

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВЛИЯНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ MERCEDES-BENZ W211)

Р.А. Давлатшоев

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В статье разработана математическая модель температурного влияния на коэффициент трения тормозной системы автомобиля Mercedes-Benz W211. Рассмотрены линейная и экспоненциальная зависимости коэффициента трения от температуры тормозного диска и введён температурный коэффициент фейдинга, характеризующий интенсивность его снижения при нагреве. Установлено, что при температуре порядка 400 °С коэффициент трения уменьшается приблизительно на 35 %, а различие между линейной и экспоненциальной моделями в рабочем диапазоне температур является незначительным. Показана применимость полученных зависимостей для инженерных расчётов тормозного пути и оценки тепловой устойчивости тормозных систем.

Ключевые слова: коэффициент трения, температурный фейдинг, тормозная система, Mercedes-Benz W211, линейная модель, экспоненциальная модель.

МОДЕЛИ МАТЕМАТИКИ ТАЪСИРИ ҲАРОРАТ БА КОЭФФИЦИЕНТИ СОИШИ СИСТЕМАҶОИ БОЗДОРИИ АВТОМОБИЛҶО (ДАР МИСОЛИ MERCEDES-BENZ W211)

Р.А. Давлатшоев

Дар мақола модели математикӣ оид ба таъсири ҳарорат ба коэффисиенти соиши системаи боздории автомобили Mercedes-Benz W211 таҳия шудааст. Вобастагиҳои ҳаттӣ ва экспоненсиалии коэффисиенти соиш аз ҳарорати диски боздорӣ баррасӣ гардида, коэффисиенти ҳароратии фейдинг ҷорӣ карда шудааст, ки шиддатнокии коҳишбӣи онро ҳангоми гармшавӣ тавсиф менамояд. Муайян карда шудааст, ки дар ҳарорати тақрибан 400 °С коэффисиенти соиш тақрибан 35 % коҳиш меёбад, ва фарқият байни моделҳои ҳаттӣ ва экспоненсиалӣ дар доираи ҳароратҳои корӣ ночиз мебошад. Таъбиқи вобастагиҳои бадастомада барои ҳисобҳои муҳандисии роҳи боздорӣ ва арзёбии устувории ҳароратии системаҳои боздорӣ нишон дода шудааст.

Калидвожаҳо: коэффисиенти соиш, фейдинги ҳароратӣ, системаи боздорӣ, Mercedes-Benz W211, модели ҳаттӣ, модели экспоненсиалӣ.

MATHEMATICAL MODEL OF THE TEMPERATURE EFFECT ON THE FRICTION COEFFICIENT OF AUTOMOTIVE BRAKING SYSTEMS (A CASE STUDY OF MERCEDES-BENZ W211)

R.A. Davlatshoev

The paper develops a mathematical model describing the effect of temperature on the friction coefficient of the braking system of a Mercedes-Benz W211 vehicle. Linear and exponential dependencies of the friction coefficient on the brake disc temperature are considered, and a temperature fading coefficient is introduced to characterize the intensity of its reduction during heating. It is established that at a temperature of about 400 °C the friction coefficient decreases by approximately 35%, while the difference between the linear and exponential models within the operating temperature range is insignificant. The applicability of the obtained relationships for engineering calculations of braking distance and for assessing the thermal stability of braking systems is demonstrated.

Keywords: friction coefficient, thermal fading, braking system, Mercedes-Benz W211, linear model, exponential model.

Введение

Температурное воздействие на коэффициент трения тормозной системы является одним из ключевых факторов, определяющих надёжность [7-8] и безопасность движения автомобиля. При интенсивном торможении происходит нагрев тормозных дисков и колодок, что приводит к явлению температурного фейдинга— снижению коэффициента трения и ухудшению эффективности торможения [1, 5].

Особую опасность фейдинг представляет при эксплуатации автомобилей в горных условиях. Длительные спуски, повышенные динамические нагрузки и частые торможения вызывают значительный рост температуры тормозных дисков, что может привести к увеличению тормозного пути и снижению устойчивости управления [2, 5]. В таких условиях использование стандартных расчётных зависимостей без учёта температурного фактора может приводить к существенным погрешностям.

Для инженерного анализа необходима количественная зависимость коэффициента трения от температуры, позволяющая учитывать тепловые процессы в тормозной системе при расчётах тормозного пути и оценке её тепловой устойчивости [1, 4].

