УДК 621.867.61
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-148-159

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПАЛЛЕТЫ ПО ТОРМОЗНОМУ РОЛИКУ МАГНИТНОГО ТИПА

И.А. Шарифуллин, А.Л. Носко, Е.В. Сафронов
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *Повышение эффективности использования складского помещения при неизменном объеме является актуальной задачей, решение которой возможно посредством блочного или глубинного складского хранения. Одним из таких решений стало использование гравитационных стеллажей для паллет, которые позволяют сэкономить до 25% пути пройденного вилочными погрузчиками по сравнению с фронтальными стеллажами. Основным элементом безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров, применяемых в стеллажах для паллет, является тормозной ролик. Наиболее перспективной конструкцией считается тормозной ролик магнитного (вихретокового) типа. Цель работы – проведение сравнительного анализа результатов расчетных и экспериментальных исследований по определению скорости движения паллеты по тормозному магнитному ролику.*
Материалы и методы. *Областью исследования является тормозной ролик магнитного типа. Представлены конструкция и описание работы ролика, результаты расчетного и экспериментального исследований коэффициента магнитной вязкости.*
Результаты. *Получены расчетные и экспериментальные зависимости скорости движения паллеты по тормозному магнитному ролику. Установлено, что с увеличением скорости движения паллеты по тормозному магнитному ролику погрешность математической модели возрастает, и, прежде всего, после пересечения с прямой предельной скорости эффективности вихретокового тормоза.*
Заключение. *Проведен сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований по определению скорости движения паллеты по тормозному магнитному ролику. Установлено, что разработанная конструкция тормозного магнитного ролика в рабочем диапазоне масс паллет от 100 до 600 кг с магнитами в количестве до 16, расположенными с одной стороны диска, и от 100 до 1150 кг с магнитами в количестве до 8 пар, расположенными с обеих сторон диска, обеспечивает регулирование скорости в пределах, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на гравитационном роликовом конвейере. Верификация математической модели показала, что среднее значение погрешности математической модели во всем диапазоне масс паллет на скоростях, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на гравитационном роликовом конвейере и находящихся ниже предельной скорости эффективности вихретокового тормоза, составляет не более 8,2%.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *паллета, стеллаж, гравитационный роликовый конвейер, магнитный (вихретоковый) тормозной ролик, коэффициент магнитной вязкости.*

БЛАГОДАРНОСТИ. *Авторы выражают благодарность рецензентам статьи.*

Поступила 15.03.21, принята к публикации 27.04.21.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Шарифуллин И.А. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных исследований скорости движения паллеты по тормозному ролику магнитного типа / И.А. Шарифуллин, А.Л. Носко, Е.В. Сафронов. – DOI https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-148-159 // *Вестник СибАДИ.* – 2021. – Т. 18, № 2(78). – С. 148-159.

© Шарифуллин И.А., Носко А.Л., Сафронов Е.В., 2021

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-148-159

COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATED AND EXPERIMENTAL STUDIES OF PALLET MOVEMENT SPEED ON MAGNETIC TYPE BRAKE ROLLER

Ildar A. Sharifullin, Andrei L. Nosko, Evgenii V. Safronov
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. *Increasing the efficiency of using a warehouse with a constant volume is an urgent task, the solution of which is possible through block or deep-lane storage systems. One such solution is the pallet flow rack, which saves up to 25% of the distance travelled by a forklift compared to the single-deep racks. The main element of the safe operation of the gravity roller conveyors used in a pallet flow rack is a brake roller. The most promising design is a magnetic (eddy current) type brake roller. The purpose of the work is to carry out a comparative analysis of the results of the calculated and experimental studies to determine the speed of movement of a pallet along a magnetic brake roller.*
Materials and methods. *The research area is the magnetic brake roller. Its construction and description of work presented. The results of calculated and experimental study of the coefficient of magnetic viscosity presented.*
Results. *The calculated and experimental dependences of the pallet movement speed along the magnetic brake roller were obtained. It was found that with an increase in the speed of movement of the pallet along the magnetic brake roller, the error of the mathematical model increases, and, first of all, after crossing with the straight line of a drag peak speed.*
Conclusions. *A comparative analysis of the results of the calculated and experimental studies to determine the speed of movement of the pallet along the magnetic brake roller carried out. It was found that the developed design of a magnetic brake roller in the operating range of the pallet masses from 100 to 600 kg with up to 16 magnets located on one side of the disc, and from 100 to 1150 kg with up to 8 pairs of the magnets located on both sides of the disc, provides a speed control within the limits not exceeding the permissible speeds of the pallet movement on the gravitational roller conveyor. The verification of the mathematical model showed that the average value of the error of the mathematical model in the entire range of the pallet masses at speeds not exceeding the permissible speeds of pallet movement on a gravitational roller conveyor and below the drag peak speed is no more than 8.2%.*

KEYWORDS: *pallet, rack, gravity roller conveyor, magnetic (eddy current) brake roller, coefficient of magnetic viscosity.*

ACKNOWLEDGEMENTS. *Authors express their gratitude to the reviewers of the paper.*

Submitted 15.03.21, revised 27.04.21
The authors have read and approved the final manuscript.
Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Sharifullin I.A., Nosko A. L., Safronov E.V. Comparative analysis of calculated and experimental studies of pallet movement speed on magnetic type brake roller. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2021; 18(2): 148-159. DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-148-159

© Sharifullin I.A., Nosko A.L., Safronov E.V., 2021

Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Склад – это комплекс, включающий в себя здание, стеллажные системы, подъемно-транспортные устройства, предназначенный для хранения и внутрискладской обработки поступивших товаров, от приема на хранение до подготовки к реализации и отпуска потребителю. Склады позволяют поддерживать запас и обеспечивать непрерывность сбыта готовой продукции. Их роль в логистике заключается в создании условий для оптимизации материального потока [1], что может быть достигнуто путем оптимизации использования пространства [2], уменьшения общего пройденного расстояния вилочными погрузчиками [3], использования автоматизированных систем хранения и поиска [4].

