

И. А. Яицков, Е. С. Федотов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФУЗОРНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ КАНАЛОВ ТОРМОЗНЫХ ДИСКОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация. На интенсивность теплоотвода путем конвективного теплообмена от вентилируемых тормозных дисков транспортных средств напрямую влияет количество и время прохождения воздушного потока через вентиляционный аппарат. Чем интенсивнее на входе в вентиляционный аппарат и медленнее на выходе воздушный поток, тем интенсивнее будет проходить охлаждение самого тормозного диска. Замедлить скорость прохождения воздушных потоков можно путем создания искусственных препятствий или путем перехода воздушных потоков из ламинарного в турбулентный режим течения. Методика проведения исследования, предложенная в данной статье, позволит охарактеризовать механизм формирования в вентиляционном канале мест повышенного и пониженного давления и возникновения вихревых потоков при турбулентном протекании воздушного потока.

Ключевые слова: воздушный поток, вентиляционный аппарат, тормозной диск, пограничный слой, датчик давления, зона разрежения, зона повышенного давления, направление движения.

Для цитирования: 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. – С. 257–263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257.

Введение

Современные конструкционные решения изготовления тормозных дисков транспортных средств предусматривают, что тормозные диски, как правило, должны иметь вентиляционный аппарат диффузорного типа (рис. 1). Такая конструкция получила широкое распространение ввиду оптимального соотношения стоимости изготовления и эффективности работы [1]. Рассмотренная ниже методика может быть применима и для исследования вентиляционных аппаратов различных конструкций. Проведение исследований возможно только на реальных физических моделях в увеличенных размерах без учета аэродинамических потерь при различных конструктивных исполнениях.

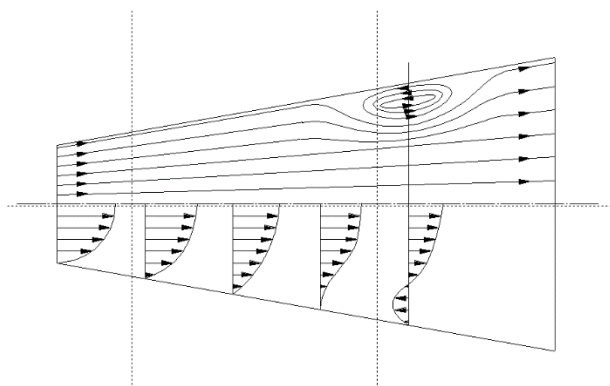


Рис. 1. Распределение скоростей движения воздушного потока в пограничном слое для различных по длине каналов сечений

Объект и методы исследования

При рассмотрении процесса работы вентиляционного аппарата дисково-колодочного тормоза можно обратить внимание, что в большинстве случаев происходит истечение воздуха через диффузорные каналы [2].

В представленном на рис. 1 вентиляционном канале прямоугольного сечения проходное сечение изменяется за счет угла раскрытия боковых стенок. При этом следует учитывать, что при более длительном прохождении отдельно взятого объема воздушного потока через вентиляционный канал в большей степени происходит охлаждение тормозного диска [4, 5].

Принимая во внимание уравнение Бернулли, можно прийти к выводу, что в невязком ядре потока газовых частиц происходит снижение скорости движения в диффузоре, а также повышается давление:

$$\frac{dp}{\rho} + d\left(\frac{c^2}{2}\right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dp}{\rho} = -cdc. \quad (2)$$

Таким образом, можно пояснить, что в ядре потока газовых частиц возникает область повышенного давления за счет снижения кинетической энергии.

При прохождении воздуха через вентиляционный канал происходит преодоление сил сопротивления движению потока воздуха в пограничном слое. Данное явление образуется за счет собственной кинетической энергии и касательного напряжения, возникающего со стороны более быстродвижущихся потоков воздуха, расположенных дальше от стенки [6].

Толщина пограничного слоя в вентиляционных каналах диффузорного типа возрастает с увеличением длины самого канала в отличие от обычного прямолинейного канала. Это вызвано двумя факторами:

- во-первых, прохождение воздуха через вентиляционные каналы обусловлено потерями на трение;
- во-вторых, утолщение пограничного слоя происходит за счет снижения давления и скорости в ядре потока.

