

С.П. Горбатов, Д.Г. Мясищев, А.С. Вашуткин

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
НА ИЗНАШИВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ ПАР
ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

Введение. Как было отмечено ранее [Вашуткин, 2011], для повышения тормозной эффективности лесотранспортных машин требуется подавать сжатый воздух между тормозными колодками и тормозным барабаном в процессе торможения перед тем, как они соприкоснутся между собой. При этом вопрос, связанный с изменением силы трения между фрикционными поверхностями тормозного механизма при подаче на них сжатого воздуха в настоящее время не изучен. С этой целью требуется провести экспериментальное исследование величины износа фрикционных поверхностей тормозного механизма при подаче сжатого воздуха между тормозным барабаном и тормозными колодками лесотранспортной машины. Учеными [Горбатов, Мясищев, Вашуткин, 2020] рассмотрена организация и планирование экспериментального исследования величины износа фрикционных поверхностей тормозного механизма при подаче сжатого воздуха между тормозными колодками и тормозным барабаном в процессе торможения.

Цель данного исследования – получение и анализ результатов при проведении экспериментального исследования величины износа фрикционных поверхностей тормозного механизма при подаче сжатого воздуха между тормозными колодками и тормозным барабаном в процессе торможения лесотранспортных машин.

Объектом экспериментального исследования стали тормозные механизмы барабанного типа при подаче к ним сжатого воздуха. Представленный объект исследования создан нами на основе изобретения [Мясищев, Вашуткин, Швецов, 2017]. Предметом исследования стали полученные результаты процесса изнашивания фрикционных поверхностей тормозных механизмов.

Выходной величиной при экспериментальном исследовании стал износ фрикционных накладок тормозных колодок (в граммах) как экспериментального, так и не экспериментального тормозного механизма. По величине износа можно судить о влиянии подачи сжатого воздуха на процесс изнашивания фрикционных поверхностей экспериментального тормозного механизма. В качестве варьируемых конструктивных параметров, определяющих процесс изнашивания фрикционных поверхностей тормозного

механизма приняты следующие варьируемые факторы: давление жидкости в тормозной системе $p_{ж}$ (МПа), влияющее на величину нормального давления в трибологической системе «тормозная колодка–тормозной барабан» и количество повторений (срабатываний) на рабочем органе v , определяющее характер приложения нагрузки [Горбатов, Мясищев, Вашуткин, 2020].

Проведенный нами теоретический априорный анализ величины износа фрикционных поверхностей барабанно-колодочного тормозного механизма при подаче на них сжатого воздуха показал, что, с одной стороны, увеличивающийся тормозной момент приводит к увеличению силы трения на фрикционные поверхности экспериментального тормозного механизма, вследствие чего увеличивается их износ. С другой стороны, подача сжатого воздуха снижает температуру в зоне контакта фрикционных поверхностей тормозного механизма и удаляет продукты износа, что должно привести к снижению их износа.

Методика исследования. Методология и планирование экспериментального исследования величины износа фрикционных поверхностей тормозного механизма при подаче сжатого воздуха между тормозными колодками и тормозным барабаном в процессе торможения описаны в [Горбатов, Мясищев, Вашуткин, 2020].

Для проведения экспериментального исследования принят экспериментальный стенд (рис. 1), принципиальная схема которого описана в [Лоренц, 2014].

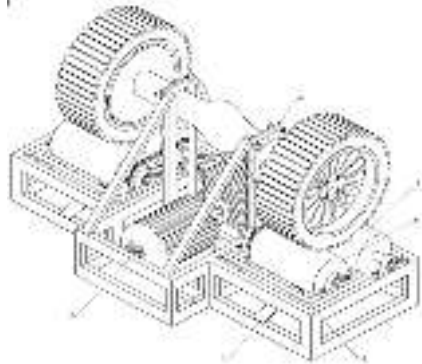


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

1 – электродвигатель; 2 – червячный редуктор; 3 – ролики барабанного типа;
4 – подвижные ролики; 5 – упругий элемент; 6 – чувствительный элемент

Fig. 1. Test bench schematic diagram

1 – motor; 2 – worm reduction gear; 3 – drum type rollers;
4 – movable rollers;
5 – elastic element; 6 – sensitive element

Ход проведения опыта на экспериментальном стенде состоит из ряда технологических операций.

Перед проведением опыта проводилась подготовка экспериментального стенда, которая включала в себя внешний осмотр деталей и узлов стенда, прокачку тормозной системы и проверку его электрооборудования.

Для проведения опыта тормозные колодки и колеса устанавливались в посадочные места. При этом крепления моста к раме стенда фиксировались с расчетным усилием прижатия колес к роликам стенда при помощи динамометрического ключа, что обеспечивало необходимый сцепной вес, приходящийся на опорные поверхности роликов стенда.

Для подачи сжатого воздуха на фрикционные поверхности тормозного механизма запускался компрессор. Кран подачи воздуха к фрикционным поверхностям тормозного механизма закрывался. Перед воздействием на рычаг рабочего органа (процесс торможения колес) открывался кран подачи воздуха к фрикционным поверхностям тормозного механизма. Далее, воздействуя на рычаг рабочего органа, при помощи встроенного манометра контролировалось необходимое давление в тормозной системе (5, 6, 7 МПа), как показано на рис. 2.

После блокировки колес прекращалось воздействие на рабочий орган. Через 1–2 с после прекращения воздействия на рычаг рабочего органа закрывался кран подачи воздуха к фрикционным поверхностям тормозного механизма. После проведения опыта требовалось извлечь тормозные колодки на экспериментальном и не экспериментальном колесе. В дальнейшем производилось взвешивание этих колодок с фиксацией результатов их износа в протоколе замеров выходных величин. Для измерения износа тормозных колодок использовались профессиональные прецизионные электронные весы SHIMADZU UW-620H.



Рис. 2. Реализация необходимого давления в тормозной системе
Fig. 2. Implementation of the required pressure in the brake system

Необходимое количество таких опытов проводилось согласно плану эксперимента [Горбатов, Мясищев, Ващуткин, 2020]. Результаты измерений занесены в таблицу.

Результаты измерения и обработки прямых оценочных показателей

Results of measuring and processing of direct estimates

Фактор	Обозначение	Единица измерения	Числовое значение факторов							
			Первая серия				Вторая серия			
Постоянные факторы										
Радиус тормозного барабана	r_6	мм	125							
Зазор между тормозным барабаном и фрикционной колодкой	h_3	мм	1,0							
Рабочая длина фрикционной накладки	l_k	мм	250							
Рабочая ширина фрикционной накладки	b_k	мм	50							
Общая площадь фрикционной накладки	$S_{общ}$	см ²	248							
Диаметр подводящих отверстий штуцеров	d_0	мм	7							
Давление воздуха, подаваемого на фрикционные поверхности тормозного механизма	P_v	МПа	0,6							
Переменные факторы										
Давление жидкости в тормозной системе	$p_ж$	МПа	5	6	7	7				
Количество повторений на рабочем органе	ν	кол-во	216			156	176	196	216	
Номер опыта			1	2	3	4	5	6	7	
Оценочные показатели										
Износ фрикционной поверхности: на экспериментальной прижимной, отжимной и не экспериментальной прижимной, отжимной колодках	$I_{эк1}$ приж	гр.	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	
	$I_{эк2}$ отж		0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	
	I_1 приж		0,02	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	
	I_2 отж		0,07	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	

Так как в результате обработки экспериментальных данных всех опытов оказалось, что показатель точности p меньше 5%, можно сделать вывод, что полученные результаты выходной величины I достоверны и дополнительных наблюдений в каждом опыте не требуется [Прокофьев, 2014].

Результаты исследования. На основании полученных экспериментальных данных построены графические зависимости величины износа фрикционных поверхностей экспериментальных и не экспериментальных тормозных колодок. Поскольку степень нагруженности прижимных и отжимных колодок не одинакова, то сравнение результатов износа проводилось между прижимной экспериментальной и прижимной не экспериментальной колодками, а также отжимной экспериментальной и отжимной не экспериментальной колодками.

На рис. 3 показана графическая зависимость износа I , гр, прижимной экспериментальной $I_{эк1приж}$ и прижимной не экспериментальной $I_{1приж}$ колодок.

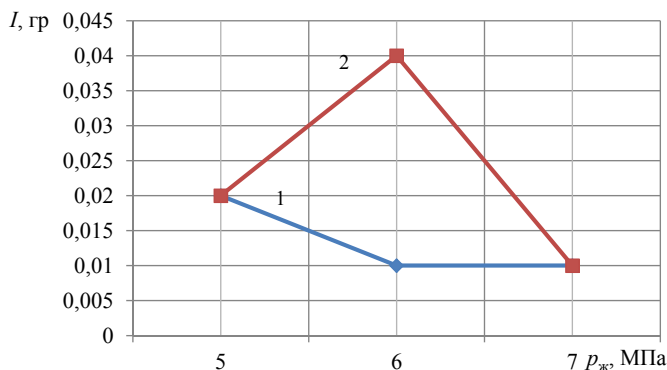


Рис. 3. Графическая зависимость износа I , гр, прижимной экспериментальной $I_{эк1приж}$ (1) и прижимной не экспериментальной $I_{1приж}$ (2) колодок от давления жидкости в тормозной системе $p_{ж}$ при постоянном количестве повторений на рабочем органе $v = 216$

Fig. 3. Graphical dependence of wear I , gr, of the experimental pressure brake shoe $I_{ex1pres}$ (1) and of the non-experimental pressure brake shoe I_{1pres} (2) on the fluid pressure in the brake system p_f , with constant number of repetitions in the working body $v = 216$

На рис. 4 показана графическая зависимость износа I , гр, отжимной экспериментальной $I_{эк2отж}$ и отжимной не экспериментальной $I_{2отж}$ колодок.

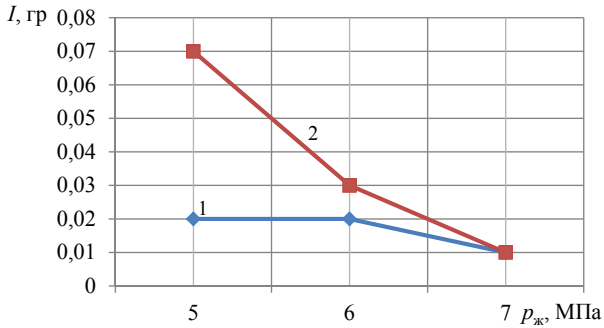


Рис. 4. Графическая зависимость износа I , гр, отжимной экспериментальной $I_{эк2\text{отж}}$ (1) и отжимной не экспериментальной $I_{2\text{отж}}$ колодок от давления жидкости в тормозной системе p_j при постоянном количестве повторений на рабочем органе $v = 216$

Fig. 4. Graphical dependence of wear I , gr, of the experimental trailing brake shoe $I_{эк2\text{tr}}$ (1) and of the non-experimental trailing brake shoe $I_{2\text{tr}}$ (2) on the fluid pressure in the brake system p_j with constant number of repetitions in the working body $v = 216$

На рис. 5 показана графическая зависимость износа I , гр, прижимной экспериментальной $I_{эк1\text{приж}}$ и прижимной не экспериментальной $I_{1\text{приж}}$ колодок.

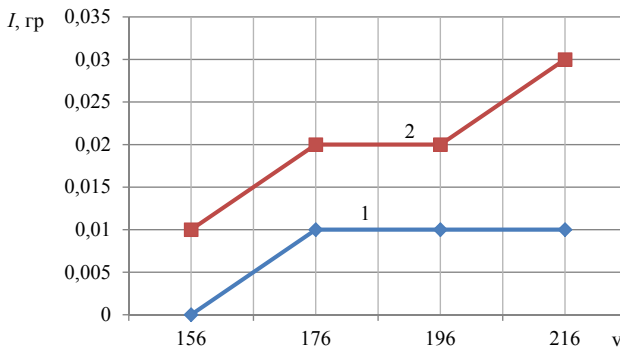


Рис. 5. Графическая зависимость износа I , гр, прижимной экспериментальной $I_{эк1\text{приж}}$ (1) и прижимной не экспериментальной $I_{1\text{приж}}$ колодок от количества повторений на рабочем органе v при постоянном давления жидкости в тормозной системе $p_j = 7$ МПа

Fig. 5. Graphical dependence of wear I , gr, of the experimental pressure brake shoe $I_{эк1\text{pres}}$ (1) and of the non-experimental pressure brake shoe $I_{1\text{pres}}$ (2) on the number of repetitions in the working body v , at the constant fluid pressure in the brake system $p_j = 7$ МПа

На рис. 6 показана графическая зависимость износа I , гр, отжимной экспериментальной $I_{\text{эк2 отж}}$ и отжимной не экспериментальной $I_{2 \text{отж}}$ колодок.