Повышение эффективности использования складского помещения при неизменном объеме является актуальной задачей, решение которой возможно посредством блочного или глубинного складского хранения [5, 6, 7]. Одним из таких решений является использование гравитационных стеллажей (рисунок 1) для паллет [8, 9], которые, как отмечено в [10], позволяют сэкономить до 25% пути пройденного вилочными погрузчиками по сравнению с фронтальными стеллажами.

Конструкцию гравитационного стеллажа для паллет можно разделить на 2 части – статическую и динамическую. Статическая часть включает стандартные элементы стеллажа, которые обеспечивают устойчивость во всех направлениях, а также поддерживают динамические элементы. Динамическая часть включает в себя гравитационный роликовый конвейер и элементы безопасности, такие как тормозные ролики и устройства остановки и разделения паллет (далее – УОРП) [11].

Поддон с грузом (далее – паллета), движущаяся по гравитационному роликовому конвейеру (далее – ГРК) под действием собственного веса, должна иметь такую скорость, чтобы ее можно было остановить посредством УОРП без повреждений. Это достигается путем использования тормозных роликов, которые устанавливаются по длине конвейера с определенным шагом и ограничивают скорость паллеты в канале стеллажа.

По этой причине основным элементом безопасной эксплуатации ГРК являются тормозные ролики. Наиболее широкое применение в гравитационных стеллажных системах для паллет нашли центробежные фрикционные ролики [12]. Однако они имеют целый ряд недостатков, основными из которых является износ фрикционной накладки тормоза, и, как следствие, изменение тормозных характеристик ролика, а также в процессе работы центробежного фрикционного ролика в атмосферу попадают продукты износа – тормозная пыль, которая оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека [13].

Проведенный анализ различных конструкций тормозных роликов гравитационных конвейеров для паллет[1] [14] показал, что одной из

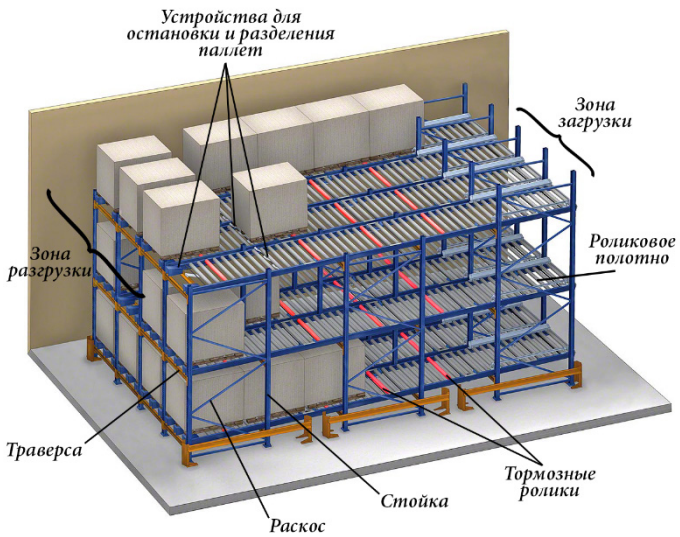

Рисунок 1 – Система паллетных гравитационных стеллажей

Figure 1 – Gravity pallet racking system

[1] Сафронов Е.В., Шарифуллин И.А., Носко А.Л. Устройства безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров паллетного типа: монография. М.: Университетская книга, 2018. 72 с.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

наиболее перспективных конструкций тормозных роликов являются тормозные ролики магнитного (вихретокового) типа (далее – ТМР), основным преимуществом которых будет бесконтактное (не фрикционное) торможение, и, соответственно, отсутствие износа фрикционной накладки тормоза ролика.

Предлагаемая работа является продолжением исследований по определению скорости движения паллеты по ТМР [15], в которой разработана математическая модель (далее – ММ) движения паллеты по ТМР и получена зависимость скорости движения паллеты от ее массы.

Цель работы – проведение сравнительного анализа результатов расчетных и экспериментальных исследований по определению скорости движения паллеты по ТМР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Конструкция и описание работы ТМР. В МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Подъемно-транспортные системы» разработан ТМР (рисунок 2), состоящий из планетарного мультипликатора 1 и магнитного (вихретокового) тормоза 2, размещенных на оси 4 в тормозной вставке 3.

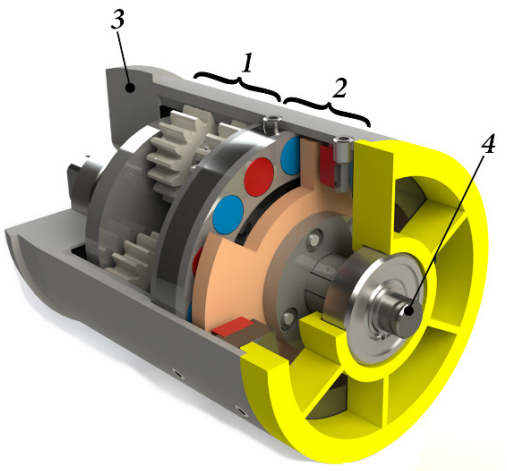

Рисунок 2 – Общий вид ТМР (3D-модель): 1 – планетарный мультипликатор; 2 – магнитный (вихретоковый) тормоз; 3 – тормозная вставка; 4 – ось

Figure 2 – General view of TMP (3D model): 1 – planetary multiplier, 2 – magnetic (eddy current) brake, 3 – brake insert, 4 – axis

Процесс торможения ТМР (рисунок 3) начинается при действии на обечайку ролика (корпус 3 тормозной вставки) крутящего момента, который через планетарный мультипликатор 1 передается на диск 5 (представлен прозрачным) и приводит его во вращение в магнитном поле, создаваемым постоянными магнитами 6, расположенными с чередующейся полярностью и жестко связанными посредством переходника с тормозной вставкой 3.