С увеличением толщины пограничного слоя неизбежно происходит уменьшение касательного напряжения:

$$\tau = \mu \cdot \frac{\partial c}{\partial n} = \mu \cdot \frac{c}{\delta}. \quad (3)$$

Таким образом, быстро движущиеся частицы теряют способность увлекать за собой частицы, расположенные вблизи стенок диффузора, в результате чего происходит падение скорости движения частиц, градиент скорости по нормали постепенно исчезает $\frac{\partial c}{\partial n} = 0$ и частицы вблизи стенки останав-

ливаются. При дальнейшем движении частиц в ядре потока происходит разряжение в зоне стенки диффузора, в результате чего возникает эффект отрыва пограничного слоя. Отрыв, как правило, приводит к образованию вихрей, а накопленная направленная кинетическая энергия потока частиц приобретает вихревую форму [7]. С увеличением вихревых потоков повышаются и вихревые потери или потери отрыва. Кинетическая энергия потока при переходе в вихревое движение не приводит к увеличению давления потока, так как тормозится силами трения воздушного потока, приводя к повышению температуры. При этом следует учитывать, что повышение температуры потока не влечет за собой повышение давления потока [8].

В диффузорных каналах тормозных дисков потери кинетической энергии на отрыв будут положительно сказываться на эффективности охлаждения тела тормозного диска. При проектировании тормозных дисков для повышения эффективности их действия, как правило, придерживаются следующих решений: чем больше поток проходящего воздуха и чем дольше он задерживается в каналах охлаждения тормозного диска, тем эффективнее получается система охлаждения [9].

Необходимо учитывать особенность течения воздушного потока: чем ближе к основанию диффузора происходит отрыв пограничного слоя, тем больше возникают вихревые потери, пропорциональные кинетической энергии воздушного потока, для того сечения, где происходит возникновение отрыва.

Учитывая условия возникновения отрыва при $\tau = 0$, можно определить, какие факторы влияют на возникновение точки отрыва:

- при ламинарном истечении газа через прямоугольный диффузор профиль скорости имеет менее заполненный вид в отличие от турбулентного режима;
- при развитом истечении газа, как правило, нормальный градиент скорости и касательное напряжение на входе меньше, чем при развитии пограничного слоя в диффузоре;
- изменение эпюры скоростей в пристеночном пространстве происходит постепенно с замедлением скорости воздушного потока.

Если при проектировании стоит задача сохранения ламинарного режима истечения газа, то главными параметрами в нашем случае будут являться скорость истечения газа, длина и угол раскрытия диффузора. Если же речь идет о создании турбулентного режима, то при помощи изменения данных параметров можно добиться желаемого результата.

При значении угла расширения диффузора $\nu \leq 40^\circ$ отрыв воздушного потока от стенок вентиляционного канала начинается не по всему периметру сечения, а в области с наименьшей скоростью воздушного потока в пристеночном слое. С возникновением отрыва на одной стороне диффузорного вентиляционного канала прекращается дальнейшее повышение статического давления вдоль поверхности вентиляционного канала, следовательно, отрыв воздушного потока на противоположной стороне не происходит. Данный эффект обуславливается несимметричным распределением скоростей по сечениям вентиляционного канала при движении воздушного потока.

При малых углах раскрытия диффузорного канала зона с образовавшимся вихревым потоком сносится набегающим потоком воздуха, на освобожденном месте возникает новая вихревая зона и т.д. Для случая симметричного диффузорного канала наблюдается попеременный отрыв воздушного потока от стенок вентиляционного канала, приводящий к значительным колебаниям в целом [10].

Воздушный поток, проходящий через вентиляционный канал, испытывает сопротивление, вызванное разделением потока на входе в канал, потери на трение и потери, связанные с вихреобразованием.

Для более подробного рассмотрения данного процесса авторами предлагается методика исследования аэродинамических характеристик движения воздушного потока в различных по конфигурации вентиляционных каналах тормозных дисков. Первоначальные исследования планируется провести на диффузорных каналах прямоугольной формы.

Авторами предлагается методика определения зон возникновения отрыва от пограничного слоя и направления движения воздушного потока. Методика проведения исследования представлена ниже.

1 *Определение зон повышенного и пониженного давления.* Из рассмотренного ранее материала можно сделать вывод, что при движении воздушного потока в прямоугольном диффузорном канале возникают зоны повышенного и пониженного давления. Данные зоны можно установить путем определения параметров давления воздушного потока в предполагаемых зонах с помощью сверхчувствительных тензометрических датчиков давления. Датчики можно расположить по стенкам физической модели увеличенного масштаба. Пример расположения датчиков представлен на рис. 2.

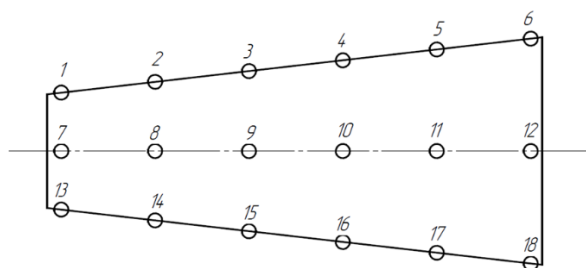


Рис. 2. Места исследования зон повышенного и пониженного давления

На рис. 2 представлены предполагаемые места установки датчиков измерения давления воздушного потока. Так как плоскости основания рабочих поверхностей тормозного диска параллельны, аэродинамические характеристики у них будут практически одинаковы. Следовательно, можно сделать вывод, что для исследования движения воздушного потока достаточно снять параметры с одной плоскости, а именно с датчиков 7–12 (см. рис. 2).

При данном методе исследования можно применить датчики, подобные тем, которые представлены на рис. 3.



Рис. 3. Датчик давления

Представленный на рис. 3 датчик имеет по своей конфигурации сенсор, способный определять давление (избыточное/отрицательное) при подключении его посредством гибкой или жесткой трубки должного диаметра (с обеспечением герметичного соединения) к требуемой области исследования. Выходной сигнал с датчика можно оцифровать любым контроллером, поддерживающим протокол обмена I2C.

Учитывая функциональную возможность подобных датчиков, можно исследовать области с повышенным и пониженным давлением практически в любых местах вентиляционного канала. С учетом представленного на рис. 4 варианта подключения датчика возможны следующие результаты:

- если в приемной трубе датчика будет находиться область избыточного давления, то датчик определит избыточное давление;
- если в приемной трубе датчика будет находиться область отрицательного давления, то датчик определит отрицательное давление;
- если в поперечном направлении относительно приемной трубы датчика будет проходить воздушный поток, то датчик определит отрицательное давление, ввиду подхвата и уноса воздушных масс, находящихся в приемной трубе.

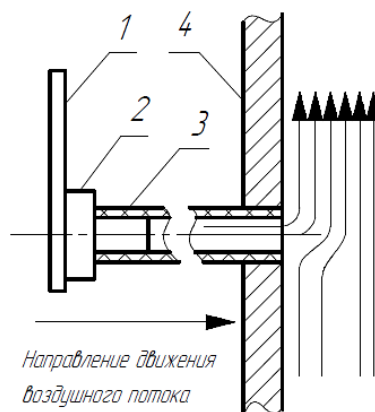


Рис. 4. Конструктивное исполнение варианта № 1 установки датчика давления:

- 1 – датчик давления; 2 – сенсор датчика давления; 3 – подводящий трубопровод;
4 – стенка вентиляционного канала

Для уточнения зон можно прибегнуть к методу определения направления движения воздушных потоков, описанных ниже.

2 Определение направлений движения воздушных потоков. При движении воздушных масс, не имеющих зон разрежения и избыточного давления, сложно определить направление по давлению в данной зоне. Однако, если расположить приемную трубку сенсора по направлению движения воздушных потоков, можно определить направленность их движения:

- если воздушный поток будет двигаться навстречу приемной трубе сенсора (рис. 5, а), тогда можно обнаружить сигнал датчика, соответствующий избыточному давлению;
- если воздушный поток будет двигаться в обратном направлении приемной трубы сенсора (рис. 5, б), тогда можно обнаружить сигнал датчика, соответствующий отрицательному давлению, ввиду подхвата и уноса воздушных масс, находящихся в приемной трубе.

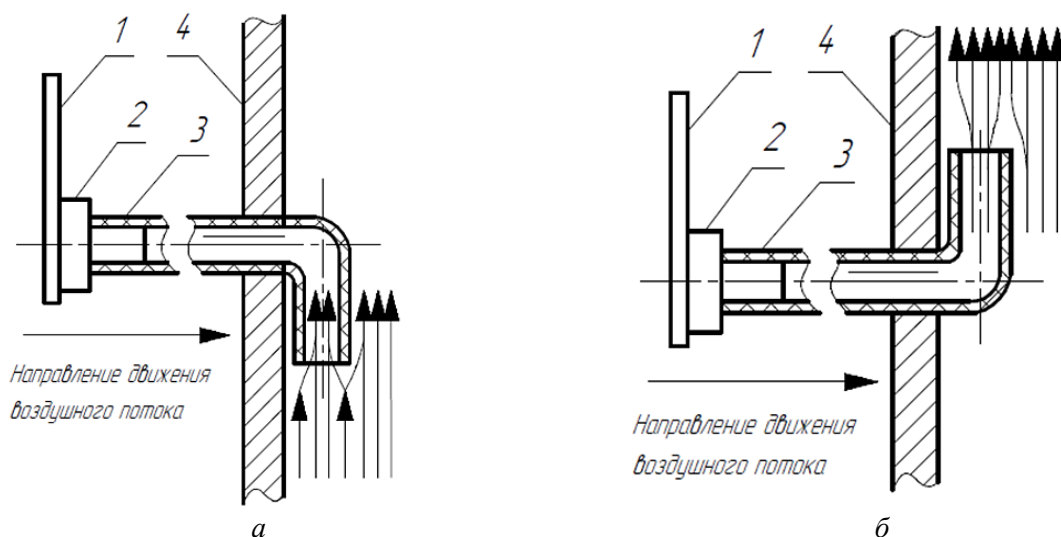


Рис. 5. Конструктивное исполнение варианта № 2 установки датчика давления:
а – встречное направление; *б* – попутное; 1 – датчик давления; 2 – сенсор датчика давления;
 3 – подводящий трубопровод; 4 – стенка вентиляционного канала

Выводы

Рассмотренная методика проведения исследования может найти применение при изучении характеристик различных по конструкции вентиляционных аппаратов. Наиболее важными условиями, способствующими минимизации погрешностей измерений, будут являться размеры физической модели и скорость воздушного потока. Представленные конструктивные решения установки датчиков – вариант № 1 и вариант № 2 – помогут определить зоны повышенного и пониженного давления, а также направления движения воздушного потока. Таким образом, предложенная методика способна определить момент возникновения турбулентного истечения воздушного потока и количество вихревых зон вдоль стенок вентиляционного канала.

Список литературы

- 1 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 года / под общей редакцией В. В. Салмина. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2020. – С. 182–186.
- 2 Разработка методики оценки системы охлаждения тормозных дисков / А. Е. Литвинов, П. А. Поляков, Е. А. Полякова [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23. – № 1. – С. 14–22. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-1-14-22.
- 3 **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) : сборник статей

Reference

- 1 Design features of various parts of disc brakes and the effectiveness of their action / E. S. Fedotov, P. A. Polyakov, R. S. Tagiev, S. V. Kharkiv // Innovations of technical solutions in mechanical engineering and transport: collection of articles of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference for young scientists and students with international participation, Penza, 19–20 March 2020 / Under the general editorship of V. V. Salmin. – Penza : Penza State Agrarian University, 2020. – P. 182–186.
- 2 Development of a methodology for evaluating the cooling system of brake discs / A. E. Litvinov, P. A. Polyakov, E. A. Polyakova [et al.] // Bulletin of M.T. Kalashnikov IzhSTU. – 2020. – Vol. 23. – No. 1. – P. 14–22. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-1-14-22.
- 3 **Fedotov, E. S.** Intensification of convective heat exchange when changing the air flow velocity in a ventilated brake disc / E. S. Fedotov, P. A. Polyakov, M. V. Starodub // Transport. Economy. Social sphere (Actual problems and their solutions) : collection of articles of the VIII International Scientific and Practical Conference, Penza, April 23–24,

- VIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 23–24 апреля 2021 года. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2021. – С. 137–140.
- 4 **Ерофеев, А. И.** Медленные течения газа при сильной теплопередаче / А. И. Ерофеев, О. Г. Фридлендер // Вестник нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4–3. – С. 768–770.
- 5 **Atkins, M.** Flow behavior in radial vane brake rotors at low rotational speeds / M. Atkins, F. Kienhofer // Journal of Fluids Engineering. – 2019. – No. 141(8). – 49 p. – DOI 10.1115/1.4042470.
- 6 **Panelli, M.** Thermal fluid dynamics analysis of vented brake disc rotor with ribs turbulators / M. Panelli // International conference «Thermal and Environmental Issues in Energy Systems», ASME-UIT-ATI (Sorrento, Italy, 10 may 2010). – DOI 10.13140/2.1.3525.7122.
- 7 **Пиралишвили, Ш. А.** Вихревой эффект. Теория, эксперимент, численное моделирование / Ш. А. Пиралишвили // Сборник научных трудов SWORLD. – 2013. – № 3. – С. 79–99.
- 8 Интенсификация теплопередачи в пластинчатом теплообменнике за счет пульсации потока теплоносителя / С. Ф. Кудашев, О. В. Кудашева, О. В. Душутина, Р. Р. Равилов // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 10–2. – С. 262–267.
- 9 **Parish, D.** Automotive ventilated brake rotor aerodynamic investigation : MSc Thesis, School of Engineering / D. Parish. – 2003. – 108 p.
- 10 **Johnson, D. A.** Analysis of flow through a vented automotive brake rotor / D. A. Johnson, B. A. Sperandei, R. Gilbert // Journal of Fluids Engg. – 2014. – Vol. 125. – P. 979–986.
2021. – Penza : Penza State Agrarian University, 2021. – P. 137–140.
- 4 **Erofeev, A. I.** Slow gas flows with strong heat transfer / A. I. Erofeev, O. G. Friedlander // Bulletin of Nizhny Novgorod University named after N. I. Lobachevsky. – 2011. – No. 4–3. – P. 768–770.
- 5 **Atkins, M.** Flow behavior in radial vane brake rotors at low rotational speeds / M. Atkins, F. Kienhofer // Journal of Fluids Engineering. – 2019. – No. 141(8). – 49 p. – DOI 10.1115/1.4042470.
- 6 **Panelli, M.** Thermal fluid dynamics analysis of vented brake disc rotor with ribs turbulators / M. Panelli // International conference «Thermal and Environmental Issues in Energy Systems», ASME-UIT-ATI (Sorrento, Italy, 10 may 2010). – DOI 10.13140/2.1.3525.7122.
- 7 **Piralishvili, S. A.** Vortex effect. Theory, experiment, numerical modeling / S. A. Piralishvili // Collection of scientific papers SWORLD. – 2013. – No. 3. – P. 79–99.
- 8 Intensification of heat transfer in a plate heat exchanger due to pulsation of the coolant flow / S. F. Kudashev, O. V. Kudasheva, O. V. Dushutina, R. R. Ravilov // Modern high-tech technologies. – 2019. – No. 10–2. P. 262–267.
- 9 **Parish, D.** Automotive ventilated brake rotor aerodynamic investigation: MSc Thesis, School of Engineering / D. Parish. – 2003. – 108 p.
- 10 **Johnson, D. A.** Analysis of flow through a vented automotive brake rotor / D. A. Johnson, B. A. Sperandei, R. Gilbert // Journal of Fluids Engg. – 2014. – Vol. 125. – P. 979–986.

I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov

METHOD FOR DETERMINING AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF DIFFUSER VENTILATION CHANNELS OF BRAKE DISCS OF VEHICLES

Abstract. The intensity of heat removal by convective heat transfer from ventilated brake discs of wheeled vehicles is directly affected by the amount and passage time of the air flow through the ventilation apparatus. The more intense the air flow at the inlet and slower at the outlet to the ventilation unit, the more intensively the cooling of the brake disc will take place. It is possible to slow down the speed of air wind passage by creating artificial obstacles or by switching from laminar to turbulent flow regime. The research methodology proposed in this paper is able to characterize the mechanism of places` formation of high and low pressure in the ventilation duct and the occurrence of vortex flows during the turbulent flow of the air flow.

Keywords: air flow, ventilation apparatus, brake disc, boundary layer, pressure sensor, rarefaction zone, high pressure zone, direction of movement.

For citation: Yaitskov, I. A. Method for determining aerodynamic characteristics of diffuser ventilation channels 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.

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

Information about the authors**Yaitskov Ivan Anatolievich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Car and Car Facilities»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Dean of Electromechanical Faculty,
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