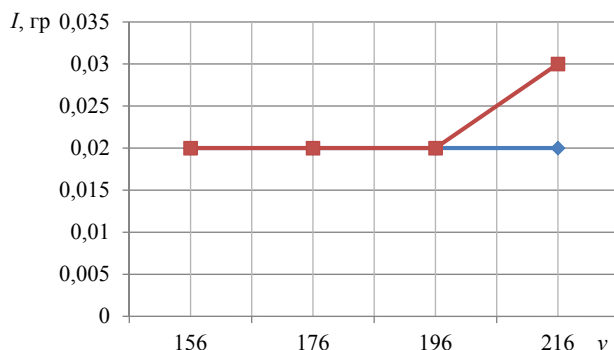


Рис. 6. Графическая зависимость износа I , гр, отжимной экспериментальной $I_{\text{эк2 отж}}$ (1) и отжимной не экспериментальной $I_{2 \text{отж}}$ (2) колодки от количества повторений на рабочем органе v , при постоянном давлении жидкости в тормозной системе $p_{\text{ж}} = 7$ МПа

Fig. 6. Graphical dependence of wear I , gr, of the experimental trailing brake shoe I_{ex2tr} (1) and of the non-experimental trailing brake shoe $I_{2\text{tr}}$ (2) on the number of repetitions in the working body v , at the constant fluid pressure in the brake system $p_f = 7$ MPa

Анализ графиков рис. 3 показал, что износ I , гр, прижимной экспериментальной $I_{\text{эк1 приж}}$ колодки оказался ниже на 43%, чем прижимной не экспериментальной $I_{1 \text{приж}}$ колодки, при давлении жидкости в тормозной системе $p_{\text{ж}}$ в диапазоне от 5 до 7 МПа при постоянном количестве повторений на рабочем органе $v = 216$. В первой серии опытов колодки в тормозном механизме были новыми, не приработанными. Вследствие этого износ фрикционных поверхностей здесь оказался выше, чем в других. Сжатый воздух, подаваемый между фрикционными поверхностями экспериментального тормозного механизма, выносил продукты износа из зоны трения, охлаждал фрикционные поверхности, сушил их, а также за счет кавитационных явлений от воздуха на фрикционные поверхности, приводил их к высокочастотным вибрациям [Мясищев, Вашуткин, Швецов, 2017]. Данное обстоятельство привело к снижению износа на экспериментальной колодке. При давлении жидкости в тормозной системе $p_{\text{ж}} = 7$ МПа и постоянном количестве повторений на рабочем органе $v = 216$ износ оказался одинаковым у двух колодок, поскольку к началу данного опыта фрикцион-

ные поверхности тормозных механизмов прошли приработку друг относительно друга.

На графике рис. 4 видно, что износ I , гр, отжимной экспериментальной $I_{\text{эк2отж}}$ колодки также оказался ниже на 55 %, чем отжимной не экспериментальной $I_{\text{2отж}}$ колодки. Данная закономерность объясняется вышеприведенным анализом.

Анализируя графические зависимости на рис. 5 видно, что износ I , гр, прижимной экспериментальной $I_{\text{эк1приж}}$ колодки оказался ниже на 62%, чем прижимной не экспериментальной $I_{\text{1приж}}$ колодки, при постоянном давлении жидкости в тормозной системе $p_{\text{ж}} = 7$ МПа и изменяющемся количестве повторений на рабочем органе v в диапазоне 156–216. При этом максимальный износ на не экспериментальной колодке оказался выше при значениях $p_{\text{ж}} = 7$ МПа и $v = 216$. При данных значениях опыта нагрев фрикционных поверхностей происходит наиболее интенсивно. Поскольку фрикционные поверхности экспериментального тормозного механизма, как отмечалось выше, обтекаются сжатым воздухом в процессе торможения, т. е. происходит их принудительное охлаждение, то и их износ ниже, чем на не экспериментальном тормозном механизме. Это обстоятельство также подтверждается графической зависимостью износа I , гр (рис. 6), которая показывает, что износ отжимной экспериментальной $I_{\text{эк2отж}}$ колодки ниже на 11 %, чем отжимной не экспериментальной $I_{\text{2отж}}$.

Как известно [Лоренц, 2014], подача сжатого воздуха между фрикционными поверхностями тормозного механизма привела к повышению тормозной силы. При этом полученные нами экспериментальные результаты показали, что подача воздуха позволила в среднем снизить износ фрикционных поверхностей на 43%, по сравнению с фрикционными поверхностями не экспериментального тормозного механизма.

Выводы. Полученные экспериментальные данные и проведенный анализ величины износа фрикционных поверхностей барабанно-колодочного тормозного механизма показали, что подача сжатого воздуха приводит к снижению их износа.

Данные результаты дают объективный характер величины износа фрикционных поверхностей тормозных механизмов.

Библиографический список

Ващуткин А.С. Улучшение эксплуатационных свойств тормозной системы автолесовоза путем подачи сжатого воздуха между тормозными колодками и тормозным барабаном: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2011. 129 с.

Горбатов С.П., Мясичев Д.Г., Вахуткин А.С. Организация и планирование экспериментального исследования степени износа фрикционных поверхностей тормозного механизма при подаче сжатого воздуха между тормозными колодками и тормозным барабаном в процессе торможения // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 231. С. 102–109. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.102-109.*

Мясичев Д.Г., Вахуткин А.С., Швецов А.М. Патент 2016107514 Российская Федерация, МРК51 F16D 65/833. Способ циркуляции воздуха при подаче его под давлением на фрикционные поверхности тормозного механизма в процессе торможения и устройство для его осуществления; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». № 2000131736/09; заявл. 01.03.16; опубл. 06.09.2017, Бюл. № 25. 3 с.

Прокофьев Г.Ф., Микловцик Н.Ю. Основы прикладных научных исследований при создании новой техники: монография; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. Архангельск: ИД САФУ, 2014. 171 с.

Лоренц А.С. Свойства системы, повышающей эффективность тормозных механизмов колесных лесных машин: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2017. 118 с.

References

Vashutkin A.S. Improvement of lumber truck braking performance through the compressed air supply between brake pads and brake drum: thesis for a Candidate Degree in Engineering Science. Arkhangelsk, 2011. 129 p.

Gorbatov S.P., Myasishchev D.G., Vashutkin A.S. Organization and planning of experimental research test for wear rate of brake friction surfaces with the supply of compressed air between brake pads and brake drum during braking. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2020, is. 231, pp. 102–109. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.102-109

Myasishchev D.G., Vashutkin A.S., Shvetsov A.M. Patent 2016107514, Russian Federation, МРК51 F16D 65/833. Method of air circulation during its supplying under the pressure on the friction surfaces of the brake assembly during braking and the device for its implementation; the patent applicant and holder is the federal state autonomous higher education institution «Northern (Arctic) Federal University named M.V. Lomonosov». No. 2000131736/09; appl. 01.03.16; publ. 06.09.2017, Bull. No. 25. 3 p.

Prokofiev, G.F., Miklovtsik N.Yu. Fundamentals of applied scientific research when creating a new technology: monography; North (Arctic) Fed. un-ty. Arkhangelsk: PH NArFU, 2014. 171 p.

Lorents A.S. Properties of the system increasing the performance of brakes in wheeled forest machines: thesis for a Candidate Degree in Engineering Science. Arkhangelsk, 2017. 118 p.

Материал поступил в редакцию 30.06.2020

Горбатов С.П., Мясичев Д.Г., Вашуткин А.С. Экспериментальное исследование на изнашивание фрикционных пар тормозных механизмов транспортных машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 232. С. 130–141. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.130-141

В ряде научно-исследовательских работ, связанных с повышением тормозной эффективности транспортных машин, рассматриваются вопросы уменьшения тепловой нагруженности их тормозных механизмов при помощи принудительного охлаждения путем подачи сжатого воздуха между тормозными колодками и тормозным барабаном в процессе торможения. При этом в данных работах не изучен вопрос влияния подачи сжатого воздуха между тормозными колодками и тормозным барабаном в процессе торможения машины на степень износа фрикционных поверхностей барабанного тормозного механизма. Объектом экспериментального исследования стали тормозные механизмы барабанного типа при подаче к ним сжатого воздуха. Предметом исследования стали полученные результаты процесса изнашивания фрикционных поверхностей тормозных механизмов. В ходе эксперимента получены данные величины износа фрикционных поверхностей барабанно-колодочного тормозного механизма при подаче на них сжатого воздуха. Приведена графическая зависимость износа экспериментальных и не экспериментальных колодок от количества повторений на рабочем органе и давления жидкости в тормозной системе. Функциональный анализ полученных эмпирических закономерностей указывает на то, что факторы, участвующие в исследуемых процессах имеют сложную физическую связь. Кроме того, существующие аналоги исследуемых явлений очень многогранны и неоднозначны. Структурное рассмотрение полученных результатов с учетом существующих в смежных областях закономерностей позволяет утверждать однозначный результат использования найденных соотношений. Установленные зависимости показателей процесса изнашивания фрикционных пар во время принудительного охлаждения их поверхностей на практике могут способствовать повышению эксплуатационной эффективности исследуемой системы. В реальных условиях эксплуатации использование полученных результатов может обеспечить положительный эффект: уменьшение износов элементов конструкции, снижение энергоемкости процессов и, как следствие, повышение надежности действия элементов исследуемой системы.

Ключевые слова: тормозной механизм; тормозной барабан; тормозная колодка; износ; эксперимент; сжатый воздух.

Gorbatov S.P., Myasishev D.G., Vashutkin A.S. Experimental study of wear of friction pairs of brake assemblies of transport vehicles. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2020, is. 232, pp. 130–141 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.130-141

A number of research papers related to improving the braking efficiency of transport vehicles are addressed the issues of reducing the thermal load of their brakes with forced cooling by supplying compressed air between the brake shoes and brake drum during braking. At the same time, the issue of the effect of compressed air supply between the brake shoes and the brake drum during the vehicle braking on the degree of wear of the drum brake mechanism friction surfaces has not been studied in these papers. The drum-type braking mechanisms with compressed air supplying to them became the experimental study object. The obtained results of wearing of the brake mechanism friction surfaces are the subject of the research. The experimental data of the degree of wear of the friction surfaces of the drum-shoe brake mechanism when compressed air is supplied to them are obtained. The functional dependence of the wear of experimental and non-experimental shoes on the number of repetitions in the working body with the implemented required fluid pressure in the brake system is provided. The functional analysis of the obtained empirical regularities indicates that the factors involved in the processes under study have a complex physical relationship. In addition, the existing analogues of the studied phenomena are very versatile and ambiguous. Structural consideration of the obtained results, taking into account the patterns existing in related fields, allows us to state a unique result of using the found relations. In particular, the established dependences of the indicators of the friction pairs wearing using forced cooling can contribute, in practice, to increase the operational efficiency of the system under study. In real operating conditions, usage of the obtained results can provide a diverse positive effect: reduction of wear of structural elements, decrease of the process energy intensity and, as a result, increase of reliability of the elements of the system under study.

К е y w o r d s : brake; brake drum; brake pad; wear; experiment; compressed air.

ГОРБАТОВ Сергей Павлович – преподаватель ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова».

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Архангельская обл., Россия. E-mail: qorbatovsp@yandex.ru

GORBATOV Sergei P. – lecturer at FSAEI HE «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov».

163002. Severnoi Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Arkhangelsk Region. Russia. E-mail: qorbatovsp@yandex.ru

МЯСИЩЕВ Дмитрий Геннадьевич – профессор ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», доктор технических наук, профессор.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Архангельская обл., Россия. E-mail: d.myasishchev@narfu.ru

MYASISCHEV Dmitry G. – DSc (Technical), professor at FSAEI HE «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», professor.

163002, Severnoi Dviny emb. 17, Arkhangelsk, Arkhangelsk Region, Russia.
E-mail: d.myasishchev@narfu.ru

ВАШУТКИН Александр Сергеевич – преподаватель ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», кандидат технических наук.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Архангельская обл., Россия. E-mail: a.vashutkin@narfu.ru

VASHUTKIN Alexander S. – PhD (Technical), lecturer at FSAEI HE «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov».

163002, Severnoi Dviny emb. 17, Arkhangelsk, Arkhangelsk Region, Russia.
E-mail: a.vashutkin@narfu.ru