

## НАҚЛИЁТ - ТРАНСПОРТ - TRANSPORT

УДК: 629.113

DOI: 10.65599/GCOK1719

НАДЁЖНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ  
АВТОМОБИЛЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ НА УКЛОНАХ

Р.А. Давлатшоев

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В статье рассмотрены вопросы оценки запаса устойчивости и надёжности тормозных систем автомобилей, эксплуатируемых в горных условиях. На примере автомобиля Mercedes-Benz W211 произведены расчёты коэффициента устойчивости к перегреву, рассмотрены вероятностные характеристики надёжности, а также обоснованы конструктивные и эксплуатационные меры, направленные на повышение устойчивости и надёжности тормозной системы в условиях перегрузок и термического воздействия.

**Ключевые слова:** тормозная система, термонагруженность, коэффициент устойчивости, надёжность, фейдинг, Mercedes-Benz W211, горные условия, тепловой анализ.

ЭЪТИМОДНОКӢ ВА ҚОБИЛЯТИ КОРИИ СИСТЕМАИ БОЗДОРӢИ АВТОМОБИЛ ҲАНГОМИ  
ҲАРАКАТ ДАР РОҲҲОИ НИШЕБ

Р.А. Давлатшоев

Дар мақола масъалаҳои баҳодиҳии захираи устуворӣ ва эътимоднокии системаи боздории автомобилҳое, ки дар шароити қўҳӣ истифода мешаванд, баррасӣ шудаанд. Дар асоси мисоли автомобили Mercedes-Benz W211 ҳисобҳои коэффисиенти устуворӣ нисбат ба ҳароратгузаронӣ анҷом дода шуда, нишондиҳандаҳои эҳтимолии эътимодноқӣ таҳлил гардида, инчунин чораҳои конструктивӣ ва истифодабарӣ барои баланд бардоштани устуворӣ ва эътимоднокии системаи боздорӣ дар шароити бори изофӣ ва таъсири ҳароратӣ асоснок карда шудаанд.

**Калидвожаҳо:** системаи боздорӣ, ҳароратгузаронӣ, коэффисиенти устуворӣ, эътимодноқӣ, фейдинг, Mercedes-Benz W211, шароити қўҳсор, таҳлили ҳароратӣ.

RELIABILITY AND OPERABILITY OF THE VEHICLE'S BRAKING SYSTEM WHEN DRIVING ON  
INCLINES

R.A. Davlatshoev

The article addresses the issues of evaluating the stability margin and reliability of automotive braking systems operating in mountainous conditions. Using the Mercedes-Benz W211 as an example, calculations of the thermal stability coefficient were performed, probabilistic reliability characteristics were analyzed, and design and operational measures aimed at improving the system's resistance to overloads and thermal effects were substantiated.

**Keywords:** brake system, thermal loading, stability coefficient, reliability, fading, Mercedes-Benz W211, mountainous conditions, thermal analysis.

## Введение

Обеспечение безопасности дорожного движения в условиях сложного рельефа, особенно на горных участках, остаётся одной из приоритетных задач при проектировании, выборе и эксплуатации автотранспортных средств (АТС). Эксплуатация в горной местности сопровождается резкими перепадами высот, затяжными спусками, многократными торможениями, а также неблагоприятными климатическими условиями, что в совокупности обуславливает повышенные требования к эффективности, надёжности и устойчивости тормозных систем.

Одним из наиболее значимых факторов, ограничивающих работоспособность тормозных механизмов при движении на затяжных спусках, является их термическая нагруженность. Повышенная тепловая энергия, выделяемая при длительном торможении, приводит к перегреву рабочих поверхностей, снижению коэффициента трения, изменению усилий в контуре торможения и увеличению риска отказов. Кроме того, наблюдается ускоренный износ фрикционных элементов, тепловая деформация деталей и ухудшение управляемости автомобиля, особенно при наличии перегруза или в условиях высокой внешней температуры.

