

## АНАЛИЗ ВЫБРОСОВ ОТ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ АВТОМОБИЛЕЙ

*Яицков И.А.<sup>1</sup>, Поляков П.А.<sup>1</sup>, Касумян К.А.<sup>2</sup>, Гончарова Н.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону;*

<sup>2</sup>*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар*

**Ключевые слова:** выбросы, тормозной диск, суппорт, аэрозоли, трибоконтакт, рабочие поверхности.

**Аннотация.** Проанализированы выбросы от колесных тормозных механизмов различного типа. Сформулированы основные критерии оценки частиц выбросов от колесных тормозных механизмов. Сформулированы задачи для дальнейших исследований по результатам литературного обзора статей, посвященных данной тематике.

## ANALYSIS OF EMISSIONS FROM CAR BRAKES

*Yaitskov I.A.<sup>1</sup>, Polyakov P.A.<sup>1</sup>, Kasumyan K.A.<sup>2</sup>, Goncharova N.A.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Rostov State University of Railway Transport, Rostov-on-Don;*

<sup>2</sup>*Kuban State Technological University, Krasnodar*

**Keywords:** emissions, brake disc, caliper, aerosols, tribocontact, working surfaces.

**Abstract.** Emissions from wheel braking mechanisms of various types are analyzed. The main criteria for estimating emissions particles from wheel brakes are formulated. The tasks for further research on the results of a literary review of articles devoted to this topic are formulated.

На современных легковых автомобилях можно использовать два разных типа тормозных механизмов [1]: дисковые тормозные системы или барабанные тормозные системы. Система дискового тормоза состоит из трех основных частей: суппорта, колодок и ротора. Существует два основных семейства суппортов: фиксированные и скользящие. Последний отличается наличием одного активного поршня и скользящей пассивной частью (рис. 1а). Фиксированный суппорт (рис. 1б) состоит из жесткого корпуса, в котором от двух до восьми поршней равномерно распределены по обеим сторонам суппорта. Когда тормозная жидкость проходит через суппорт, она в конечном итоге давит на поршни, где давление жидкости преобразуется в силу, действующую на колодки. Эта сила зависит от конструкции суппорта и, в частности, от соотношения между поршнями и колодками. Колодки состоят из: железной задней пластины в качестве твердой основы для контакта поршня, которая может быть оснащена прокладкой из тонкого металлического листа для снижения шума; нижний слой, в основном отвечающий за теплоизоляцию и отсыпку, который представляет собой смесь органических материалов; фрикционный материал, изготовленный примерно из двадцати различных материалов и точно настроенный для получения желаемого коэффициента трения.

Тормозные колодки действуют непосредственно на вращающуюся часть системы: тормозной диск. Он соединен с осью колеса, таким образом, имея ту же скорость вращения, посредством жесткого соединения через центральную часть тормозного диска.