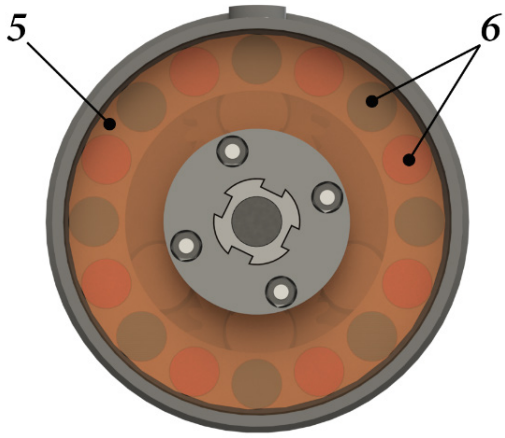

Рисунок 3 – Магнитный (вихретоковый) тормоз: 5 – диск (представлен прозрачным); 6 – постоянные магниты

Figure 3 – Magnetic (eddy current) brake: 5 – disk (transparent), 6 – permanent magnets

Диск 5 выполнен из материала, обладающего высокой удельной проводимостью, например меди или алюминия, и является проводящим телом. Согласно закону силы Лоренца на поверхности диска индуцируются вихревые токи (токи Фуко), которые создают момент сопротивления приложенной внешней нагрузке, т.е. тормозной момент. В качестве материала постоянных магнитов 6 используется соединение Nd-Fe-B (неодим–железо–бор). Такие магниты обладают наилучшими магнитными и электрическими свойствами, срок службы которых на сегодняшний день составляет 20–25 лет и более, а также имеют высокое значение коэрцитивной силы, что делает ТМР практически нечувствительным к воздействию внешних магнитных полей [16].

В конструкции ТМР величина воздушного зазора между магнитами 6 и диском 5 остается неизменной, а тормозной момент зависит от скорости их относительного вращения.

ТМР может быть выполнен в двух исполнениях: с постоянными магнитами, расположенными с чередующейся полярностью, с одной стороны диска и с обеих сторон диска.

В [15] установлено, что основным параметром, определяющим тормозные функции ТМР, а значит и скорость движения паллеты по ТМР, является коэффициент магнитной вязкости – β. Также в [15] получена расчетная

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

зависимость для определения скорости V движения паллеты по ТМР:

$$V = \frac{D_{MP}^2 \cdot g(\tan\alpha - w)}{D_{BT}^2 \cdot \beta \cdot (1 + u \cdot \eta_{MP})(1+u)} \cdot M, \quad (1)$$

где M – масса паллеты, кг; V – скорость движения паллеты по ТМР, м/с; w – приведенный коэффициент сопротивления передвижению паллеты по роликовому полотну ГРК [17]; $D_{МР}$ – диаметр ТМР, м; $D_{ВТ}/2$ – расстояние от оси вращения ТМР до центра постоянных магнитов, м; u – передаточное отношение мультипликатора ТМР; $\eta_{МР}$ – КПД ТМР; α = 1,7…2,8° – угол наклона ГРК.

Коэффициент магнитной вязкости. Согласно [18, 19, 21] коэффициент магнитной вязкости может быть определен по формулам:

$$\beta_1 = \frac{\pi \cdot \sigma}{4} D^2 \cdot d \cdot B^2; \quad (2)$$

$$\beta = n \cdot \beta_1, \quad (3)$$

где β_1 – коэффициент магнитной вязкости одного магнита (или одной пары магнитов, расположенных с обеих сторон диска), Н·с/м; n – количество магнитов (или количество пар магнитов); σ – удельная проводимость материала проводящего тела (диск 5 на рисунке 3), См/м; B – магнитная индукция, Тл; D – диаметр поперечного сечения магнита, м; d – толщина проводящего тела (диска), м.

Однако формула (2) не учитывает влияния воздушного зазора между диском и магнитами и их положения друг относительно друга (краевого эффекта) на коэффициент магнитной вязкости β и силу торможения $F_{ВТ}$.

В таком случае коэффициент магнитной вязкости β представляет собой комплексный показатель, зависящий от ряда параметров, между которыми сложно установить теоретические зависимости, что не позволяет обоснованно подойти к выбору конструктивных параметров вихретокового тормоза ТМР.

В связи с этим в работе [22] были проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента магнитной вязкости одного магнита (и одной пары магнитов) β_1 для условий эксплуатации ТМР в ГРК для паллет и установлено, что коэффициент магнитной вязкости β_1:

- уменьшается с увеличением воздушного зазора между проводящим телом и постоянными магнитами, причем эта зависимость имеет степенной характер;
- уменьшается при увеличении частоты вращения проводящего тела;
- не зависит от изменения расстояния между центрами проводящего тела и постоянного магнита;
- уменьшается при появлении краевого эффекта в соответствии с воздушным зазором.

