

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПЕРФОРИРОВАННОГО ТОРМОЗНОГО ДИСКА

Федотов Е.С.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Ключевые слова: тормозной механизм, тормозной диск, вентиляционный аппарат, воздушный поток, перфорация тормозного диска, эффективность работы.

Аннотация. В данной работе рассматриваются вопросы влияния наличия перфорационных отверстий в тормозных дисках на эффективность конвективного теплоотвода. В результате работы вентиляционного аппарата при вращении тормозного диска в значительной степени влияет условия течения воздушного потока через вентиляционные каналы. Чем больше воздушный поток задерживается в теле тормозного диска, тем эффективнее происходит теплообмен. Данный эффект можно добиться путем увеличения длины вентиляционного канала или создания турбулентного течения воздушного потока. Перфорационные отверстия способствуют разделению воздушного потока на разные направления движения, в результате чего в вентиляционном канале создается турбулентный режим течения воздушного потока. Перфорационные отверстия кроме положительного эффекта работы несет еще и отрицательный характер в виде охрупчивания конструкции тормозного диска. В работе представлены результаты опытных исследований эффективности работы перфорационных отверстий в тормозном диске и их влияние на эксплуатационные параметры работы.

INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF THE VENTILATED PERFORATED BRAKE DISC

Fedotov E.S.

Kuban State Technological University, Krasnodar

Keywords: brake mechanism, brake disc, ventilation unit, air flow, perforation of the brake disc, work efficiency.

Abstract. This paper discusses the influence of the presence of perforations in brake discs on the efficiency of convective heat removal. As a result of the operation of the ventilation apparatus during the rotation of the brake disc, the conditions of the airflow flow through the ventilation ducts are significantly affected. The more the air flow is delayed in the body of the brake disc, the more efficient the heat exchange occurs. This effect can be achieved by increasing the length of the ventilation duct or creating a turbulent airflow. Perforations contribute to the separation of the air flow into different directions of movement, as a result of which a turbulent air flow regime is created in the ventilation duct. Perforations, in addition to the positive effect of the work, also have a negative character in the form of embrittlement of the brake disc structure. The paper presents the results of experimental studies of the efficiency of perforations in the brake disc and their impact on the operational parameters of the work.

Введение

При торможении транспортного средства, кинетическая энергия посредством работы тормозных механизмов превращается в тепловую энергию, которая потом в последствии рассеивается в окружающую среду [1]. На сегодняшний день существует множество вариантов исполнения конструктивных решений в области вентиляционного аппарата тормозных дисков. Однако проблема остаетсястрой при решении вопроса теплоотвода тормозного диска. Идеального варианта решения данной проблемы не существует, а поэтому изучение вопроса эффективности работы вентиляционного аппарата будет всегда актуальным. Представленная методика изучения, описанная ниже, носит следующие цели и задачи:

- цель – провести исследования в область эффективности работы различных по конструкции тормозных дисков;
- задачи – доказать эффективность работы перфорированного тормозного диска в зависимости от конструктивного исполнения по сравнению со сплошным диском.

Исследования, построенные на изучении данного вопроса, помогут оценить эффективность работы тормозных дисков с перфорацией, определить различные конструктивные проблемы и постановку вопроса дальнейшего исследования.

Характеристика объектов и методов исследования

Тормозной момент напрямую зависит от усилия создаваемого тормозным устройством и конструктивными размерами самого тормозного диска [2]. Таким образом, можно рассчитать момент трения $M_{тр}$ (Н), принимая во внимание данные параметры:

$$M_{тр} = r_{ср} \cdot F_{тр}, \quad (1)$$

где $r_{ср}$ – радиус тормозного диска, м; $M_{тор}$ – тормозной момент, Нм.

Силу трения $F_{тр}$ можно вычислить по уравнению:

$$F_{тр} = \mu_{тр} \cdot P_{норм}, \quad (2)$$

где $P_{норм}$ – нормальная сила, приложенная к диску со стороны колодки, Н;

$\mu_{тр}$ – коэффициент трения колодки об тормозной диск.

Зная коэффициент трения $\mu_{тр}$, давление p (МПа) оказываемого на поверхность трения, можно определить интенсивность тепловыделения q при работе тормозного механизма [3]:

$$q = \mu_{тр} \cdot \gamma \cdot p, \quad (3)$$

где γ – относительная скорость скольжения трущихся поверхностей, м/с.

Из рассмотренного выше запишем уравнение для нестационарной теплопроводности при движении воздушного потока воздуха, подобный метод был рассмотрен в работах [4,5]:

$$c \cdot \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \gamma \cdot \text{grad} T \right) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T) + Q, \quad (4)$$

где T – температура поверхности тормозного диска, °С; t – время торможения, с;

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала тормозного диска, кг/м³;

λ – матрица теплопроводности; Q – мощность внутренних источников тепловой энергии, Вт; div – дивергенция; grad – градиент.