Для обеспечения безопасной и надёжной эксплуатации транспортных средств на горных дорогах необходимо обеспечить как термическую устойчивость тормозного процесса — способность системы сохранять работоспособность при термической и эксплуатационной нагрузке, так и надёжность — способность функционировать безотказно в течение заданного ресурса.

В связи с этим актуальной задачей является разработка и применение методов количественной оценки запаса устойчивости и надёжности тормозных систем. В данной статье произведена оценка соответствующих параметров на примере легкового автомобиля Mercedes-Benz W211, находящегося в эксплуатации в условиях горной местности.

Рассматриваются расчётные зависимости, отражающие влияние температуры, режимов нагрузки и характеристик тормозных усилий на устойчивость тормозной системы. Кроме того, выполнена оценка вероятностных характеристик надёжности и предложены конструктивные и эксплуатационные мероприятия,

направленные на повышение тепловой стойкости и общей работоспособности тормозных механизмов при высоких температурах и перегрузках.

### Исследовательская часть

#### 1. Оценка устойчивости тормозной системы

Одним из критически значимых факторов, определяющих эффективность и надёжность торможения в горных условиях, является способность тормозной системы противостоять термическому перегрузу. В условиях затяжных спусков тормозные механизмы автомобиля подвергаются значительным тепловым воздействиям, в результате чего возникает риск фейдинга — снижения коэффициента трения вследствие перегрева. Для оценки термоустойчивости используется коэффициент устойчивости, позволяющий определить, насколько фактические температуры в тормозной системе удалены от предельно допустимых значений [1, 3-4].

Оценка запаса устойчивости тормозной системы к внешним эксплуатационным воздействиям (перегрев, износ, перегрузка) осуществляется на основе количественного показателя — коэффициента устойчивости, который позволяет определить степень приближенности фактических эксплуатационных параметров к их предельным значениям.

Коэффициент устойчивости Куст определяется как отношение максимально допустимого значения рабочего параметра, установленного нормативными документами или производителем, к фактическому значению данного параметра в условиях эксплуатации:

$$K_{уст} = \frac{X_{пред}}{X_{факт}}, \quad (1)$$

где:  $X_{пред}$  — предельное значение рабочего параметра, установленное производителем или нормативным документом (температура, давление, износ);  $X_{факт}$  — фактическое значение параметра в реальных условиях

Таблица 1 — Исходные параметры для расчёта

| Параметр                           | Обозначение    | Значение               |
|------------------------------------|----------------|------------------------|
| Материал диска                     | СЧ20 или G3000 | Чугун                  |
| Плотность материала                | $\rho$         | 7200 кг/м <sup>3</sup> |
| Удельная теплоёмкость              | $c_m$          | 0.447 кДж/кг·°C        |
| Масса одного переднего диска       | $m_t$          | 5.6 кг                 |
| Теплота, выделяемая при торможении | $Q_t$          | 145 кДж                |
| Начальная температура              | $T_{нач.}$     | 320 °C                 |
| Предельно допустимая температура   | $T_{пред.}$    | 500 °C                 |

#### 1.1. Определение температурного приращения диска

Поскольку тормозной диск аккумулирует значительную часть тепловой энергии, выделяющейся в процессе трения, для оценки температурного воздействия используется базовое уравнение теплового баланса:

$$\Delta T = \frac{Q_t}{c_m \cdot m_t} \quad (2)$$

Подставляя численные значения:

$$\Delta T = \frac{145000}{447000 \cdot 5.6} = \frac{145000}{2503200} = 0.0579 \cdot 10^3 = 57.9^\circ C$$

Таким образом, в результате одного торможения температура тормозного диска увеличивается приблизительно на 58 °C.

