

И. А. Яицков, Е. С. Федотов, А. А. Назаретов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОТВОДА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОРМОЗНОГО ДИСКА ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО АППАРАТА

Аннотация. Современная концепция разработки тормозных дисков предусматривает две основные задачи: простота изготовления и эффективность работы при минимальных экономических затратах. Как правило, обе эти задачи несовместимы и имеют разные цели. Принцип работы у всех вентиляционных аппаратов тормозных дисков одинаков – теплоотвод путем прохождения охлажденного воздуха через каналы. Однако эффективность данного физического процесса разная в зависимости от конструкции диска. Рассмотрено влияние угла раскрытия вентиляционных каналов диффузорного типа на эффективность работы вентиляционного аппарата тормозного диска. Представлена сравнительная характеристика различных, наиболее часто встречающихся конструкций вентиляционного аппарата, предложен новый метод решения поставленных задач.

Ключевые слова: тормозной диск, вентиляционный аппарат, воздушный поток, теплоотвод, эффективность.

Для цитирования: Яицков, И. А. Эффективность теплоотвода поверхностей тормозного диска тормозной системы подвижного состава при различных режимах работы вентиляционного аппарата / И. А. Яицков, Е. С. Федотов, А. А. Назаретов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 219–224. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_219.

Любые теплообменные процессы, как правило, характеризуются тремя различными методами, имеющими свои параметры эффективности. Так, например, на рис. 1 представлены схемы интенсификации теплообменных процессов для сплошного и вентилируемого тормозных дисков. Любое нагретое тело, находящееся в атмосфере, способно передавать тепловую энергию тремя возможными способами: теплопередачей, конвекцией, излучением. Конвекция наиболее эффективна в жидкостях и газах и является наиболее распространенным способом передачи тепла в этих средах, менее эффективным способом является излучение, которое на практике не учитывается.

На рис. 1 представлена схема оттока теплового потока с рабочей поверхности тормозного диска. При этом можно наблюдать значительную эффективность работы вентиляционного аппарата тормозного вентилируемого диска [1–2].

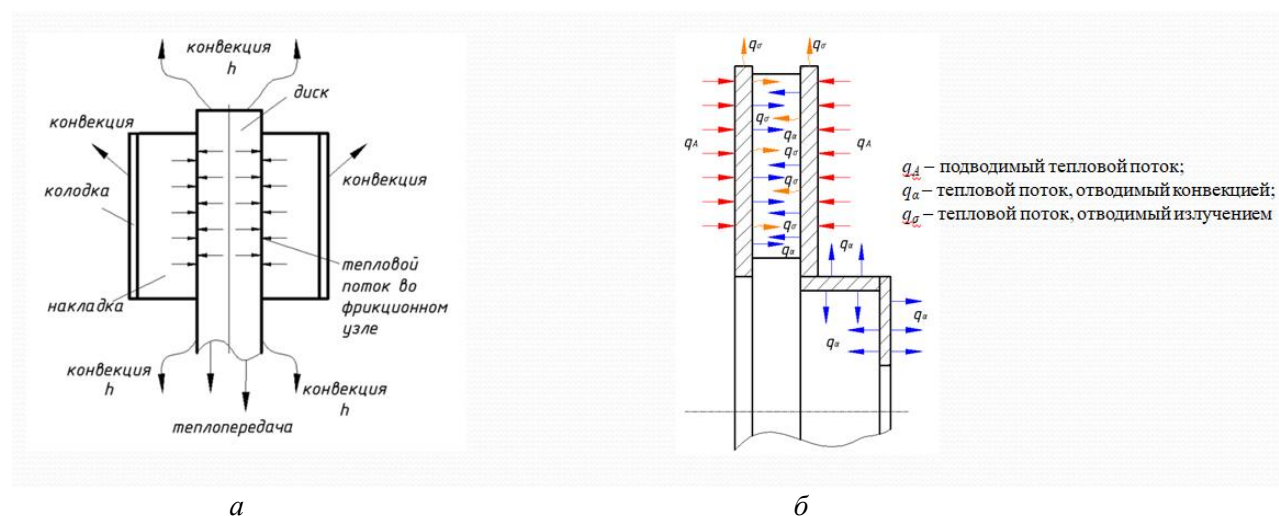


Рис. 1. Интенсификация конвективного теплообмена для тормозных дисков:
а – сплошного; б – вентилируемого

Количество теплоты, передаваемое в единицу времени от горячей поверхности тормозного диска в окружающий воздух, пропорционально разности температур и площади теплопередающей поверхности диска [3]:

$$Q = K \cdot F(t_1 - t_2), \quad (1)$$

где K – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$; F – площадь теплопередающей поверхности диска, м^2 ; t_1, t_2 – температуры диска/окружающей среды, К .