На основании результатов экспериментальных исследований [22] по определению коэффициента магнитной вязкости β_1 разработана конструкция ТМР, представленная на рисунке 2, которая обеспечивает максимально высокие показатели вихретокового тормоза в условиях эксплуатации ГРК для паллет, а формула (1) с учетом (2) и (3) может быть записана в виде

$$V = \frac{D_{MP}^2 \cdot g(\tan\alpha - w)}{D_{BT}^2 \cdot \beta_1 \cdot n \cdot (1 + u \cdot \eta_{MP})(1+u)} \cdot M. \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнительный анализ расчетной и экспериментальной зависимостей скорости движения паллеты по магнитному ролику. Экспериментальные исследования ТМР проводились для количества постоянных магнитов *n=8, n=16* (расположенных с одной стороны диска) и пар магнитов *n=4, n=8* (расположенных с обеих сторон диска) на экспериментальном стенде, позволяющем имитировать реальные режимы эксплуатации тормозных роликов различных конструктивных исполнений, применяемых в ГРК для паллет [23]. Как правило, диаметр ТМР $D_{МР}$ выбирается исходя из конструктивных ограничений ГРК и гравитационного стеллажа для паллет. На практике для ТМР чаще всего используются трубы с диаметром $D_{МР}$, равным 80 или 89 мм с толщиной стенки 3 мм из материала Сталь 3. В разработанной конструкции (см. рисунок 2) $D_{МР}$ = 89 мм, а $D_{ВН}$ = 83 мм, а в качестве мультипликатора на основании анализа, проведенного в работе [24], используется двухступенчатый мультипликатор с передаточным отношением u=24. КПД ТМР $\eta_{МР}$ может быть рассчитан по аналогии с КПД центробежного фрикционного ролика [12]. Согласно экспериментальным данным [22] коэффициент магнитной вязкости для представленной конструкции ТМР (см. рисунок 2) β_1=0,113 Н·с/м (для одного магнита) и β_1=0,583 Н·с/м (для одной пары магнитов).

Исходные данные для расчета скорости V движения паллеты по ТМР по формуле (4) представлены в таблице 1.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица 1
Исходные данные для расчета скорости V движения паллеты по ТМР

Table 1
Initial data for calculating the speed V of the pallet movement on TMP

Параметр	Значение	Единица измерения
Масса паллеты, М	100–1300	кг
Диаметр ТМР, $D_{МР}$	0,089	м
Длина ТМР, $L_{МР}$	0,88	м
Расстояние от оси вращения ТМР до центра постоянных магнитов, $D_{ВТ}/2$	0,03	м
Коэффициент магнитной вязкости β_1 – для одного магнита, – для одной пары магнитов	0,113 0,583	Н·с/м
Приведенный коэффициент сопротивления передвижению паллеты по роликовому полотну ГРК *w*	0,02	–
Уклон роликового полотна ГРК tan α	0,04	–

Погрешность теоретического расчета может быть определена по формуле

$$\varepsilon = \frac{\left|V_{Calc} - \tilde{V}_{Exp}\right|}{\tilde{V}_{Exp}} 100\%, \quad (5)$$

где V_{Calc} – расчетная скорость движения паллеты по ТМР, м/с; $\tilde{V}_{Exp}$ – среднее значение экспериментальных значений скорости паллеты, м/с.

Результаты и сравнительный анализ полученных расчетных и экспериментальных исследований скорости V движения паллеты по ТМР приведены в таблицах 2 и 3 и на рисунках 4 и 5.

Таблица 2
Результаты расчетных и экспериментальных исследований скорости V движения паллеты по ТМР

Table 2
Results of the calculated and experimental studies of the speed V of the pallet movement along the TMP

Масса паллеты *M*, кг	Расчет V_{Calc}				Эксперимент $\tilde{V}_{Exp}$			
	Магниты с одной стороны диска		Магниты с обеих сторон диска		Магниты с одной стороны диска		Магниты с обеих сторон диска	
	Количество магнитов *n*		Количество пар магнитов *n*		Количество магнитов *n*		Количество пар магнитов *n*	
	8	16	4	8	8	16	4	8
100	0,102	0,051	0,039	0,019	0,109	0,049	0,043	0,021
200	0,204	0,102	0,078	0,039	0,220	0,096	0,082	0,037
300	0,305	0,153	0,118	0,059	0,330	0,143	0,119	0,054
400	0,407	0,204	0,157	0,078	0,473	0,195	0,158	0,073
500	0,509	0,255	0,197	0,098	0,630	0,252	0,201	0,091
600	0,611	0,305	0,236	0,118	0,795	0,308	0,251	0,111
700	–	0,356	0,276	0,138	–	0,389	0,298	0,128
800	–	0,407	0,315	0,157	–	0,480	0,364	0,148
900	–	0,458	0,355	0,177	–	0,585	0,437	0,165
1000	–	0,509	0,394	0,197	–	0,687	0,522	0,186
1100	–	–	–	0,217	–	–	–	0,211
1200	–	–	–	0,236	–	–	–	0,233
1300	–	–	–	0,2565	–	–	–	0,2564

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица 3
Сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований скорости V движения паллеты по ТМР

Table 3
Comparative analysis of the results of calculated and experimental studies of the speed V of the pallet movement along the TMP

Масса паллеты *M*, кг	Погрешность расчета, %			
	Магниты с одной стороны диска		Магниты с обеих сторон диска	
	Количество магнитов *n*		Количество пар магнитов *n*	
			4	8
100	7,3%	3,3%	8,2%	7,7%
200	7,7%	6,2%	4,2%	6,3%
300	7,7%	6,8%	0,6%	7,6%
400	13,9%	4,4%	0,4%	7,3%
500	19,2%	1,2%	1,9%	8,2%
600	23,1%	0,8%	5,8%	6,5%
700	–	8,5%	7,5%	7,1%
800	–	15,2%	13,3%	6,3%
900	–	21,6%	18,8%	7,4%
1000	–	25,8%	24,4%	5,9%
1100	–	–	–	2,7%
1200	–	–	–	1,5%
1300	–	–	–	0,04%

На рисунках 4 и 5 также представлена зависимость допустимой скорости движения паллеты от массы *M* паллеты на ГРК. Данная зависимость построена по методике, разработанной на базе теории удара Кокса в [25], в которой допустимая скорость движения паллеты определяется деформацией упора УОРП, при которой он не теряет своей несущей способности. В таком случае рабочий диапазон масс паллет ТМР должен обеспечивать регулирование скорости в пределах, не превышающих допустимых скоростей движения паллет на ГРК.

Сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований показал, что с увеличением скорости движения *V* паллеты массой *M* по ТМР погрешность ММ возрастает. Это обусловлено допущениями ММ, что вихретоковый тормоз ТМР представляет собой элемент линейного вязкого трения [18, 19, 21]. По этой причине скорость движения паллеты по ТМР, полученная расчетным способом, представляет собой практически линейную зависимость, что хорошо видно на рисунках 4 и 5. Однако, исходя из результатов исследований [26], необходимо учитывать такой параметр, как «предельная скорость эффективности вихретокового тормоза», которая определяется по формуле

$$\omega_{отн} = \frac{4}{\mu \cdot \sigma \cdot d \cdot D_{BT}}, \qquad (6)$$

где *d* – толщина проводящего тела (диска, см. рисунок 3), м; *μ* – магнитная проницаемость материала проводящего тела, Гн/м; *σ* – удельная проводимость материала проводящего тела, См/м.

Предельная скорость эффективности вихретокового тормоза – это угловая скорость проводящего тела (диска) относительно постоянных магнитов, при превышении которой вихревые токи, образующиеся на поверхности проводящего тела, не успевают достичь своих предельных значений, что приводит к снижению коэффициента магнитной вязкости β и, соответственно, к падению тормозного момента вихретокового тормоза.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

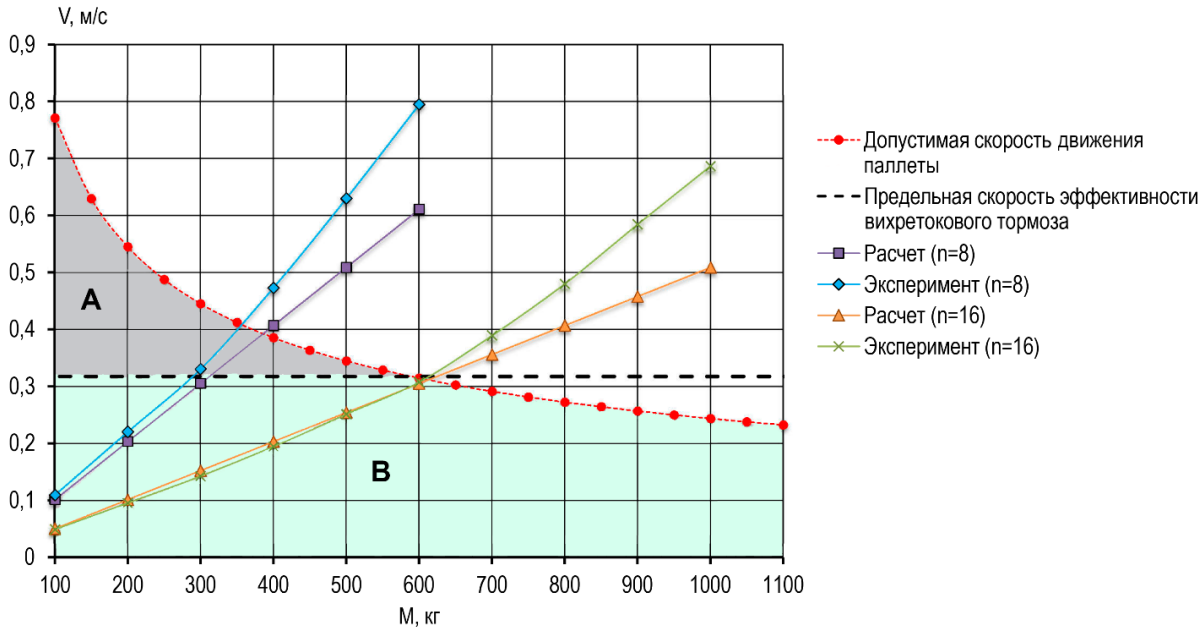

Рисунок 4 – Сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований скорости V движения паллеты по ТМР с магнитами, расположенными с одной стороны диска

Figure 4 – Comparative analysis of the results of calculated and experimental studies of the speed V of pallet movement along the TMP with magnets on one side of the disk

