К.: Транспорт України, 2002. – 145 с.
- 5 ЦШ-0001 Інструкція з сигналізації на залізницях України. – К.: ТОВ «Інпрес», 2008. – 160 с.
- 6 Р 549/2 Методика расчета тормозов пассажирских вагонов колеи 1520 мм. – Варна, Республика Болгария: Организация сотрудничества железных дорог, 2005. – 13 с.
- 7 Р 549/3 Методика расчета тормозов грузовых вагонов колеи 1520 мм. – Варна, Республика Болгария: Организация сотрудничества железных дорог, 2005. – 12 с.
- 8 Орлов А. И. Математика случая: Вероятность и статистика – основные факты: Учебное пособие / А. И. Орлов. – М.: МЗ-Пресс, 2004. – 110 с.
- 9 Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие / Е. Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1998. – 224 с.
- 10 Шелейко Т. В. Застосування основних положень невизначеності вимірювань для оцінки гальмівної ефективності рухомого складу /Т. В. Шелейко, Ю. Я. Водянніков, С. М. Свистун // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕГУТ, 2012. – Вип. 21. – С. 81-92.