

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 24. Выпуск 1.

УДК 539.621

DOI 10.22405/2226-8383-2023-24-1-243-252

Эмпирическая математическая модель динамики изменения коэффициента трения полимерного композиционного материала по стали 20X13 в вакууме при ионной бомбардировке¹

А. Д. Бреки, А. О. Поздняков, С. Г. Чулкин, А. А. Москалец, В. А. Яхимович,
Е. Б. Седакова, А. Я. Башкарев, Е. А. Тарасенко, С. Н. Кутепов, О. В. Кузовлева

Бреки Александр Джалюльевич — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт проблем машиноведения РАН (г. Санкт-Петербург).

e-mail: albreki@yandex.ru

Поздняков Алексей Олегович — кандидат физико-математических наук, Институт проблем машиноведения РАН; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург).

e-mail: ao.pozd@mail.ioffe.ru

Чулкин Сергей Георгиевич — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; Институт проблем машиноведения РАН (г. Санкт-Петербург).

e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Москалец Артём Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: artem.moskalec@gmail.com

Яхимович Валерий Александрович — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: valera_spb@inbox.ru

Седакова Елена Борисовна — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; Институт проблем машиноведения РАН (г. Санкт-Петербург).

e-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Башкарев Альберт Яковлевич — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: bashkarev@spbstu.ru

Тарасенко Елена Александровна — кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: taraselen@mail.ru

Кутепов Сергей Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: kutepovsn@yandex.ru

¹Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» научного проекта: «Применение цифрового моделирования и больших данных для повышения эффективности механической обработки титановых лопаток паровых турбин и их эксплуатации в условиях каплеударной эрозии» № 22-19-00178.

Кузовлева Ольга Владимировна — кандидат технических наук, доцент, Российский государственный университет правосудия (г. Москва).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Аннотация

В статье приведена новая эмпирическая математическая модель динамики изменения коэффициента трения полимера по стали в вакууме при ионной бомбардировке, содержащая ряд новых триботехнических характеристик, которые позволяют более детально охарактеризовать фрикционное взаимодействие. Показана справедливость разработанной математической модели для описания трения материала АМАН по стали при переменном комплексе внешних условий.

Ключевые слова: математическая модель, трение, математическая модель, трение, самосмазывающийся материал, ионная бомбардировка, фрикционное взаимодействие, вакуум.

Библиография: 10 названий.

Для цитирования:

А. Д. Бреки, А. О. Поздняков, С. Г. Чулкин, А. А. Москалец, В. А. Яхимович, Е. Б. Седакова, А. Я. Башкарев, Е. А. Тарасенко, С. Н. Кутепов, О. В. Кузовлева. Эмпирическая математическая модель динамики изменения коэффициента трения полимерного композиционного материала по стали 20X13 в вакууме при ионной бомбардировке // Чебышевский сборник, 2023, т. 24, вып. 1, с. 243–252.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 24. No. 1.

UDC 539.621

DOI 10.22405/2226-8383-2023-24-1-243-252

Empirical mathematical model of the dynamics of change in the coefficient of friction of a polymer composite material on steel 20X13 in vacuum during ion bombardment²

A. D. Breki, A. O. Pozdnyakov, S. G. Chulkin, A. A. Moskalets, V. A. Yakhimovich, E. B. Sedakova, A. Ya. Bashkarev, E. A. Tarasenko, S. N. Kutepov, O. V. Kuzovleva

Breki Alexander Dzhalyulevich — doctor of technical sciences, professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Institute of Problems of Machine Science of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg).

e-mail: albreki@yandex.ru

Pozdnyakov Aleksey Olegovich — candidate of physical and mathematical sciences, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS; Ioffe Institute of the RAS (St. Petersburg).

e-mail: ao.pozd@mail.ioffe.ru

Chulkin Sergey Georgievich — doctor of technical sciences, professor, St. Petersburg State Marine Technical University; Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg).

²The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation for the priority area of activity of the Russian Science Foundation "Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by individual scientific groups to the scientific project: «Application of digital modeling and big data to improve the efficiency of mechanical processing of titanium steam turbine blades and their operation under conditions of drop impact erosion» № 22-19-00178.

e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Moskalets Artem Anatolyevich — candidate of technical sciences, associate professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg).

e-mail: artem.moskalec@gmail.com

Yakhimovich Valery Alexandrovich — postgraduate student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg).

e-mail: valera_spb@inbox.ru

Sedakova Elena Borisovna — doctor of technical sciences, professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg).

e-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Bashkarev Albert Yakovlevich — doctor of technical sciences, professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg).

e-mail: bashkarev@spbstu.ru

Tarasenko Elena Aleksandrovna — candidate of technical sciences, associate professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg)

e-mail: taraselen@mail.ru

Kutepov Sergey Nikolaevich — candidate of pedagogical sciences, associate professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Kuzovleva Olga Vladimirovna — candidate of technical sciences, associate professor, Russian State University of Justice (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Abstract

The article presents a new empirical mathematical model of the dynamics of change in the coefficient of friction of a polymer on steel in a vacuum during ion bombardment, which contains a number of new tribological characteristics that allow a more detailed characterization of the frictional interaction. The validity of the developed mathematical model for describing the friction of the AMAN material on steel under a variable set of external conditions is shown.

Keywords: mathematical model, friction, mathematical model, friction, self-lubricating material, ion bombardment, frictional interaction, vacuum.

Bibliography: 10 titles.

For citation:

A. D. Breki, O. A. V. A. Pozdnyakov, S. G. Chulkin, A. A. Moskalets, Yakhimovich, E. B. Sedakova, A. Ya. Bashkarev, E. A. Tarasenko, S. N. Kutepov, O. V. Kuzovleva, 2023, "Empirical mathematical model of the dynamics of change in the coefficient of friction of a polymer composite material on steel 20X13 in vacuum during ion bombardment", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 24, no. 1, pp. 243–252.

1. Введение

Пластики типа АМАН представляют собой многокомпонентные системы, в которых в качестве связующего использованы полимеры, а в качестве наполнителя в их состав входят твёрдые смазки со слоистой структурой [1, 6].

В работе [1]: «Проанализированы недостатки применения жидких и пластичных смазочных материалов в шарнирных соединениях лесных манипуляторов. Рассмотрена возможность применения неметаллических антифрикционных материалов, которые интенсифицируют эффект избирательного переноса. Определены основные требования, которые должны предъявляться к антифрикционным материалам данных узлов трения. В качестве смазочного материала предлагается использовать самосмазывающиеся антифрикционные пластики типа АМАН.

Дана краткая характеристика пластиков и возможности их работы в шарнирных соединениях технологического оборудования лесозаготовительных и лесохозяйственных машин». В работе [1] отмечается, что: «существует несколько классов перспективных антифрикционных материалов, которые возможно использовать в шарнирных соединениях, например, лесных манипуляторов. К ним относятся полимеры (полиамиды, полиформальдегиды, полиуретаны и т.д.), антифрикционные пластики типа АМАН (ЭСТЕРАН, ТЕСАН, ВИЛАН), материалы на основе древесины, ленточные (слоистые) материалы, углеграфитные материалы, металлокерамические материалы». В источнике [1]: «Для изготовления антифрикционной втулки из всех рассмотренных типов и классов антифрикционных материалов после сравнения их физических, химических и физико-механических свойств были выбраны самосмазывающиеся антифрикционные пластики типа АМАН. Такой выбор предопределяет то, что они имеют достаточно высокий предел прочности (80-100 МПа) [2]», низкий коэффициент трения по стали [8], бензо- и маслостойки, вибропрочны, не боятся влаги. Эти пластики значительно дешевле и менее дефицитны, чем цветные сплавы [3]».