Процесс теплопередачи зависит от многих факторов, определяющих коэффициент теплопередачи. Так, для плоской поверхности тормозного диска K , $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$, равен:

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

где α_1 – коэффициент теплоотдачи нагрева тормозного диска в окружающий воздух, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$; $\delta_1, \delta_{\text{ст}}$ – толщины слоев посторонних отложений на стенках тормозного диска (ржавчина, продукты износа) и самого тормозного диска, м ; $\lambda_1, \lambda_{\text{ст}}$ – теплопроводность отложений на стенках с нагреваемой стороны (окружающий воздух) и тела тормозного диска $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$.

Как известно, при повышении объемной температуры на открытых поверхностях происходит теплообмен с окружающим воздухом путем конвективного теплообмена. Для определения количества теплоты, отводимой от поверхности металлического элемента площадью $F_{\text{об}}^{\text{к}}$, следует воспользоваться законом Ньютона – Рихмана:

$$Q^{\text{к}} = \alpha \cdot (T_{\text{пов}} - T_{\text{эл}}) \cdot F_{\text{об}}^{\text{к}} \cdot d\tau, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$; $T_{\text{пов}}$ – температура рабочей поверхности элемента, К ; $T_{\text{эл}}$ – температура металлического фрикционного элемента, К .

Наиболее часто встречающиеся конструкции вентиляционных аппаратов (ВА) тормозных дисков на транспорте [4] показаны на рис. 2.

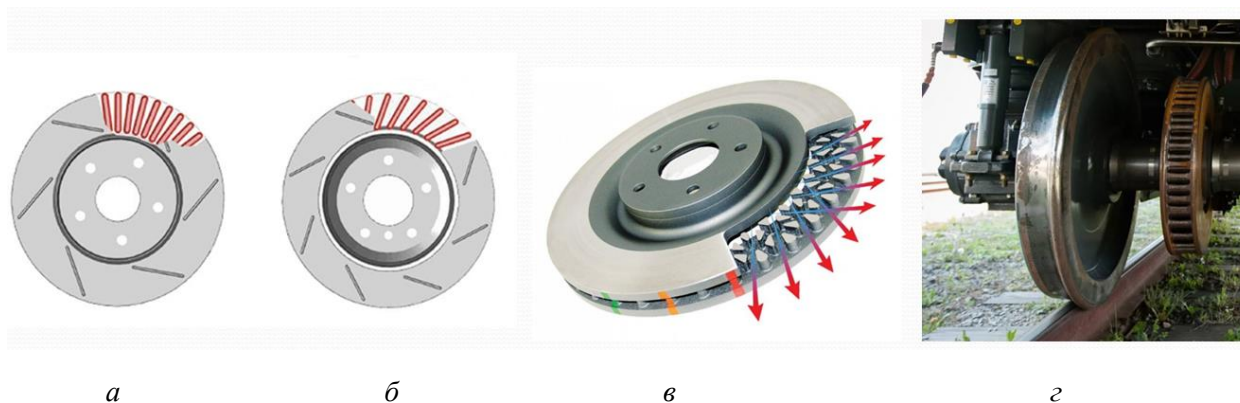


Рис. 2. Вентиляционные каналы различной геометрии:

а – ВА с прямыми радиальными каналами; *б* – ВА с направленными радиальными каналами; *в* – ВА с сегментами типа «лапка кенгуру»; *г* – ВА с каналами типа «шпицы»

Конструктивные особенности приведенных на рис. 2 ВА тормозных дисков можно представить в виде двух основных типов:

- 1) радиальные каналы (прямые, наклонные, криволинейные) – в них применяется увеличение длины канала с целью повышения теплоотдачи тормозного диска;
- 2) сегментальные каналы («лапка кенгуру», «шпицы» и др.) – в них используется эффект разрезания воздушного потока для создания турбулентного режима течения с целью повышения теплоотдачи тормозного диска.

Однако, несмотря на преимущества данных типов ВА, они имеют один существенный недостаток – снижение давления на выходе.

Так, например, на рис. 3 представлена характеристика истечения газа через диффузорный канал (1-й тип), где основополагающим фактором будет непосредственно являться угол раскрытия [5].

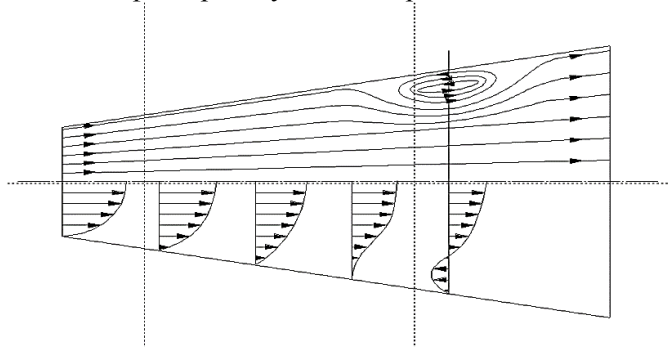


Рис. 3. Распределение скоростей движения воздушного потока в пограничном слое для различных по длине сечениях

С увеличением угла раскрытия диффузорного канала зона возникновения отрыва пограничного слоя смещается ближе к основанию. При этом коэффициент полноты удара фразш в большей степени зависит от угла раскрытия диффузора, величину которого при небольших углах раскрытия $\nu = 0 \dots 40^\circ$ можно рассчитать по эмпирической формуле

$$\text{фразш} \approx 3,2K2[\text{tg}(V\varepsilon/2)]^{1,25}, \quad (4)$$

где $K2$ – коэффициент, характеризующий форму поперечного сечения диффузора; $V\varepsilon$ – эквивалентный угол раскрытия канала в градусах, $^\circ$.

Тогда оптимальный угол можно определить по следующей зависимости:

$$\text{tg} \frac{\nu_{\text{эКВ}}}{2} = \frac{\sqrt{\frac{F_2}{\pi}} - \sqrt{\frac{F_1}{\pi}}}{l}, \quad (5)$$

где l – длина канала, м.

При движении воздушного потока через конический диффузорный канал скорость движения замедляется, и с ростом статического давления, уменьшается динамическое. Основные параметры движения воздушного потока в диффузорном канале представлены на рис. 4.

При выходе воздушного потока в диффузорный канал происходит падение скорости воздушного потока с повышением статического давления, а также с образованием зон отрывного течения и вихревого режима течения.

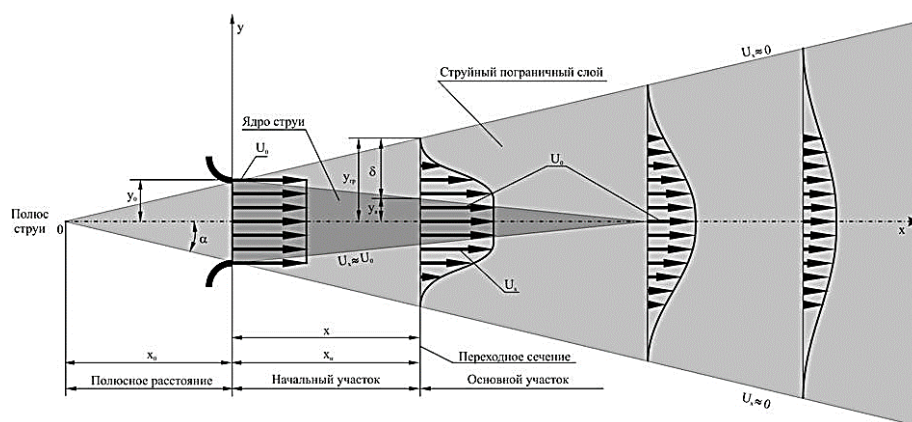


Рис. 4. Параметры движения воздушных потоков в диффузорном канале

Для определения исследуемых зон была разработана физическая модель и протестирована при разных углах раскрытия диффузора (5, 10 и 15 град) путем пропускания через вентиляционный канал искусственного дыма при соблюдении условий создания потока воздуха на входе в канал и бокового

потока воздуха при выходе из канала, имитирующего вращение тормозного диска при движении транспортного средства.

На рис. 5, *а* изображено испытание дымом диффузорного канала с углом раскрытия 5 град. Проанализировав данное изображение, можно прийти к выводу, что данный угол не является оптимальным ввиду быстрого прохождения воздушного потока с ламинарным практически по всей длине течением. В результате образуется низкая теплоотводящая способность тормозных дисков.

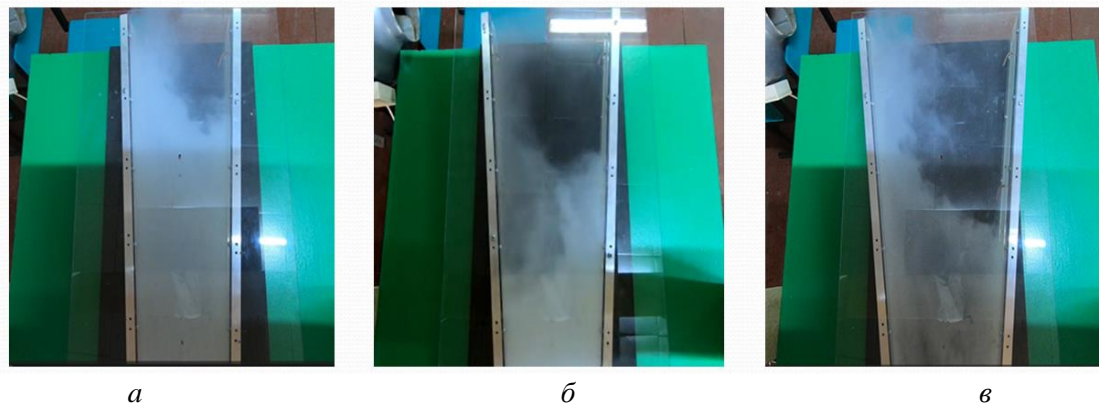


Рис. 5. Исследование различных по углу раскрытия диффузорных каналов искусственным дымом:

- а* – вентиляционный канал с углом раскрытия 5 град;
- б* – вентиляционный канал с углом раскрытия 10 град;
- в* – вентиляционный канал с углом раскрытия 15 град

При большом угле раскрытия 15 град (рис. 5, *в*) возникает следующая ситуация: основной воздушный поток стелится вдоль перегородки, которая, в первую очередь воспринимает обдуваемый встречный поток, тем самым освобождая противоположную перегородку и создавая при этом большую зону разряжения. Данные факты были подтверждены путем замеров эродинамических характеристик. Таким образом, те участки перегородки тормозного диска, где не проходит воздушный поток, остаются перегретой областью.

Наиболее оптимальным углом раскрытия можно считать угол 10 град (рис. 5, *б*). В этом случае воздушный поток также стелится вдоль перегородки, обдуваемой встречным потоком, а с противоположной стороны формируется зона разряжения с вихревым потоком и образованием противотока воздушного потока, создавая тем самым более интенсивное охлаждение перегородки.

Заключение

Основная задача работы ВА заключается в максимальной эффективности теплоотвода от нагретого тормозного диска. Данного эффекта можно достичь за счет создания турбулентного режима течения воздушного потока в ВА. Однако в современных конструкциях тормозных дисков существует негативный аспект, связанный с понижением давления воздушного потока на выходном сечении относительно входного сечения ВА. Это напрямую связано с разностью диаметров рабочей поверхности, а именно внутреннего диаметра относительно наружного. Таким образом, эффективность теплоотвода напрямую зависит от количества и скорости прохождения воздушного потока через ВА. Турбулентный режим течения способствует улучшению конвективного теплообмена, особенно в случае сохранения или повышения динамического давления в вентиляционных каналах.

Список литературы

1 **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) : сборник статей VIII Международной научно-практической конференции,

References

1 **Fedotov, E. S.** Intensification of convective heat transfer of a ventilated brake disc in the presence of thermal resistance / E. S. Fedotov, P. A. Polyakov, M. V. Starodub // Transport. Economy. Social sphere (Current problems and their solutions) : collection of articles of the VIII International scientific and practical conference, Penza, April 23–24, 2021. – Penza : Penza State

Пенза, 23–24 апреля 2021 г. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2021. – С. 133–137. – ISBN 978-5-6045203-8-1.

2 Аналитический метод определения средних температур рабочих поверхностей тормозного диска / И. А. Яицков, П. А. Поляков, Н. А. Задаянчук, В. А. Денисенко // Механика, оборудование, материалы и технологии : IV Международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 г. – Краснодар : ООО «ПринтТерра», 2021. – С. 716–722. – ISBN 978-5-6046216-8-4.

3 **Яицков, И. А.** Отвод тепловой энергии путем теплопроводности элементов конструкции дисковых тормозных механизмов / И. А. Яицков, Е. С. Федотов // Современные проблемы теории машин. – 2021. – № 12. – С. 16–20. – DOI 10.26160/2307-342X-2021-12-16-20.

4 Особенности конструкции различных деталей дисково-колодочных тормозов и эффективность их действия / Е. С. Федотов, П. А. Поляков, Р. С. Тагиев, С. В. Харьков // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сборник статей VI Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 19–20 марта 2020 г. / под общей редакцией В. В. Салмина. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2020. – С. 182–186. – ISBN 978-5-907181-48-9.

5 **Яицков, И. А.** Методика определения аэродинамических характеристик диффузорных вентиляционных каналов тормозных дисков транспортных средств / И. А. Яицков, Е. С. Федотов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 257–263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257.

6 **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева ; М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 3-е изд., репр. – Москва : Изд. Дом «Бастет», 2010. – ISBN 978-5-903178-20-9.

Agrarian University, 2021. – P. 133–137. – ISBN 978-5-6045203-8-1.

2 Analytical method for determining the average temperatures of the working surfaces of the brake disc / I. A. Yaitskov, P. A. Polyakov, N. A. Zadayanchuk, V. A. Denisenko // Mechanics, equipment, materials and technologies : IV International scientific and practical conference, Krasnodar, November 25–26, 2021. – Krasnodar : LLC “PrintTerra”, 2021. – P. 716–722. – ISBN 978-5-6046216-8-4.

3 **Yaitskov, I. A.** Removal of thermal energy by thermal conductivity of the structural elements of disc brakes mechanisms / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov // Modern problems of machine theory. – 2021. – No. 12. – P. 16–20. – DOI 10.26160/2307-342X-2021-12-16-20.

4 Design features of various components of disc brakes and their effectiveness / E. S. Fedotov, P. A. Polyakov, R. S. Tagiev, S. V. Kharkov // Innovations of technical solutions in machine building and transport : collection of articles of the VI All-Russian scientific and technical Conference for young scientists and students with international participation, Penza, March 19-20, 2020 / Under the general editorship of V. V. Salmin. Penza : Penza State Agricultural University, 2020. – P. 182–186. – ISBN 978-5-907181-48-9.

5 **Yaitskov, I. A.** Methodology for determining the aerodynamic characteristics of diffuser ventilation ducts of brake discs of vehicles / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No 1. – P. 257–263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257.

6 **Mikheev, M. A.** Fundamentals of heat transfer / M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva; M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva. – 3rd ed., repr. – Moscow : Publishing house. House "Bastet", 2010. – ISBN 978-5-903178-20-9.

I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov, A. A. Nazaretov

EFFICIENCY OF HEAT REMOVAL OF THE BRAKE DISC SURFACES OF ROLLING STOCK BRAKING SYSTEM IN VARIOUS OPERATING MODES OF VENTILATION APPARATUS

Abstract. The modern concept of brake disc development provides for two main tasks: ease of manufacture and efficiency of operation with minimal economic costs. As a rule, both of these tasks are incompatible and have different goals. The operating principle of all ventilation devices of brake discs is the same, heat removal by passing cooled air through the channels. However,

the efficiency of this physical process varies depending on the design of the disk. The influence of the opening angle of diffuser-type ventilation channels on the efficiency of the brake disc ventilation device is considered. The study presents a comparative characteristic of various, most common designs of ventilation apparatus, and a new method for solving the tasks is proposed.

Keywords: brake disc, ventilation unit, air flow, heat removal, efficiency.

For citation: Yaitskov, I. A. Efficiency of heat removal of the brake disc surfaces of rolling stock braking system in various operating modes of ventilation apparatus / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov, A. A. Nazaretov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 219–224. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_1_219.

Сведения об авторах

Яицков Иван Анатольевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
декан электромеханического факультета,
e-mail: yia@rgups.ru

Федотов Евгений Сергеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
аспирант,
Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),
кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы»,
старший преподаватель,
e-mail: avtoru2009@mail.ru

Назаретов Андрей Алексеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: aanazaretov@rgups.ru

Information about the authors

Yaitskov Ivan Anatolievich

Rostov State Transport University (RSTU)
Chair “Car and Car Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Dean of the Electromechanical Department,
e-mail: yia@rgups.ru

Fedotov Evgeny Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU)
Postgraduate Student,

Kuban State Technological University (KubSTU),
Chair “Transport Processes and Technological Complexes”,
Senior Lecturer,
e-mail: avtoru2009@mail.ru

Nazaretov Andrey Alekseyevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Car and Car Facilities”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: aanazaretov@rgups.ru