Приведенные выше расчет позволяет математически оценить эффективность работы перфорированных тормозных дисков в процессе торможения.

Перфорация тормозного диска позволяет в большей степени выводить продукты износа из пары трения тормозной диск-колодка. Кроме того, благодаря перфорационным отверстиям повышается площадь теплоотвода тормозного диска, перераспределяются воздушные потоки в вентиляционном аппарате, создается в большей степени турбулентное течение воздушного потока [6, 7].

Результаты исследования

Для исследования эффективности работы перфорированных тормозных дисков, был проведен ряд экспериментов на лабораторной установке, представленной на рисунке 1. Подробное описание было рассмотрено в работе [8].



Рис. 1. Стенд для испытания теплоотвода тормозных дисков

С помощью данного стенда удалось сравнить эффективность работы вентиляционного аппарата двух типов тормозных дисков, с перфорацией и без (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Образцы исследуемых тормозных дисков: а – стандартный вентилируемый диск; б – перфорированный вентилируемый диск

Методика проведения испытаний

Были проведены опытные исследования на трех разных дисках: сплошной тормозной диск; перфорированный тормозной диск с отверстиями диаметром 5 мм (перфорированный диск №1); перфорированный тормозной диск с отверстиями диаметром 8 мм (перфорированный диск №2). Для оценки эффективности работы были проведены испытания для углов обдува встречного потока воздуха в градусах от 0 до 25. Нагрев тормозных дисков осуществлялся до 300°C.

В ходе проведения исследования были произведены замеры температур (t_{Π} – температура рабочей поверхности диска, t_{BA} – температура вентиляционного аппарата) на определенных режимах с помощью тепловизора RGK TL-80.

Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты испытаний

Угол обдува тормозного диска, α град.	Сплошной тормозной диск		Перфорированный тормозной диск №1		Перфорированный тормозной диск №2	
	$t_{\Pi}, ^\circ\text{C}$	$t_{BA}, ^\circ\text{C}$	$t_{\Pi}, ^\circ\text{C}$	$t_{BA}, ^\circ\text{C}$	$t_{\Pi}, ^\circ\text{C}$	$t_{BA}, ^\circ\text{C}$
0	300	180	300	175	300	171
5	296	175	290	169	285	165
10	292	172	283	164	277	159
15	290	171	277	160	270	154
20	288	170	271	157	266	151
25	287	170	269	156	265	150

Для наглядности полученных данных были построены графические зависимости проведенных испытаний (рис. 3, 4).

Из полученных данных, представленных на рисунках 3,4 можно сделать вывод, что перфорация тормозных дисков в значительной степени влияет на отвод тепловой энергии от тела тормозного диска, который в свою очередь в значительной степени влияет на коэффициент трения, на тормозной момент и на безопасность движения в целом. При этом можно заметить закономерность, чем больше перфорационные отверстия на тормозном диске, тем теплоотвод будет осуществляться лучше [9]. Была замечена положительная тенденция эффективности теплоотвода с увеличением угла обдува тормозного диска. Несмотря на это есть и существенный недостаток данного улучшения конструкции тормозного диска, а именно охрупчивание. Перфорационные отверстия создают концентраторы напряжения для рабочей поверхности тормозного диска [10]. Так, например, при попадании сильно нагретого тормозного диска в вода (по проезду транспортного

средства через глубокую лужу) может привести со временем к образованию микротрещин на рабочей поверхности тормозного диска около перфорационных отверстий.