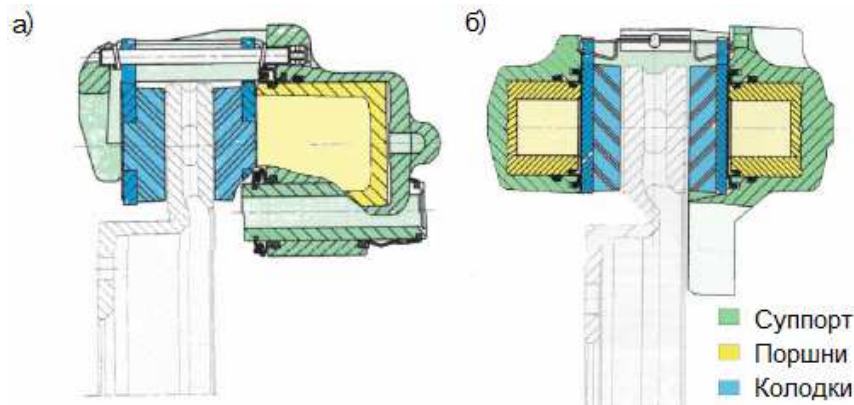


Рис. 1. Поперечное сечение скользящего (а) и неподвижного (б) суппорта

Затем ступичная часть диска соединяется с тормозными поверхностями различными способами, которые также являются типичными особенностями различных семейств тормозных дисков: когда весь тормозной диск представляет собой уникальную отлитую часть из того же материала, он называется цельным; когда тормозная поверхность и материал центральной части различаются, но соединение происходит в процессе литья, это называется литым тормозным диском; когда соединение осуществляется болтами или заклепками, он называется составным тормозным диском. Кроме того, тормозные поверхности могут быть цельными или иметь вентиляционные каналы для улучшения теплообмена с окружающим воздухом. В последнем случае ротор называется вентилируемым. Наиболее распространенным материалом тормозного диска является серый чугун, который обладает хорошей теплопроводностью, механической прочностью и демпфирующей способностью (до 100 раз больше, чем у железа, и в 800 раз больше, чем у алюминия) [2]. Кроме того, это очень дешевый и простой в литье материал. Эти особенности означают, что чугун доминирует на рынке тормозных дисков, несмотря на его значительный вес. Карбон – керамические дисковые тормоза также доступны на рынке. Однако, несмотря на то, что их вес составляет треть от чугунных и производительность выше, их стоимость непомерно высока для большинства потребителей.

Переносимые по воздуху твердые частицы, также называемые аэрозолями, в простейшей форме определяются как совокупность твердых или жидких частиц, взвешенных в газе. Эти частицы обычно стабильны в течение переменного периода времени от нескольких секунд до лет.

Можно различать первичные и вторичные аэрозоли в зависимости от того, вводятся ли частицы непосредственно в атмосферу или образуются в атмосфере в результате химической реакции газообразных компонентов, также известных как газы-предшественники. Среди них наиболее важными являются  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$  и VOCs (летучие органические соединения).

Кроме того, они могут быть монодисперсными или полидисперсными в зависимости от того, является ли размер частиц уникальным для всего аэрозоля или сосуществуют разные размеры. Первые обычно создаются искусственно для калибровки прибора для измерения частиц. В данной выпускной квалификационной работе рассмотрим первичные полидисперсные аэрозоли,

поскольку частицы износа тормозов попадают непосредственно в воздух и охватывают широкий диапазон размеров.

Для характеристики частиц наиболее важным параметром является размер частиц. Однако, поскольку частицы имеют разные формы, которые также могут существенно отличаться от сфер, их редко можно охарактеризовать реальным диаметром. Поэтому эквивалентные диаметры были определены как диаметр сферы, которая имеет то же значение определенного физического свойства, что и диаметр частицы неправильной формы. В данной выпускной квалификационной работе будут рассмотрены следующие эквивалентные диаметры.

– *Аэродинамический диаметр*: определяется как диаметр сферической частицы с плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$  и такая же скорость оседания, как и у рассматриваемой частицы.

– *Скорость оседания* – это скорость, которую достигает частица под действием гравитационных сил, когда последние силы находятся в равновесии с силами сопротивления. Для получения дополнительных сведений о том, как рассчитать скорость оседания, рекомендуется соответствующая литература.

– *Диаметр подвижности*: он определяется как диаметр сферической частицы, которая имеет такую же подвижность, определяемую как скорость частицы, создаваемая единичной внешней силой, что и рассматриваемая частица.

– *Оптический диаметр* – это диаметр сферической частицы, которая имеет аналогичные оптические свойства с рассматриваемой частицей; это измеряется оптическим счетчиком частиц.

Частицы могут быть классифицированы по-разному в зависимости от их диаметра. Наиболее распространенный метод, обычно используемый в нормативных документах и руководящих принципах – это классификация частиц по их аэродинамическому диаметру:

- PM10: обозначает все частицы диаметром менее 10 мкм;
- PM2,5: обозначает все частицы диаметром менее 2,5 мкм;
- PM0.1: обозначает все частицы диаметром менее 0,1 мкм.

Наиболее часто упоминаемые классы в нормативных документах (PM10 и PM2,5): проиллюстрировано на рис. 2.

Эта методика удобна тем, что аэродинамический диаметр связан с переносом и удалением частиц из воздуха, а также их отложением в дыхательной системе.

Еще один широко распространенный метод определения размеров частиц, особенно в научной литературе, заключается в их группировке по следующим фракциям:

- *крупная фракция*: для частиц диаметром  $10 \mu\text{m} < d_p \leq 2,5 \mu\text{m}$ ;
- *мелкая фракция*: для частиц диаметром  $2,5 \mu\text{m} < d_p \leq 0,1 \mu\text{m}$ ;
- *ультратонкая фракция*: для частиц диаметром  $d_p < 0,1 \mu\text{m}$ .

При оценке взвешенных в воздухе твердых частиц другим важным фактором является концентрация частиц. Для измерения концентрации используются два стандартных метода: по массе и по количеству.

Массовая концентрация определяется путем измерения массы твердых частиц в единице объема аэрозоля.



Рис. 2. Сравнение размеров твердых частиц

С другой стороны, числовая концентрация – это количество частиц на единицу аэрозоля, обычно выражаемое в  $\text{п}/\text{см}^3$ .

При исследовании полидисперсных аэрозолей гранулометрический состав также является параметром, который следует учитывать. Это представляет собой проявление определенного свойства аэрозоля (количество, масса и т.д.) В интересующем диапазоне размеров частиц. Поскольку это сильно зависит от конструкции измерительного прибора и, в частности, от его разрешения, обычной практикой является нормализация исследуемого параметра по каждому поддиапазону размеров. Это позволяет сравнивать распределения по размерам, полученные с помощью различных инструментов.

Небольшая часть сообщества специалистов по тормозным системам занимается оценкой выбросов от тормозов более 20 лет. Поскольку в прошлом выбросы выхлопных газов были более важными, чем «не выхлопные», попытки исследовать последнюю тему не предпринимались. Со временем другие исследования [3, 4] помогли углубить знания по этой теме из-за растущего интереса к выбросам тормозов. Это особенно связано с вышеупомянутыми улучшениями в выхлопных газах. Однако, поскольку не было необходимости в нормативных актах, большинство научных исследований состояло из наблюдательных исследований, сосредоточенных на характеристике типичного распределения частиц по размерам с целью оценки вредности различных пар тормозной системы.

Кроме того, промышленность всегда больше интересовалась явлениями тормозного контакта, чтобы уменьшить износ и лучше регулировать коэффициент трения, чем экологическими аспектами. Это побудило научное сообщество сосредоточиться на том, как условия контакта влияют на характеристики, начав моделировать контактное давление между колодками и тормозным диском [5], и ввести процедуры моделирования для прогнозирования характеристик коэффициента трения [6].

Тем не менее, некоторые исследователи пытались лучше объяснить явления, происходящие на границе раздела колодки с тормозным диском, моделируя контакт в мезоскопическом масштабе [7]. Однако производительность обычно ограничивается объемом износа. Как этот объем переносится в воздух и в какой степени, до сих пор неизвестно и обычно решается с помощью

гранулометрического состава и того, какая фракция переносится в воздух, что обычно определяется в лабораторных испытаниях.

Для этого в последние годы широко используется упрощение системы, разработанный трибометр «штифт-на-диске» [8, 9]. Это помогло лучше и проще оценивать выбросы твердых частиц из тормозных систем. Однако большинство исследований по-прежнему сосредоточено на характеристике распределения. Кроме того, в нескольких исследованиях делается попытка оценить сопоставимость различных тестовых установок [10].

Мы видим, что область выбросов от тормозной системы довольно новая и неизведанная. В частности, несмотря на то, что имеются достаточно хорошие знания о распределении размеров и связанных с этим воздействию на здоровье, мало что известно об основных взаимосвязях между условиями контакта тормозных систем и выбросами частиц. Более того, хотя разные авторы [11-13] используют свои доступные установки, предоставляя знания в разных масштабах, все еще не ясно, всю ли предоставленную информацию можно считать надежной или есть существенные различия. При стремлении ознакомиться с будущими правилами такие знания важны, особенно потому, что в соответствии с правилами необходимо будет учитывать экологические аспекты непосредственно на этапе проектирования тормозной системы.

Поскольку трибометр «штифт-на-диске» упрощает реальную систему, проверка результатов также важна при попытке понять, в какой степени полученные знания будут иметь значение для промышленных применения. Таким образом, данные исследования направлены на подтверждение результатов, полученных путем анализа и сравнения различных испытательных установок: трибометр «штифт-на-диске», представляющий модельный масштаб; стенд инерционного динамометрического стенда, представляющий масштаб компонентов; и реальный автомобиль, представляющий полный масштаб.

Несмотря на то, что тормозная система имеет уникальную и очень простую цель, наряду с очевидной простой конструкцией, явления, которые приводят к хорошей производительности, являются сложными и включают различные инженерные аспекты от материаловедения до теплогидравлической динамики.

На основании проведенного анализа вредных частиц, которые образуются в результате взаимодействия контактирующих поверхностей тормозного механизма, в дальнейших исследованиях необходимо предусмотреть механизмы по снижению выбросов от тормозных элементов. Помимо этого, необходимо предусмотреть модель контактного взаимодействия для равномерного износа рабочих поверхностей механизма, что позволит в дальнейшем эффективно использовать имеющуюся толщину тормозного диска и фрикционной накладки.

### **Список литературы**

1. Поляков П.А. Теория и методы проектирования фрикционных узлов тормозных механизмов транспортных машин: Учеб. пособие / П.А. Поляков, Е.С. Федотов. – Краснодар: ИП Капустина, 2021. – 112с.
2. Федотов, Е.С. Особенности конструкции различных деталей дисково-колодочных тормозов и эффективность их действия / Федотов Е.С., Поляков П.А., Тагиев Р.С., Харьков С.В. // В сборнике «Инновации технических решений в машиностроении и транспорте» Всероссийская научно-техническая конференция. 2020 С. 182-186.

3. Вольченко Н.А. Нанотрибология при взаимодействии поверхностных слоев пар трения барабанно-колодочных тормозов / Н.А. Вольченко, П.А. Поляков // Вестник Саратовского технического университета. 2012. Т.1. №1(63) С. 41-47.
4. Литвинов А.Е. Управление энергонагруженностью барабанно-колодочного тормоза / А.Е. Литвинов, П.А. Поляков, Е.А. Полякова // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2020. №5. С.74-78. DOI: 10.26160/2541-8637-2020-5-74-78.
5. Polyakov P.A., Litvinov A.E., Polyakova E.A., Fedotov E.S., Tagiev R.S. Design of surface profile of pairs of friction unit // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol.843. P.012001. DOI: 10.1088/1757-899X/843/1/012001
6. Goto Y., Amago T., Chiku K., Matsushima T., Ishihara Y. Experimental identification method for interface contact stiffness of FE model for brake squeal / In D.C. Barton and A. Blackwood editors. – Braking, 2004. – Vehicle Braking and Chassis Control. Professional Engineering Publishing Ltd., July 2004.
7. Hong U.S., Junga S.L., Choa K.H., Choa M.H., Kimb S.J., Janga H. Wear mechanisms of multiphase friction materials with different phenolic resin matrices // Wear. 2009. Vol. 266. P.739-744. DOI: 10.1016/j.wear.2008.08.008.
8. Naveed A. An Investigation into the Influence of the Contact Pressure Distribution at the Friction Pair Interface on Disc Brake Squeal: Thesis for: D Advisor, 2013. 203p.
9. Newcomb T. Stopping Revolutions: Developments in the Braking of cars from the Earliest Days // Proceeding Institution Mechanical Engineering. – 1981 – Vol. 195, № 6. – P. 139-150.
10. Петрик А.А. Ленточно-колодочные тормозные устройства: монография / А.А. Петрик, Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, В.Я. Малык, П.А. Поляков. – Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2009. – 276с.
11. Балон Л.В. Эффективности пневматического тормоза электровоза ДЭ1 / Л.В. Балон, И.А. Яицков // Ростовского государственного университета путей сообщений. 2002. №2. С. 28-31.
12. Литвинов А.Е. Разработка метода определения поверхностной температуры тормозного диска / А.Е. Литвинов, П.А. Поляков, Р.С. Тагиев, А.А. Голиков, Н.А. Задаянчук, М.Б. Москаленко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщений. 2021. № 1(81). С. 30-39. DOI: 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_30.
13. Литвинов А.Е. Определение влияния геометрии вентиляционного аппарата на инерцию тормозного диска / А.Е. Литвинов, П.А. Поляков, Е.С. Федотов, А.А. Голиков, И.А. Яицков // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24. № 3. С. 19-30.

#### Сведения об авторах:

*Яицков Иван Анатольевич* – д.т.н., доцент, декан электромеханического факультета, РГУПС, г. Ростов-на-Дону;

*Поляков Павел Александрович* – к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник научно-производственного центра «Охрана труда», РГУПС, г. Ростов-на-Дону;

*Касумян Кристина Азатовна* – магистрант, КубГТУ, г. Краснодар;

*Гончарова Наталья Александровна* – магистрант, КубГТУ, г. Краснодар.