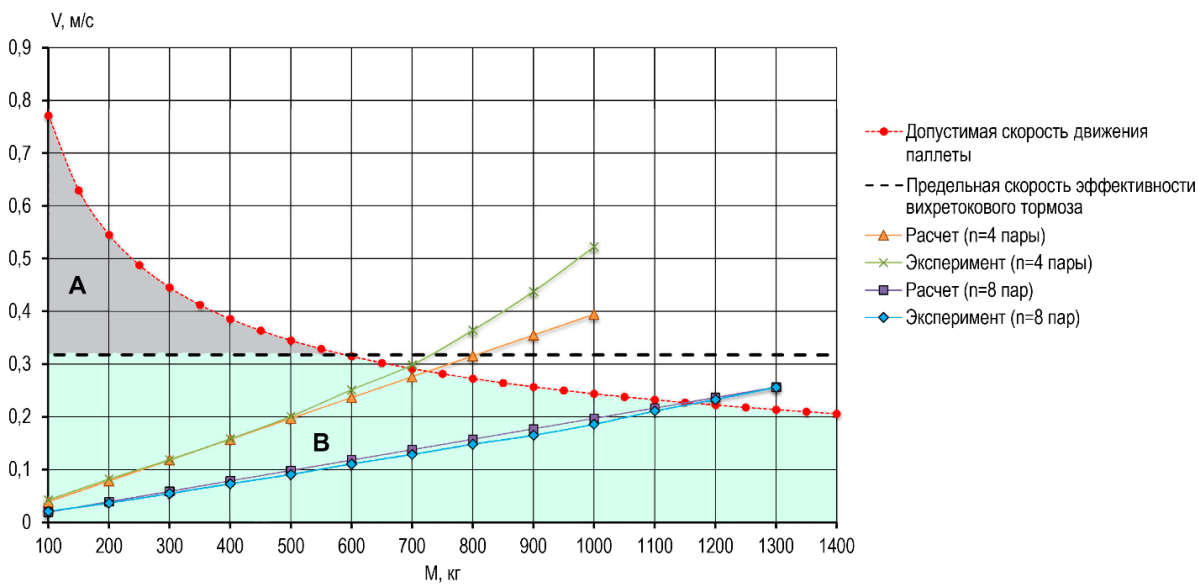

Рисунок 5 – Сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований скорости V движения паллеты по ТМР с магнитами, расположенными с обеих сторон диска

Figure 5 – Comparative analysis of the results of calculated and experimental studies of the speed V of pallet movement along the TMP with magnets on both sides of the disk

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Для представленной на рисунке 2 конструкции ТМР угловая скорость диска относительно постоянных магнитов может быть определена по формуле

$$\omega_{отн} = \frac{2 \cdot V}{D_{MP}}(1+u). \quad (7)$$

Приравнивая (6) и (7), получим расчетную зависимость для определения предельной скорости [$V_{ПС}$] эффективности вихретокового тормоза

$$[V_{ПС}] = \frac{2 \cdot D_{MP}}{\mu \cdot \sigma \cdot d \cdot D_{BT}(1+u)}. \quad (8)$$

Как видно из рисунков 4 и 5, графики скорости, полученные из эксперимента, меняют свой наклон, а погрешность расчета и эксперимента начинает возрастать после пересечения с прямой предельной скорости эффективности вихретокового тормоза. Однако, принимая во внимание кривую допустимой скорости движения паллеты, графики, представленные на рисунках 4 и 5, можно разделить на области А и В.

На участке графиков выше предельной скорости эффективности вихретокового тормоза с позиции ограничения скорости паллеты в канале стеллажа наибольший практический интерес представляет область А, в которой не превышается допустимая скорость движения паллеты. Возрастание погрешности ММ в этой области хорошо согласуется с выводами работ [26, 27] и связано с тем, что угловая скорость проводящего тела (диска) ТМР относительно постоянных магнитов превышает предельную угловую скорость эффективности вихретокового тормоза, при которой вихревые токи, образующиеся на поверхности проводящего тела, не успевают достичь своих предельных значений.

Область В графиков скорости представляет собой рабочий диапазон масс паллет ТМР, в котором обеспечивается регулирование скорости в пределах, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на ГРК и находящихся ниже предельной скорости эффективности вихретокового тормоза. В этой области полученные расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными данными, и погрешность ММ не превышает 8,2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований по определению скорости движения паллеты по ТМР.

Установлено, что в рабочем диапазоне масс паллет:

– от 100 до 600 кг разработанная конструкция ТМР с магнитами в количестве до 16, расположенными с одной стороны диска, обеспечивает поддержание скорости в пределах, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на ГРК;

– от 100 до 1150 кг разработанная конструкция ТМР с магнитами в количестве до 8 пар, расположенными с обеих сторон диска, обеспечивает поддержание скорости в пределах, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на ГРК.

Верификация ММ показала, что среднее значение погрешности ММ во всем диапазоне масс паллет на скоростях, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на ГРК и находящихся ниже предельной скорости эффективности вихретокового тормоза, составляет не более 8,2%.

Экспериментальные исследования по определению скорости движения паллеты по ТМР показали, что при превышении предельной скорости [$V_{ПС}$] эффективности вихретокового тормоза значения коэффициента магнитной вязкости β_1 уменьшаются и требуются дополнительные экспериментальные исследования на этих скоростях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boslovyak P. V., Lagerev A. V. Optimization of the conveyor transport cost // IFAC-PapersOnLine. 2019; 52 (25): 397-402.
2. Derhami, S., Smith, JS., Gue, KR. Optimising space utilisation in block stacking warehouses // Int J Of Prod Res. 2017; 55(21): 6436-6452.
3. Ghalehkhondabi, I., Masel, DT. Storage allocation in a warehouse based on the forklifts fleet availability // Journal of Algorithms & Computational Technology. 2018; 12(2): 127-135.
4. Heragu, SS., Cai, X., Krishnamurthy, A., Malmborg, CJ. Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems // Int J Of Prod Res. 2011; 49(22): 6833-6861.
5. Sulirova, I., Zavodska, L., Rakyta, M., Pelantova, V. State-of-the-art approaches to material transportation, handling and warehousing // 12th International scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport, Procedia Engineering. 2017; 192: 857-862.
6. Boysen, N., Boywitz, D., Weidinger, F. Deep-lane storage of time-critical items: one-sided versus two-sided access // OR Spectrum. 2018; 40(4): 1141-1170.
7. Boywitz, D., Boysen, N. Robust storage assignment in stack- and queue-based storage

systems // Computers & Operations Research. 2018; 100: 189-200.

8. Accorsi, R., Baruffaldi, G., Manzini, R. Design and manage deep lane storage system layout. An iterative decision-support model // Int J Adv Manuf Technol. 2017; 92(1-4): 57-67.

9. Eo, J., Sonico, J., Su, A., Wang, W., Zhou, C., Zhu, Y., Wu, S., Chokshi, T. Structured comparison of pallet racks and gravity flow racks // IIE Annual Conference and Expo. 2015: 1971-1980.

10. Wu S., Wu Ya., Wang Ya. A structured comparison study on storage racks system // Journal of Residuals Science & Technology. 2016; 13(8).