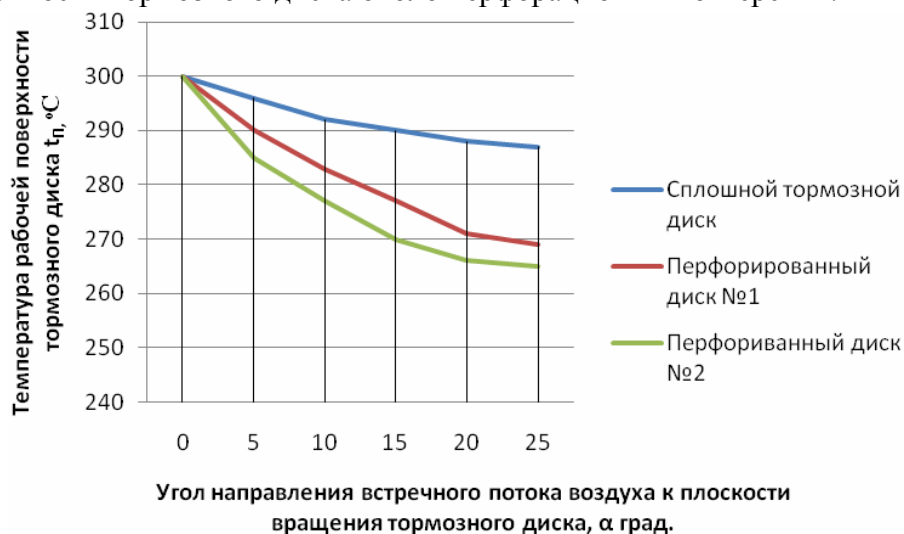


Рис. 3. График изменения температуры рабочей поверхности тормозного диска различных по конструкции тормозных дисков

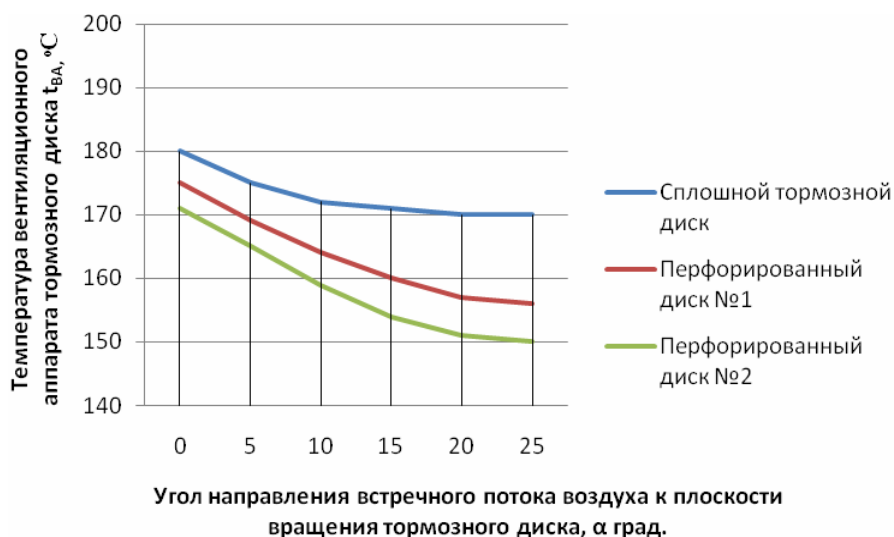


Рис. 4. График изменения температуры вентиляционного аппарата тормозного диска различных по конструкции тормозных дисков

Для оценки данной проблемы были проведены испытания нагревом до 300°C и резким охлаждением тормозного диска. Производился местный нагрев части тормозного диска и резкое охлаждение водой. После многочисленных испытаний было обнаружено наличие цвета побежалости и образование трещин (рис. 6) в области перфорационных отверстий. Цвета побежалости характеризуются изменением прочностных и износостойких параметров металла тормозного диска.

Это свидетельствует о том, что монолитная конструкция ТД имеет большую прочность и устойчивость к перепаду температур, чем перфорированный ТД. Диски с перфорацией имеют меньший температурный диапазон, чем обычные, но более хрупкие.



Рис. 6. Перегретый тормозной диск с микротрещинами

Выводы

Перфорация тормозных дисков в значительной степени влияет на эффективность теплоотвода, особенно от количества и размером перфорационных отверстий. Так например, при угле обдува 25 градусов и диаметре перфорационных отверстий 8 мм наблюдается падение температуры вентиляционного аппарата и рабочей поверхности поверхности примерно на 20°C, что примерно составляет в среднем около 10%. Дальнейшее увеличение угла обдува особо не приносит повышение эффективности теплоотвода от тормозного диска. Однако, перфорационные отверстия приводят к охрупчиванию тела тормозного диска и могут привести к выходу из строя тормозных дисков в результате перегрева. Поэтому для эффективного использования необходимо прибегать при конструировании к эксплуатационным испытаниям.

Список литературы

1. Поляков П.А., Федотов Е.С., Полякова Е.А., Тагиев Р.С., Москаленко М.Б. Оценка эффективности системы охлаждения вентилируемых дисковых тормозных механизмов // *Фундаментальные основы механики*. – 2020. – №5. – С. 40-45. – DOI 10.26160/2542-0127-2020-5-40-45.
2. Вольченко Н.А., Поляков П.А., Полякова Е.А., Федотов Е.С. Исследование конструкции системы охлаждения фрикционных узлов тормозных механизмов // *Механика, оборудование, материалы и технологии: Сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет"*, Краснодар, 29-30 марта 2018 года. – Краснодар: ООО «ПринтТерра», 2018. – С. 147-160.
3. Войтенко В.А. Новый принцип построения фрикционных узлов // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении*. – 2021. – №3(36). – С. 102-117.
4. Indira R., Bharatish A. Optimization of ventilated brake disc rotor geometry for enhanced structural characteristics // *Journal of Measurements in Engineering*. 2020, vol. 8, pp. 98-106. DOI: 10.21595/jme.2020.21399.
5. Pasqual G., Malcher L. Thermal Analysis of Brake Discs for Baja SAE Vehicle // *18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (16-20 November, 2020)*. DOI: 10.26678/ABCM.ENCIT2020.CIT20-0644.
6. Левин Л.Ю., Семин М.А., Ключин Ю.А., Киряков А.С. Обоснование скорости движения воздуха в вентиляционных каналах // *Горный журнал*. – 2016. – №3. – С. 68-72. – DOI: 10.17580/gzh.2016.03.14.
7. Войтенко В.А. Перспективные конструкции дисковых тормозов для подвижного состава железных дорог // *Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23-26 апреля 2019 года*. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – С. 257-260.
8. Яицков И.А., Федотов Е.С., Стародуб М.В., Власко А.А., Кузнецов В.А. Влияние направление воздушного потока воздуха на эффективность работы вентиляционного аппарата тормозного диска // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. – 2022. – №15. – С. 99-103. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-99-103.
9. Сметанин С.А., Войтенко В.А., Склифус Я.К. Анализ температурных полей в системе «тормозной диск – тормозная колодка» для различных кинематических схем дисковых тормозных блоков высокоскоростных поездов // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2019. – № 3(75). – С. 45-55.
10. Momani W. Brake disc static simulation // *International Journal of Applied Engineering Research and Development*. 2018, vol. 8, no. 2, pp. 23-30. DOI: 10.24247/ijaerddec20183.

References

1. Polyakov P.A., Fedotov E.S., Polyakova E.A., Tagiev R.S., Moskalenko M.B. Evaluation of the efficiency of the cooling system of ventilated disc brakes // *Fundamental fundamentals of Mechanics*. 2020, no. 5, pp. 40-45. DOI 10.26160/2542-0127-2020-5-40-45.
2. Volchenko N.A., Polyakov P.A., Polyakova E.A., Fedotov E.S. Investigation of the design of the cooling system of friction units of braking mechanisms // *Mechanics, equipment, materials and technologies: Collection of scientific articles based on the materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the Federal State Educational Institution of Higher Education Kuban State Technological University, Krasnodar, March 29-30, 2018*. – Krasnodar: PrintTerra LLC, 2018. – P. 147-160.
3. Voitenko V.A. A new principle of construction of friction units // *Resource-saving technologies of production and pressure treatment of materials in mechanical engineering*. 2021, no. 3(36), pp. 102-117.
4. Indira R., Bharatish A. Optimization of ventilated brake disc rotor geometry for enhanced structural characteristics // *Journal of Measurements in Engineering*. 2020, vol. 8, pp. 98-106. DOI: 10.21595/jme.2020.21399.
5. Pasqual G., Malcher L. Thermal Analysis of Brake Discs for Baja SAE Vehicle // *18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (16-20 November, 2020)*. DOI: 10.26678/ABCM.ENCIT2020.CIT20-0644.
6. Levin L.Yu., Semin M.A., Klyukin Yu.A., Kiryakov A.S. Justification of the air velocity in ventilation ducts // *Mining Journal*. 2016, no. 3, pp. 68-72. DOI: 10.17580/gzh.2016.03.14.

7. Voitenko V.A. Perspective designs of disc brakes for rolling stock of railways // Transport: science, education, production: collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 23-26, 2019. – Rostov-on-Don: Rostov State University of Railway Transport, 2019. – P. 257-260.
8. Yaitkov I.A., Fedotov E.S., Starodub M.V., Vlasko A.A., Kuznetsov V.A. The influence of the direction of the air flow of air on the efficiency of the ventilation apparatus of the brake disc // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022, no. 15, pp. 99-103. DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-99-103.
9. Smetanin S.A., Voitenko V.A., Sklifus Ya.K. Analysis of temperature fields in the "brake disc - brake pad" system for various kinematic schemes of disc brake blocks of high-speed trains // Bulletin of the Rostov State University of Railway Transport. 2019, no. 3(75), pp. 45-55.
10. Momani W. Brake disc static simulation // International Journal of Applied Engineering Research and Development. 2018, vol. 8, no. 2, pp. 23-30. DOI: 10.24247/ijaerddec20183.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Федотов Евгений Сергеевич – старший преподаватель	Fedotov Evgeny Sergeevich – senior lecturer
avtoru2009@mail.ru	

Получена 30.09.2022