#### 1.2. Определение фактической температуры рабочей поверхности

Полагая, что начальная температура диска до начала торможения составляет  $T_{нач}=320^\circ C$ , можно определить итоговую температуру после одного тормозного цикла:

$$T_{факт.} = T_{нач.} + \Delta T = 320^\circ C + 58^\circ C = 378^\circ C$$

#### 1.3. Оценка коэффициента тепловой устойчивости

Коэффициент устойчивости по температурному критерию рассчитывается следующим образом:

$$K_{уст} = \frac{T_{пред}}{T_{факт}} = \frac{500^\circ C}{378^\circ C} = 1.32$$

#### 1.4. Интерпретация полученного результата:

Полученное значение  $K_{уст} \approx 1.32$  свидетельствует о наличии запаса термоустойчивости, что указывает на способность тормозной системы выдерживать текущие режимы нагрева без потери функциональности. Однако при увеличении длительности торможения, частоте тормозных циклов или росте внешней температуры окружающей среды возможно снижение данного коэффициента ниже критического уровня  $K_{уст}=1$ , за которым возникает термическая нестабильность (фейдинг). Таким образом, уже при  $T_{факт} > 500^\circ\text{C}$  тормозная система будет функционировать в режиме перегрузки с риском снижения тормозных свойств.

#### 2. Оценка надёжности тормозной системы автомобиля Mercedes-Benz W211

Надёжность тормозной системы — это её способность сохранять работоспособность при различных режимах эксплуатации и выполнять заданные функции (замедление, остановка транспортного средства) без отказов на протяжении определённого времени или пробега. В условиях горной эксплуатации, где тормозная система подвергается интенсивным нагрузкам, оценка надёжности становится критически важной для обеспечения безопасности движения [2].

##### 2.1. Вероятностные показатели надёжности

В рамках анализа были использованы методы теории надёжности, основанные на статистической обработке наблюдаемых отказов тормозной системы в автопарке, состоящем из 10 автомобилей марки Mercedes-Benz W211, эксплуатируемых в течение одного сезона.

Исходные данные:

- Общее количество автомобилей:  $N=10$
- Время наблюдения:  $T=200$  часов
- Число зафиксированных отказов:  $n=3$

##### 2.2. Интенсивность отказов $\lambda$

Интенсивность отказов показывает среднее количество отказов тормозной системы на единицу времени эксплуатации одного объекта. Она рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{n}{T \cdot N} \quad (3)$$

$n$  — число зафиксированных отказов,  $T$  — время наблюдения,  $N$  — количество исследуемых объектов.

Подставляя значения:

$$\lambda = \frac{3}{200 \cdot 10} = \frac{3}{2000} = 0.0015 \frac{1}{ч}$$

Это значение отражает устойчиво низкий уровень отказов при условии своевременного обслуживания и корректной эксплуатации.

##### 2.3. Среднее время безотказной работы (MTTF, $T_{ср}$ )

Показатель  $T_{ср}$  (Mean Time To Failure) определяет среднее время, в течение которого система функционирует безотказно. Он определяется как величина, обратная интенсивности отказов:

$$T_{ср} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.0015} = 666,7 \text{ ч.}$$

Таким образом, тормозная система Mercedes-Benz W211 в исследуемых условиях работает без отказов в среднем около **667 часов**, что является удовлетворительным показателем с учётом эксплуатационной нагрузки на горных маршрутах.

Результаты расчётов коэффициента устойчивости  $K_{уст}$  в зависимости от температуры при различных массах тормозного диска представлены в таблице 2 [5].

Таблица 2- Изменение коэффициента устойчивости  $K_{уст}$  в зависимости от температуры при различных значениях массы тормозного диска

| $T_{факт}, ^\circ\text{C}$ | $K_{уст}$ , масса диска 4.5 кг | $K_{уст}$ , масса диска 5.6 кг | $K_{уст}$ , масса диска 7.0 кг |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 300                        | 1,33                           | 1,42                           | 1,47                           |
| 350                        | 1,22                           | 1,29                           | 1,33                           |
| 400                        | 1,12                           | 1,17                           | 1,21                           |
| 450                        | 1,03                           | 1,07                           | 1,10                           |
| 500                        | 0,95                           | 0,98                           | 1                              |
| 550                        | 0,88                           | 0,91                           | 0,93                           |
| 600                        | 0,82                           | 0,85                           | 0,86                           |

В рамках исследования построен график (рис.1), иллюстрирующий поведение тормозной системы при различных режимах эксплуатации.