11. Vujanac R., Miloradovic N., Vulovic S. Dynamic storage systems // ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering. 2016; XIV: 79-82.

12. Носко А. Л., Сафронов Е. В. Методика расчета тормозного ролика центробежного типа применительно к гравитационным роликовым конвейерам для паллет // Механизация строительства. 2017. Том 78. № 6. С. 26–31.

13. Nosko, A.L., Tarasiuk, W., Sharifullin I.A., Safronov, E.V. Tribotechnical and Ecological Evaluation of Friction Pairs of Brake Devices in Lifting and Transport Machines // Journal of Friction and Wear. 2020; 41(4): 347 – 353.

14. Шарифуллин И.А., Носко А.Л., Сафронов Е.В. Математическая модель процесса движения паллеты по тормозному ролику магнитного типа // Вестник СибАДИ. 2020. Том 17. № 3. С. 364–373.

15. Озолин А.Ю., Скубов Д.Ю., Штукин Л.В. Способы торможения падающего лифта с помощью постоянных магнитов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2008. № 6 (70). С. 82–86.

16. Лускань О.А. Определение скорости транспортирования штучных грузов на инерционном роликовом конвейере // Изв. ТулГУ. Подъемно-транспортные машины и оборудование. ТулГУ. 2003. №. 4. С. 84–89.

17. E. Simeu, D. Georges. Modeling and control of an eddy current brake // Control Engineering Practise. 1996. Vol.4. No.1. Pp. 19-26.

18. Озолин А.Ю., Скубов Д.Ю., Штукин Л.В. Исследование вихретокового дискового тормоза // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2009. № 1 (74). С. 57–60.

19. Hollowell, Thomas Culver; Kahl, Justin Tyme; Stanczak, Matthew Don; Wang, Yizhou. Eddy Current Brake Design for Operation with Extreme Back-drivable Eddy Current Motor // Mechanical Engineering Undergraduates, 2010.

20. Andrew H. C. Gosline, Vincent Hayward. Eddy Current Brakes for Haptic Interfaces: Design, Identification, and Control // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2008. Vol.13. No.6. Pp. 669-677.

21. Sharifullin I., Nosko A., Safronov E., Kirillov D. Experimental study of eddy current braking applicable to gravity roller conveyor // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2020; 342 (4-1): 106-116.

22. Sharifullin I., Safronov E., Nosko A., Potapov V. Device for resource testing of brake rollers of gravity conveyors. // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2018. Vol. 330. No. 4-2. Pp. 161-167.

23. L. Ghomri, Z. Sari. Mathematical modeling of the average retrieval time for flow-rack automated storage and retrieval systems // J. Manuf. Syst. 2017. Vol. 44. Pp. 165-178.

24. Safronov E., Nosko A. A Method to Determine Allowable Speed for a Unit Load in a Pallet Flow Rack // Acta Mechanica et Automatica. 2019. Vol. 13. No. 2. Pp. 80-85.

25. Thompson M.T. Permanent magnet electrodynamic brakes design principles and scaling laws // Online Symposium for Electrical Engineers. 2009.

26. Quan Zhou, Xuexun Guo, Gangfeng Tan, Xiaomeng Shen, Yifan Ye, Zhaohua Wang. Parameter Analysis on Torque Stabilization for the Eddy Current Brake: A Developed Model, Simulation, and Sensitive Analysis // Mathematical Problems in Engineering. 2015. 10 p.

REFERENCES

1. Boslovyak P. V., Lagerev A. V. Optimization of the conveyor transport cost // IFAC-PapersOnLine. 2019; 52 (25): 397-402.

2. Derhami, S., Smith, JS., Gue, KR. Optimising space utilisation in block stacking warehouses // Int J Of Prod Res. 2017; 55(21): 6436-6452.

3. Ghalehkhondabi, I., Masel, DT. Storage allocation in a warehouse based on the forklifts fleet availability // Journal of Algorithms & Computational Technology. 2018; 12(2): 127-135.

4. Heragu, SS., Cai, X., Krishnamurthy, A., Malmborg, CJ. Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems // Int J Of Prod Res. 2011; 49(22): 6833-6861.

5. Sulirova, I., Zavodska, L., Rakyta, M., Pelantova, V. State-of-the-art approaches to material transportation, handling and warehousing // 12th International scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport, Procedia Engineering. 2017; 192: 857-862.

6. Boysen, N., Boywitz, D., Weidinger, F. Deep-lane storage of time-critical items: one-sided versus two-sided access // OR Spectrum. 2018; 40(4): 1141-1170.

7. Boywitz, D., Boysen, N. Robust storage assignment in stack- and queue-based storage systems // Computers & Operations Research. 2018; 100: 189-200.

8. Accorsi, R., Baruffaldi, G., Manzini, R. Design and manage deep lane storage system layout. An iterative decision-support model // Int J Adv Manuf Technol. 2017; 92(1-4): 57-67.

9. Eo, J., Sonico, J., Su, A., Wang, W., Zhou, C., Zhu, Y., Wu, S., Chokshi, T. Structured comparison of pallet racks and gravity flow racks // IIE Annual Conference and Expo. 2015: 1971-1980.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

10. Wu S., Wu Ya., Wang Ya. A structured comparison study on storage racks system // Journal of Residuals Science & Technology. 2016; 13(8).

11. Vujanac R., Miloradovic N., Vulovic S. Dynamic storage systems // ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering. 2016; XIV: 79-82.

12. Nosko A. L., Safronov E. V. Metodika rascheta tormoznogo rolika tsentrobezhnogo tipa primenitel'no k gravitatsionnym rolikovym konveyyeram dlya pallet [Calculation method of the centrifugal type brake roller as applied to gravity roller conveyors for pallets]. Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2017; 78; 6: 26-31 (in Russian).