Цель работы — разработка математической модели температурного влияния на коэффициент трения тормозной системы с учётом условий эксплуатации в горной местности и её применение к автомобилю Mercedes-Benz W211.

Научная новизна работы заключается во введении температурного коэффициента фейдинга, позволяющего унифицировать линейные и экспоненциальные модели деградации коэффициента трения и определить границы их применимости для инженерных расчётов тормозных систем.

Исследовательская часть

Математическая модель температурного фейдинга

Для количественного описания влияния температуры на коэффициент трения используется нормированная зависимость, учитывающая снижение трения при нагреве тормозного диска [1, 5]:

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot \left(1 - k \frac{(T - T_0)}{(T_{кр} - T_0)}\right) \quad (1)$$

где:

- μ_0 — коэффициент трения при начальной температуре T_0 ,
- T — текущая температура тормозного диска,
- $T_{кр}$ — критическая температура, при которой начинается интенсивный фейдинг,
- k — безразмерный эмпирический коэффициент, характеризующий интенсивность деградации фрикционного материала и обусловленное ею снижение коэффициента трения при термонагруженном торможении.

Преобразуя выражение, получим линейную форму зависимости:

$$\mu(T) = \mu_0 - \frac{\mu_0 \cdot k}{(T_{кр} - T_0)} (T - T_0) \quad (2)$$

Введём температурный коэффициент фейдинга:

$$k' = \frac{\mu_0 \cdot k}{(T_{кр} - T_0)} \quad (3)$$

имеющий размерность $1/^\circ\text{C}$ и характеризующий скорость снижения коэффициента трения при увеличении температуры тормозного диска.

Тогда зависимость принимает вид:

$$\mu(T) = \mu_0 - k' \cdot (T - T_0) \quad (4)$$

Данная формула удобна для инженерных расчётов тормозного пути и анализа теплового состояния тормозной системы.

Определение параметров для Mercedes-Benz W211

Для практического применения модели рассмотрим тормозную систему автомобиля Mercedes-Benz W211.

Обоснование исходных параметров

Начальный коэффициент трения. Значение коэффициента трения при начальной температуре $T_0=20^\circ\text{C}$ принято на основе экспериментальных и справочных данных для дисковых тормозных механизмов легковых автомобилей среднего и бизнес-класса [1, 4]. Согласно данным производителей фрикционных накладок и результатам стендовых испытаний, характерный диапазон коэффициента трения составляет $\mu=0,32 \div 0,37$ [4].

В данной работе в качестве исходного значения коэффициента трения принято $\mu_0=\mu(20^\circ\text{C})=0,35$.

Начальная температура. Температура $T_0=20$ °С принята как условно-начальное состояние тормозного механизма до начала интенсивного тепловыделения, что соответствует исходным условиям расчётных и экспериментальных исследований.

Параметр интенсивности фейдинга. В ряде источников приводятся значения параметра интенсивности фейдинга в диапазоне $k=0,01\div 0,05$ [3, 6]. Однако указанные значения относятся к иным формам нормированных или эмпирических моделей, в которых параметр k характеризует температурную чувствительность коэффициента трения или используется в качестве поправочного коэффициента при аппроксимации экспериментальных данных. В связи с этим прямое сопоставление этих значений с параметром, используемым в настоящей работе, является некорректным. В данной работе параметр интенсивности фейдинга k трактуется как относительное снижение коэффициента трения при достижении критической температуры фейдинга $T_{кр}$. Коэффициент трения в критическом состоянии определяется соотношением:

$$\mu(T_{кр})=\mu_0 \cdot (1-k),$$

эквивалентно:

$$k = 1 - \frac{\mu(T_{кр})}{\mu_0} \quad (5)$$

При достижении критической температуры $T_{кр}=400$ °С наблюдается снижение коэффициента трения до уровня [6]:

$$\mu(T_{кр})=0,65\mu_0, \quad (6)$$

После подстановки выражения (6) в формулу (5) получаем

$$k = 1 - \frac{0,65\mu_0}{\mu_0} = 0,35$$

Таким образом, значение **$k=0,35$** соответствует уменьшению номинального коэффициента трения на 35 % и согласуется с экспериментальными данными для тормозных фрикционных материалов, работающих в условиях интенсивных тепловых нагрузок, в частности при длительных горных спусках [2, 5].

Расчёт температурного коэффициента фейдинга

Разность температур $T_{кр}-T_0$ определяет температурный интервал, в пределах которого происходит деградация фрикционных свойств тормозной системы от номинального состояния до режима интенсивного фейдинга.

$$T_{кр}-T_0=400-20=380 \text{ °С}$$

Температурный коэффициент фейдинга:

$$k' = \frac{0,35 \cdot 0,35}{380 \text{ °С}} = 3,42 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{°С}}$$

Использование шкалы Кельвина или Цельсия не влияет на численное значение коэффициента фейдинга, так как расчёт ведётся по разности температур.

Линейная и экспоненциальная модели

Для описания температурного фейдинга используются две модели:

1. Линейная модель (фейдинг первого порядка):

$$\mu(T) = \mu_0 - k' \cdot (T - T_0) \text{ при } T_0 \leq T \leq T_{кр} \quad (7)$$

2. Экспоненциальная модель (термодеградационная) [3]:

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot e^{-k' \cdot (T - T_0)} \text{ при } T > T_{кр} \quad (8)$$

Экспоненциальная модель обеспечивает физически корректное асимптотическое поведение коэффициента трения при высоких температурах; при этом она не накладывается по значению на линейную модель в точке $T=T_{кр}$, поскольку используется как асимптотическая аппроксимация и не требует их строгого совпадения.

Для корректного сравнения в обеих моделях используется одинаковое значение коэффициента $k' = 3,42 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{°С}}$

Результаты исследования**Расчёт коэффициента трения при различных температурах**

После определения параметров тормозной системы Mercedes-Benz W211 и выбора моделей температурного фейдинга (линейной и экспоненциальной) проведены расчёты коэффициента трения $\mu(T)$ при различных температурах тормозного диска.

Результаты расчёта коэффициента трения при различных температурах приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1- Результаты расчёта коэффициента трения при различных температурах

Температура, °C	Линейная модель	Экспоненциальная модель
20	0,35	0,35
100	0,322	0,341
200	0,287	0,329
300	0,252	0,318
400	0,22	0,307
500	-*	0,297

*Примечание: линейная модель применима до $T_{кр}=400$ °C.

Анализ результатов показывает, что при температуре порядка 400 °C коэффициент трения снижается примерно на 35% относительно номинального значения. В диапазоне температур до 300 °C расхождение между линейной и экспоненциальной моделями не превышает 6 %, что допускает использование линейной аппроксимации для инженерных расчётов.

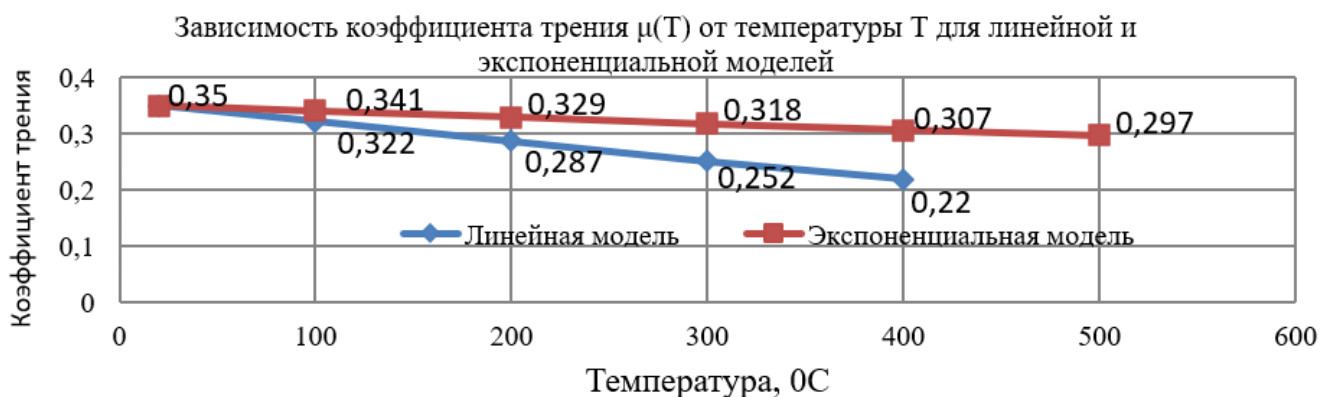


Рисунок 1 — Изменение коэффициента трения μ в зависимости от температуры T при линейной и экспоненциальной аппроксимации

График показывает, что при умеренных температурах (до 200 °C) различия между моделями незначительны, однако при высоких температурах экспоненциальная модель обеспечивает физически корректное асимптотическое поведение коэффициента трения.

Выводы

1. Разработана математическая модель температурного влияния на коэффициент трения тормозной системы автомобиля Mercedes-Benz W211, учитывающая процесс температурного фейдинга фрикционных материалов при нагреве тормозного диска.

2. Введён температурный коэффициент фейдинга k' , позволяющий количественно описывать скорость снижения коэффициента трения при увеличении температуры и унифицировать линейную и экспоненциальную модели деградации фрикционных свойств.

3. Установлено, что при достижении температуры тормозного диска порядка 400 °C коэффициент трения снижается приблизительно на 35 % по сравнению с номинальным значением, что соответствует экспериментальным данным для тормозных систем, работающих в условиях интенсивных тепловых нагрузок.

4. Показано, что в рабочем диапазоне температур тормозного диска расхождение между линейной и экспоненциальной моделями коэффициента трения является незначительным, что допускает использование линейной аппроксимации для инженерных расчётов тормозного пути.

5. Экспоненциальная модель обеспечивает более корректное описание поведения коэффициента трения при высоких температурах и может быть использована для анализа глубокого температурного фейдинга и оценки тепловой устойчивости тормозных систем.

Заключение

В работе разработана математическая модель температурного влияния на коэффициент трения тормозной системы автомобиля Mercedes-Benz W211, позволяющая учитывать процесс температурного фейдинга при инженерных расчётах. Введение температурного коэффициента фейдинга дало возможность формализовать снижение фрикционных свойств тормозных механизмов при нагреве и обеспечить сопоставимость линейной и экспоненциальной аппроксимаций.

Показано, что линейная модель может быть эффективно использована для расчётов в диапазоне рабочих температур тормозного диска, характерных для большинства эксплуатационных режимов. Экспоненциальная модель, в свою очередь, обеспечивает более корректное описание поведения коэффициента трения при высоких температурах и может применяться для анализа глубокого температурного фейдинга и оценки тепловой устойчивости тормозных систем.

Полученные зависимости могут быть использованы при расчёте тормозного пути, анализе эффективности торможения и разработке рекомендаций по эксплуатации автомобилей в условиях повышенных тепловых нагрузок, в том числе при движении в горной местности.

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

Литература

1. Куликов В.А. Физика трения и износа. – М.: Машиностроение, 2018.
2. Иванов И.И. *Модель температурного влияния на коэффициент трения тормозных систем автомобилей* // Транспорт. – 2022. – № 3. – С. 45–53.
3. Давлатшоев, Р. А. Моделирование тормозных сил и тепловых процессов при движении автомобиля на уклоне / Р. А. Давлатшоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 2(70). – С. 104-109. – EDN YESVJT.
4. Mercedes-Benz W211 Technical Manual. – 2006.
5. Мельников С.П. Надёжность и тепловая устойчивость автомобильных тормозных систем. – СПб.: Питер, 2019.
6. Давлатшоев, Р. А. Надёжность и работоспособность тормозной системы автомобиля при движении на уклонах / Р. А. Давлатшоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 4(72). – С. 77-83. – DOI 10.65599/GCOK1719. – EDN DXGWFA.
7. Ременцов, А. Н. Анализ состояния аварийности на горных автомобильных дорогах Республики Таджикистан / А. Н. Ременцов, Р. А. Давлатшоев, Д. Ш. Тошев // Вестник Таджикского технического университета. – 2015. – № 2(30). – С. 54-57. – EDN UNRLXF.
8. Давлатшоев, Р. А. Анализ эффективности распределения тормозных усилий электронными системами ESP и EBD при движении автомобиля на уклоне / Р. А. Давлатшоев // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2025. – № 3(11). – С. 4-10. – EDN SWHGCU.

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 Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осими	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi
н.и.т, дотсент	к.т.н, доцент	Candidate of Technical Sciences
E mail: d_rashid71@mail.ru		
ORCID Id 0000-0002-7317-5245		