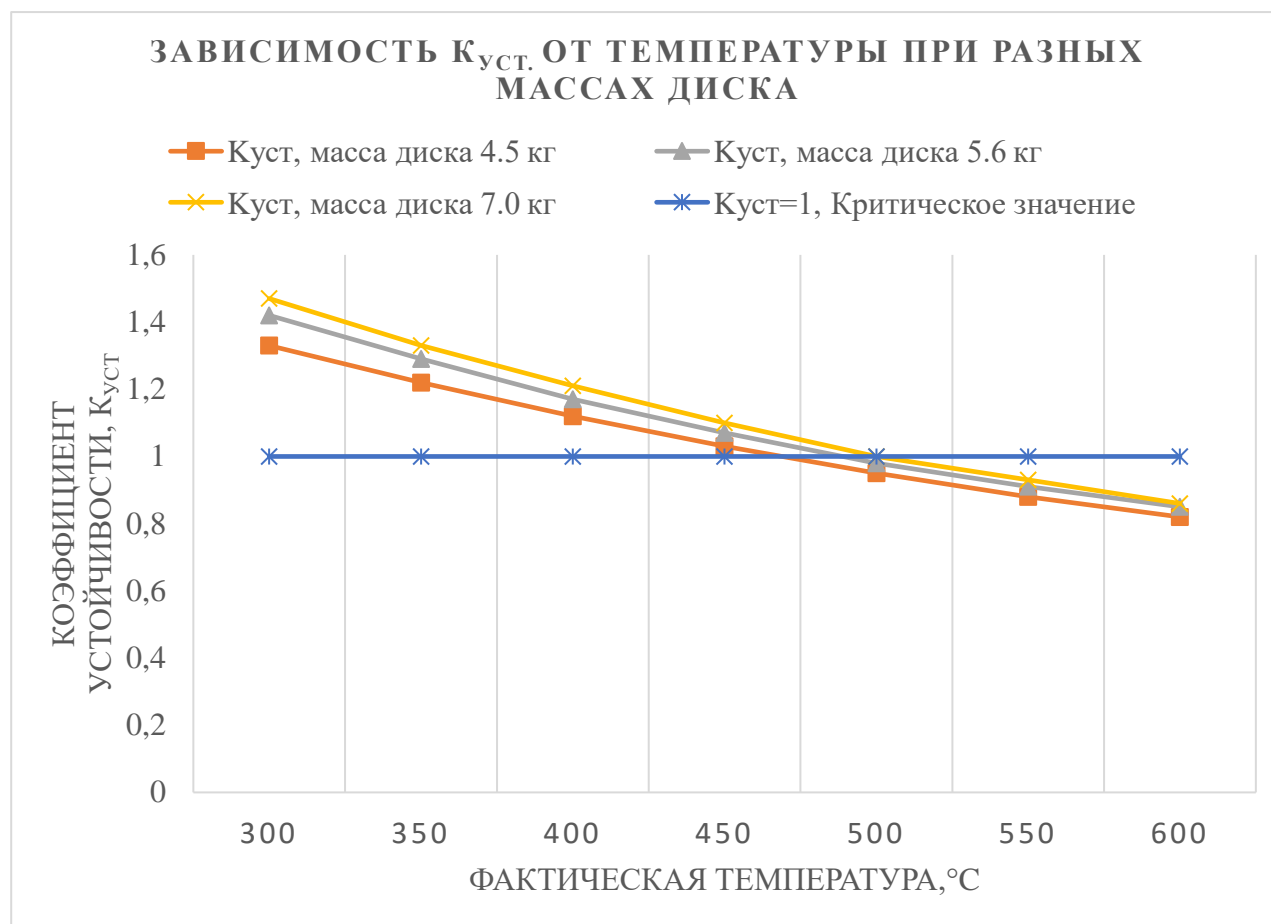


Рисунок 1 – Зависимости коэффициента устойчивости  $K_{уст}$  от температуры при различных значениях массы тормозного диска.

Установлено, что увеличение массы диска способствует росту коэффициента устойчивости за счёт большей тепловой инерции.

При  $K_{уст} < 1$  система уже работает за пределами допустимого теплового ресурса — это зона потенциального отказа (фейдинг).

По результатам расчётов, приведённых в таблице 2, построен график (рис.2) зависимости интенсивности отказов  $\lambda$  от времени эксплуатации.

Таблица 3- Интенсивность отказов  $\lambda$  в зависимости от времени эксплуатации

| Время наблюдения, ч | Интенсивность отказов $\lambda$ , 1/ч |
|---------------------|---------------------------------------|
| <b>50</b>           | <b>0,006</b>                          |
| 100                 | 0,003                                 |
| 150                 | 0,002                                 |
| 200                 | 0,0015                                |
| 250                 | 0,0012                                |
| 300                 | 0,001                                 |
| 350                 | 0,00086                               |
| 400                 | 0,00075                               |
| 450                 | 0,00067                               |
| 500                 | 0,0006                                |

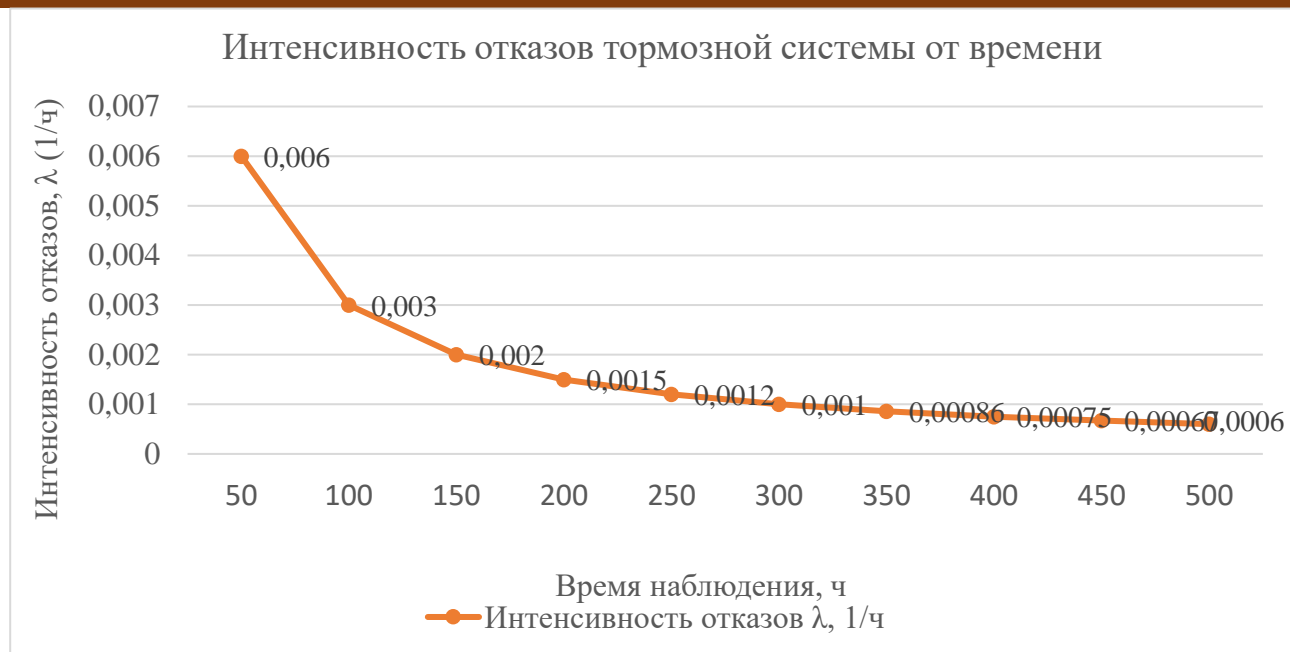


Рисунок 2-Зависимость интенсивности отказов тормозной системы от времени эксплуатации

Показано, что при росте времени наблюдения интенсивность отказов стабилизируется на уровне менее 0.002 1/ч.

#### 2.4. Диаграмма фейдинга: снижение коэффициента трения $\mu$ при росте температуры

Диаграмма, отражающая снижение коэффициента трения тормозной системы с ростом температуры поверхности, построена на основе следующей расчётной модели:

$$\mu = 0,45 - 0,0015 \cdot (T - 300)$$

- $\mu$  — коэффициент трения между колодкой и тормозным диском;
- $T$  — температура рабочей поверхности тормозного диска (в °C);
- 0,45 — исходное значение коэффициента трения при температуре 300 °C;
- 0,0015 — эмпирический коэффициент снижения трения с повышением температуры [6];
- $(T-300)$  — превышение температуры над базовым уровнем.

Результаты расчётов представлены в таблице 4 и отображены на графике (рис.3).

Таблица 4 - Снижение коэффициента трения тормозной системы при росте температуры поверхности

| Температура, °C | Коэффициент трения $\mu$ |
|-----------------|--------------------------|
| 350             | 0,375                    |
| 400             | 0,300                    |
| 450             | 0,225                    |
| 500             | 0,150                    |
| 550             | 0,075                    |
| 600             | 0                        |

Диаграмма, иллюстрирующая снижение коэффициента трения в зависимости от температуры, демонстрирует нарастание эффекта фейдинга при превышении пороговых температур.

Начиная с температуры около **500 °C**, коэффициент трения приближается к критическим значениям (0.3 и ниже), что указывает на наступление **фейдинга** — резкого ухудшения тормозной эффективности.

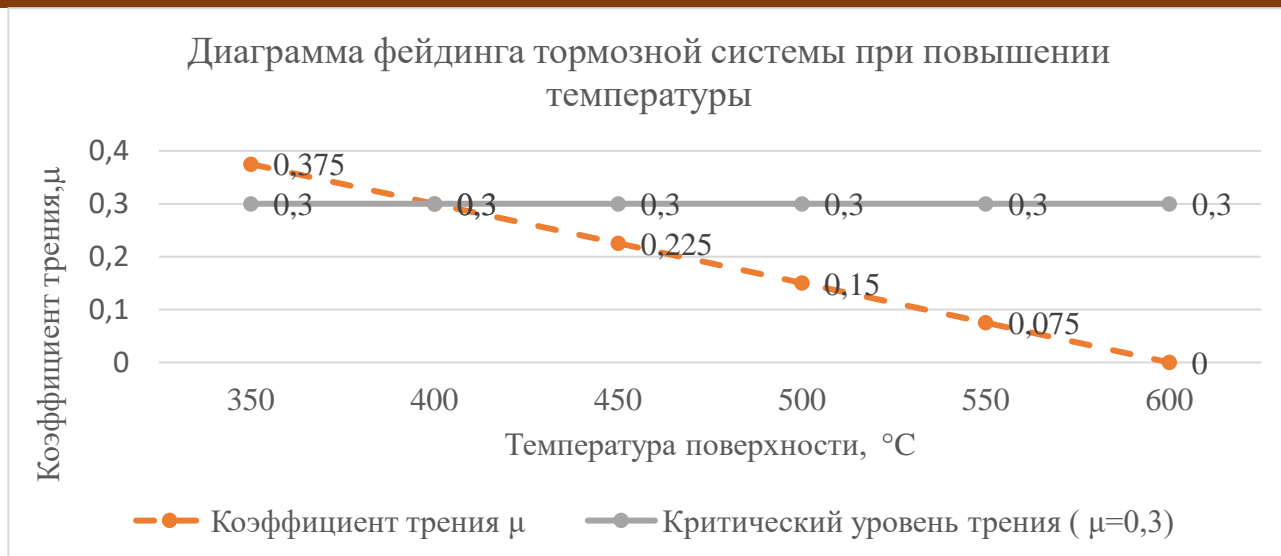


Рисунок 3- Диаграмма фейдинга: снижение коэффициента трения в диапазоне температур 350–600 °C

## 2.5.Повышение устойчивости и надёжности тормозной системы

Анализ эксплуатационных и конструктивных факторов позволяет выделить ряд направлений, способствующих увеличению запаса надёжности и устойчивости тормозной системы:

- Применение вентилируемых и термостойких тормозных дисков, которые обеспечивают эффективный отвод тепла и устойчивость к перегреву при многократных торможениях (в том числе уже реализовано в модели W211);
- Установка температурных датчиков в тормозных суппортах для мониторинга тепловой нагрузки в реальном времени;
- Наличие электронных систем ABS и EBD, обеспечивающих автоматическое распределение тормозных усилий и предотвращение блокировки колёс;
- Регулярное техническое обслуживание, включающее проверку уровня тормозной жидкости, состояния колодок и герметичности гидроприводов;
- Увеличение площади охлаждения тормозных механизмов за счёт направляющих воздухопроводов или применения композитных защитных щитков.

Эти меры позволяют существенно повысить как отказоустойчивость, так и термическую стабильность тормозной системы при эксплуатации в горных условиях.

На основании проведённых расчётов и анализа получены следующие выводы:

1. Проведённая количественная и графическая оценка показала, что тормозная система автомобиля Mercedes-Benz W211 обладает допустимым запасом устойчивости и удовлетворительными показателями надёжности при эксплуатации в горных условиях.
2. Основным риском функционирования системы является **фейдинг**, возникающий при температурах выше 500 °C, что требует конструктивных и эксплуатационных решений по усилению теплоотвода.
3. Вероятностный анализ надёжности показал среднее время безотказной работы порядка 667 часов, что соответствует допустимым нормам при условии регулярного технического обслуживания.
4. Для повышения надёжности рекомендуется внедрение систем активного контроля температуры, а также проведение профилактических мероприятий, направленных на предотвращение критических состояний тормозной системы.

*Рецензент: Холов Давлатали — к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация гидромелиоративных систем» Таджикского аграрного университета имени Ш. Шохрета.*

## Литература

1. Давлатшоев, Р. А. Влияние термонагруженности на эффективность тормозных систем в горных условиях / Р. А. Давлатшоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 1(69). – С. 99-105. – EDN XQCUZZ.
2. Кудрявцев В.П., Кононов А.И. Безопасность движения и надёжность тормозных систем. — М.: Транспорт, 2017. — 352 с.
3. ЕЭК ООН. Правила №13. Требования к тормозным системам автотранспортных средств.

4. ISO 26262: Road vehicles — Functional safety. — Geneva: ISO, 2018.
5. Mercedes-Benz. Service Manual W211: Brake System Overview. — Stuttgart: Daimler AG, 2010.
6. Bellini, C. et al. — “Temperature Influence on Brake Pad Friction Coefficient Modelisation” (Materials, 2024).

**МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ-INFORMATION ABOUT  
THE AUTHOR**

| TJ   | RU  | EN   |
|--|---|--|
| Давлатшоев Рашид Асанхонович                                       | Давлатшоев Рашид Асанхонович  | Davlatshoev Rashid Asankhonovich                                 |
| Донишгоҳи техникии<br>Тоҷикистон ба номи акад. М.С.<br>Осими       | Таджикский технический<br>университет имени академика<br>М.С. Осими | Tajik Technical University named<br>after academician M.S. Osimi |
| н.и.т, дотсент   | к.т.н, доцент   | Candidate of Technical Sciences,<br>Associate Professor          |
| E mail: <a href="mailto:d_rashid71@mail.ru">d_rashid71@mail.ru</a> |   |  |