13. Nosko, A.L., Tarasiuk, W., Sharifullin I.A., Safronov, E.V. Tribotechnical and Ecological Evaluation of Friction Pairs of Brake Devices in Lifting and Transport Machines // Journal of Friction and Wear. 2020; 41 (4): 347 – 353.

14. Sharifullin I.A., Nosko A.L., Safronov E.V. Matematicheskaja model' processa dvizhenija pallety po tormoznomu roliku magnitnogo tipa [Mathematical model of the motion pallet process on brake magnetic type rolle]r // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020; 17 (3): 364-373. (in Russian)

15. Ozolin A.U., Skubov D.U., Shtukin L.V. Sposoby tormozheniya padayushchego lifta s pomoshch'yu postoyannykh magnitov [Methods of braking a falling elevator with the help of permanent magnets]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. 2008; 6 (70): 82-86 (in Russian).

16. Luskan' O.A. Opredeleniye skorosti transportirovaniya shtuchnykh gruzov na inertsionnom rolikovom konveyyer [Determining the speed of transportation of piece goods on an inertial roller conveyor]. Izv. TulGU. Pod"yemno-transportnyye mashiny i oborudovaniye. Tula: TulGU. 2003; 4: 84-89 (in Russian).

17. E. Simeu, D. Georges. Modeling and control of an eddy current brake // Control Engineering Practise. 1996; 4(1): 19-26.

18. Ozolin A.U., Skubov D.U., Shtukin L.V. Issledovaniye vikhretokovogo diskovogo tormoza [Research eddy current disc brake]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. 2009; 1 (74): 57-60 (in Russian).

19. Hollowell, Thomas Culver; Kahl, Justin Tyme; Stanczak, Matthew Don; Wang, Yizhou. Eddy Current Brake Design for Operation with Extreme Back-drivable Eddy Current Motor // Mechanical Engineering Undergraduates, 2010.

20. Andrew H. C. Gosline, Vincent Hayward. Eddy Current Brakes for Haptic Interfaces: Design, Identification, and Control // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2008; 13(6): 669-677.

21. Sharifullin I., Nosko A., Safronov E., Kirillov D. Experimental study of eddy current braking applicable to gravity roller conveyor // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2020; 342 (4-1): 106-116.

22. Sharifullin I., Safronov E., Nosko A., Potapov V. Device for resource testing of brake rollers of gravity conveyors. // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2018; 330 (4-2): 161-167.

23. L. Ghomri, Z. Sari. Mathematical modeling of the average retrieval time for flow-rack automated storage and retrieval systems // J. Manuf. Syst. 2017; 44:165-178.

24. Safronov E., Nosko A. A Method to Determine Allowable Speed for a Unit Load in a Pallet Flow Rack // Acta Mechanica et Automatica. 2019; 13(2): 80-85.

25. Thompson M.T. Permanent magnet electrodynamic brakes design principles and scaling laws // Online Symposium for Electrical Engineers. 2009.

26. Quan Zhou, Xuexun Guo, Gangfeng Tan, Xiaomeng Shen, Yifan Ye, Zhaohua Wang. Parameter Analysis on Torque Stabilization for the Eddy Current Brake: A Developed Model, Simulation, and Sensitive Analysis // Mathematical Problems in Engineering. 2015: 10.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Шарифуллин И.А. Участвовал в проведении экспериментальных исследований по определению скорости движения паллеты по ТМР, выполнении расчетов, анализе полученных результатов, формировании выводов, выполнил обзор литературных источников (60%).

Носко А.Л. Участвовал в формировании направления исследования, разработке плана проведения экспериментальных исследований, анализе полученных результатов (20%).

Сафронов Е.В. Участвовал в постановке задачи исследования, получении расчетных зависимостей, анализе полученных результатов, формировании выводов (20%).

AUTHORS 'CONTRIBUTION

Ildar A. Sharifullin – participation in experimental studies to determine the speed of pallet movement along the TMP, calculations, analysis of the results, performed a review of references (60%).

Andrei L. Nosko – participation in the formation of the direction of research, the development of a plan for conducting experimental research, the analysis of the results (20%).

Evgenii V. Safronov – participation in the formulation of the research problem, obtaining calculated dependencies, the analysis of the results and the formation of conclusions (20%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шарифуллин Ильдар Азатович – Scopus Author ID 57218668810, ORCID 0000-0002-1930-2602, аспирант кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, тел. (499) 263–65–92, e-mail: sharifullin@bmstu.ru).

Носко Андрей Леонидович – д-р техн. наук, доц., Scopus Author ID 6507019256, ORCID 0000-0003-

1382-4095, проф. кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, тел. (499) 263–65–92, e-mail: nosko@bmstu.ru).

Сафронов Евгений Викторович – канд. техн. наук, Scopus Author ID 36943598600, ORCID 0000-0002-4250-7147, доц. кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, тел. (499) 263–65–92, e-mail: safronov@bmstu.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ildar A. Sharifullin – Scopus Author ID 57218668810, ORCID 0000-0002-1930-2602, Postgraduate of the Lifting and Transport Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, 2 Baumanskaia Street, 5, building 1, ph. (499) 263–65–92, e-mail: sharifullin@bmstu.ru).

Andrei L. Nosko – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Scopus Author ID 6507019256, ORCID 0000-0003-1382-4095, Professor of the Lifting and Transport Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, 2 Baumanskaia Street, 5, building 1, ph. (499) 263–65–92, e-mail: nosko@bmstu.ru).

Evgenii V. Safronov – Cand. of Sci. (Engineering), Scopus Author ID 36943598600, ORCID 0000-0002-4250-7147, Associate Professor of the Lifting and Transport Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, 2 Baumanskaia Street, 5, building 1, ph. (499) 263–65–92, e-mail: safronov@bmstu.ru).

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal