

ОТВОД ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПУТЕМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ДИСКОВЫХ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Яицков И.А.¹, Федотов Е.С.^{1,2}

¹*Ростовский государственный университет путей сообщения, г.Ростов-на-Дону;*

²*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар*

Ключевые слова: теплопередача, тормозной механизм, тормозной диск, тормозная колодка, теплопередача.

Аннотация. При рассмотрении любого вопроса связанного с отводом тепловой энергии, как правило, рассматривают способы решения данной проблемы. Одним из возможных вариантов является отвод тепловой энергии при помощи теплопередачи. Данный вид передачи тепловой энергии возникает при эксплуатации дисковых тормозных механизмов. В данной статье рассмотрены моменты, связанные с теплопроводностью в дисковых тормозных механизмах, а также описаны основные параметры расчетов при отводе тепловой энергии за счет теплопроводности элементов конструкции различных дисковых тормозных механизмов.

REMOVAL OF THERMAL ENERGY BY THERMAL CONDUCTIVITY OF THE STRUCTURAL ELEMENTS OF DISC BRAKES

Yaitskov I.A.¹, Fedotov E.S.^{1,2}

¹*Rostov State University of Railway Transport, Rostov-on-Don;*

²*Kuban State Technological University, Krasnodar*

Keywords: heat transfer, brake mechanism, brake disc, brake pad, heat transfer.

Abstract. When considering any issue related to the removal of thermal energy, as a rule, they consider ways to solve this problem. One of the possible options is the removal of thermal energy by means of heat transfer. This type of heat energy transfer occurs during the operation of disc brakes. This article discusses the issues related to thermal conductivity in disc brakes, and also describes the main parameters of calculations for the removal of thermal energy due to the thermal conductivity of structural elements of various disc brakes.

Во время процесса торможения тепло выделяется в результате трения тормозной колодки об поверхность тормозного диска [1]. Повышенная температура поверхности тормозного диска (полудиски) передается на составные части, включая вентиляционный аппарат и ступицу тормозного диска. Устройство данного тормозного диска показано на (рис. 1).

Однако, если рассмотреть единичный случай торможения в таком случае тепловая энергия не распространяется равномерно в теле тормозного диска и фрикционными накладками, подобные явления были описаны в источниках [2, 3]. В этом случае создаются значительные термические напряжения.

Степень распространения температурного потока будет зависеть от свойств материала тормозного диска и площади рабочей поверхности диска. При этом необходимо учитывать, что часть тепловой энергии при однократном торможении будет отводиться, на тормозные колодки более подробно были рассмотрены в источниках [4, 5]. Долю энергии, отводимую на поверхность

тормозного диска, можно вычислить по уравнению 1. Данные исследования проводились в исследованиях Sheridan D.C. [6].

$$\lambda = \left[1 + \sqrt{\frac{\rho_p \cdot C_{p_p} \cdot k_p}{\rho_d \cdot C_{p_d} \cdot k_d} \cdot \frac{A_{s_p}}{A_{s_d}}} \right]^{-1} \quad (1)$$



Рис. 1. Устройство тормозного механизма с вентилируемым тормозным диском

Исходя из этого, можно сделать выводы, что тормозные колодки изготовленные из материалов с хорошей теплопроводностью могут поглощать соответствующее количество тепловой энергии [7]. Однако, большая часть энергии поглощается самим диском.

Расчет по уравнению (1) возможен только при однократном торможении, так как при повторных торможениях возникает разделение отвода теплового потока за счет конвекции и излучения [8].

Теплопроводность тормозного диска играет очень важную роль в течении первых секунд торможения, а конвекция и излучение важны уже при достижении равномерного распределения температуры. Таким образом, коэффициент теплопроводности тормозного диска влияет на его температурное поведение. Исходя из этого, чем больше теплопроводность и быстрота распределения тепловой энергии, а равно уменьшению температурных градиентов, тем и меньше тепловая нагрузка самого тормозного узла [9]. Еще немаловажным параметром в данном случае является толщина самого тормозного диска. Чем больше объем тела тормозного диска и меньше площадь пятна контакта, тем более энергоемкий получается узел. Однако, увеличение размеров тормозного диска ведет и ряд негативных факторов, такие как увеличение нагруженности узла и увеличение веса [10]. Поэтому при проектировании встает остро вопрос нахождения оптимальных соотношений тепловой нагруженности и эффективности работы самого узла. Проблема энергоемкости тормозных устройств является многомерной задачей, ввиду значимости именно толщины самого диска влияющего на теплопроводность и температурные градиенты [10, 11].

Подобный метод, описанный Limpert R. в 1999 году [12], использовался для сплошных тормозных дисков. В данном случае предполагалось, что тормозной диск представлял собой симметрично нагруженную плиту с постоянным тепловым потоком по поверхности трения

Тепловая энергия рассеивается с поверхности тормозного диска в трех режимах теплопередачи: конвекция, теплопроводность и излучение. В случае с дисковыми тормозами теплопроводность происходит от диска к ступице, колесному диску, а также отвод тепловой энергии через колодки [5, 13]. Происходящая теплопередача полностью зависит от теплопроводности материала тормозного диска и колодки, а также площади, нормальной к тепловому потоку. Так как теплопроводность не одинаковы для разных материалов, то скорость теплопередачи полностью зависит от материала тормозного диска и тормозной колодки [14, 15].

Сам процесс теплопередачи зависит от ряда факторов, определяющих коэффициент теплопередачи.

Для рассматриваемой поверхности тормозного диска коэффициент теплопроводности можно представить в следующем виде K , Вт/м²·К:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}}, \quad (2)$$

где α_1 , – коэффициенты теплоотдачи нагретого тормозного диска, Вт/м²·К, δ_1 – толщина тормозного диска, м, λ_1 – теплопроводность тела тормозного диска Вт/м·К.

Исходя из уравнения (2) можно прийти к выводу, что коэффициент теплопередачи, а равно степень интенсивности теплообмена зависит в значительной мере от физических свойств самого тормозного диска и колодки.

Таким образом, для описания процесса теплопередачи необходимо прежде всего рассмотреть процесс теплоотвода тепловой энергии тормозным диском [3, 16].

Существует два пути отвода тепловой энергии при помощи теплопроводности от тормозных дисков:

первый – через подшипниковый узел (ступичный узел);

второй – путем отвода тепловой энергии через колесный диск, который и является основным отводящим путем [17]. Тепловой поток можно оценить по закону теплопроводности Фурье следующим образом:

$$Q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}. \quad (3)$$

Небольшая площадь A и очень низкая разница температур ($T_D - T_C$) ограничивают количество тепловой мощности, отводимой теплопроводностью. Поэтому теплопроводность в тормозных механизмах может стать незначительной по сравнению с конвективным теплообменом [17]. Таким образом, при расчете параметров теплообмена в дисковых тормозах теплопроводность учитывается редко в виду его незначительного значения в сравнении с конвективным теплообменом.

Список литературы

1. Федотов Е.С. Аналитический подход к выбору метода теплового расчета дисково-колодочных тормозных механизмов / Е.С. Федотов, П.А. Поляков, М.В. Стародуб // Сурский вестник. 2021. № 2 (14). С. 69-74.
2. Балон Л.В. Математическое моделирование тормозных систем локомотивов командного типа / Л.В. Балон, И.А. Яицков // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2006. № 11. С. 100-102.
3. Балон Л.В. Расчет конструктивных параметров и основные математические модели пневматических тормозных систем локомотивов / Л.В. Балон, И.А. Яицков // Юбилейный сборник научных трудов электромеханического факультета к 75-летию РИИПС-РИИЖТ-РГУПС. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2004. С. 29-33.
4. Яицков И.А. Повышение эффективности торможения локомотивов: дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2003.
5. Федотов, Е.С. Интенсификация конвективного теплообмена вентилируемого тормозного диска при наличии термического сопротивления // Е.С. Федотов, П.А. Поляков, М.В. Стародуб // Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения): материалы VIII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2021. С. 133-137.
6. Sheridan D.C. Approches to the thermal modelling of disc brakes / D.C. Sheridan, J.A. Kutchey, F. Samie // In SAE International Congress and Exposition / Detroit Michigan. February 29–March 4, 1988. SAE Technical Papers 880256, p. 1-16.
7. Поляков П.А. Математическое моделирование удельного давления тормозного механизма / П.А. Поляков, Е.С. Федотов, Е.А. Полякова, А.А. Голиков, В.О. Виниченко // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2020. № 5. С. 20-25.
8. Федотов Е.С. Интенсификация конвективного теплообмена при изменении скорости потока воздуха в вентилируемом тормозном диске / Е.С. Федотов, П.А. Поляков, М.В. Стародуб // Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения): материалы VIII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2021. С. 137-140.
9. Федотов Е.С. Моделирование температурного поля дискового тормоза / Е.С. Федотов, Н.А. Вольченко, П.А. Поляков, Р.С. Тагиев // Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Краснодар: КубГТУ, 2019. С. 758-763.
10. Федотов Е.С. Влияние перегрева дисково-колодных тормозных механизмов на надежность и эффективность торможения / Е.С. Федотов, С.В. Харьков, М.Б. Москаленко // Фундаментальные основы механики. 2020. № 5. С. 24-30.
11. Поляков П.А. Оценка эффективности системы охлаждения вентилируемых дисковых тормозных механизмов / П.А. Поляков, Е.С. Федотов, Е.А. Полякова, Р.С. Тагиев, М.Б. Москаленко // Фундаментальные основы механики. 2020. № 5. С. 40-45.
12. Limpert R. Brake Design and Safety. 2nd ed. SAE Inc., 1999.
13. Литвинов А.Е. Разработка методики оценки системы охлаждения тормозных дисков / А.Е. Литвинов, П.А. Поляков, Е.А. Полякова, Р.С. Тагиев, Е.С. Федотов, А.А. Голиков // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 1. С. 14-22.
14. Балон Л.В. Определение быстродействующей тормозной системы локомотива на основе разработанных основных математических моделях подсистем / Л.В. Балон, И.А. Яицков // Актуальные проблемы развития транспорта России: стратегические, региональные, технические. Труды Международной научной конференции, посвященной 75-летию РГУПС. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2004. С. 51-54.
15. Балон Л.В. Конструктивные особенности пневматической тормозной системы грузопассажирского электровоза ДС3 / Л.В. Балон, И.А. Яицков // Транспорт-2003. труды научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава: в 2-х частях. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2003. С. 153-156.

16. Яицков И.А. Структурнопараметрический синтез дисково-колодочного тормоза / И.А. Яицков, А.Е. Литвинов, П.А. Поляков, Н.А. Задаянчук // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2 (82). С. 75-85.
17. Polyakov P.A. Design of surface profile of pairs of friction unit / Polyakov P.A., Litvinov A.E., Polyakova E.A., Fedotov E.S., Tagiev R.S. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. P. 012001.

Сведения об авторах:

Яицков Иван Анатольевич – д.т.н., доцент, декан Электромеханического факультета, профессор кафедры ВиВХ, РГУПС, г. Ростов-на-Дону;

Федотов Евгений Сергеевич – аспирант РГУПС, г. Ростов-на-Дону, старший преподаватель кафедры ТПиТК, КубГТУ, г. Краснодар.