В работе [4]: «рассматривается возможность использовать в качестве антифрикционного материала в подшипниках скольжения шарнирных узлов жесткого сцепного устройства самосмазывающиеся антифрикционные пластики типа АМАН. Для этого проводится анализ величины температуры трения, возникающей при их работе». Известно [4], что: «На железнодорожном транспорте широкое распространение получил такой вид автосцепки, как шарнирный узел жесткого сцепного устройства. В их конструкцию входят шарнирные соединения, которые являются слабым местом [5]. Важным фактором, который объяснял бы низкую износостойкость трущихся поверхностей, является несовершенство их смазки. В случае смазывания этих узлов трения под действием давления происходит выдавливание смазки, что, как следствие, приводит к быстрому износу узлов трения, а также дополнительным вибрациям, ударам, повышению нагрузки на рабочий узел, и, как следствие, преждевременному выходу детали из строя. Для того, чтобы исключить эти недостатки предлагается использовать в качестве антифрикционного материала в подшипниках скольжения шарнирных узлов жесткого сцепного устройства самосмазывающиеся антифрикционные пластики типа АМАН».

В настоящее время АМАНы ещё не достаточно массово используются для создания узлов трения. При этом давно известны их хорошие антифрикционные и противоизносные свойства. Коэффициент трения в паре АМАН-сталь изменяется во времени по сложным зависимостям, для которых в настоящее время ещё не создано соответствующих математических моделей, в том числе для условий вакуума и ионной бомбардировки. В связи с этим, в границах данной работы, предлагается новая математическая модель, описывающая закономерности влияния вакуума и ионной бомбардировки на трение скольжения материала АМАН по стали 20Х13.

2. Основной текст статьи

В работах [9, 10] предложена следующая математическая модель, которая была использована для описания динамики изменения силы трения (во времени):

$$F_f(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_{fi}}{1 + \exp(-\Psi_{ti} \cdot (t - t_{\Omega i}))}, \quad (1)$$

где ΔF_{fi} — приращение силы трения от одного стационарного значения к другому при i -м переходном процессе; Ψ_{ti} — резкость фрикционного перехода (по времени) от одного режима трения к другому при i -м переходном процессе; $t_{\Omega i}$ — критическое значение времени при i -м переходном процессе; n — количество переходных процессов. Для описания более сложных переходных процессов в числителе (1) будет стоять $\Delta F_{fi}(t) \neq const$ некоторая функция времени.

Анализ данных работы [7] позволил предположить, что зависимость коэффициента трения от времени при трении АМАН по стали как на воздухе, так и в вакууме в условиях ионной бомбардировки, может быть представлена в виде (2):

$$f_{LA} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta f_{LAi}}{1 + \exp(-\Psi_{ti} \cdot (t - t_{\Omega i}))}, \quad (2)$$

где Δf_{LAi} — приращение классического коэффициента трения (Леонардо да Винчи-Амонтона) от одного стационарного значения к другому при i -м переходном процессе (классический коэффициент трения обычно обозначают просто буквой f).

В работе [7] Акишиным А.И., Троянской Г.И., Исаевым Л.Н., Сергеевой Л.М., Андреевой М.Г., Марченко Е.А., Алексеевым Н.М. получены зависимости коэффициента трения в паре АМАН — сталь 20Х13 от времени на воздухе и в вакууме при ионной бомбардировке. Условия испытаний: скольжение колодки из стали 2Х13 по ролику из АМАН со скоростью 1,2 м/с, при нагрузке 10Н, продолжительность испытания 10 ч. Образцы: цилиндр из материала АМАН; колодка из стали 20Х13. Исследование влияния ионной бомбардировки при энергии молекулярных ионов водорода $E = 3\text{кэВ}$ и плотности потока 108 ионов/см²с на коэффициент трения авторы производили на стандартной масс-спектрометрической установке типа МС-3.

Авторами [7] установлены зависимости коэффициента трения от времени в графическом виде, однако не было найдено их аналитического представления.

В данной работе реализована точная оцифровка графиков из работы [7] и осуществлена аппроксимация выявленных точек с использованием предложенной формулы (2).

На рисунке 1 показаны точки, полученные при оцифровке графика [7] для трения материала АМАН по стали 20Х13 без облучения, и соответствующий график аппроксимирующей функции.

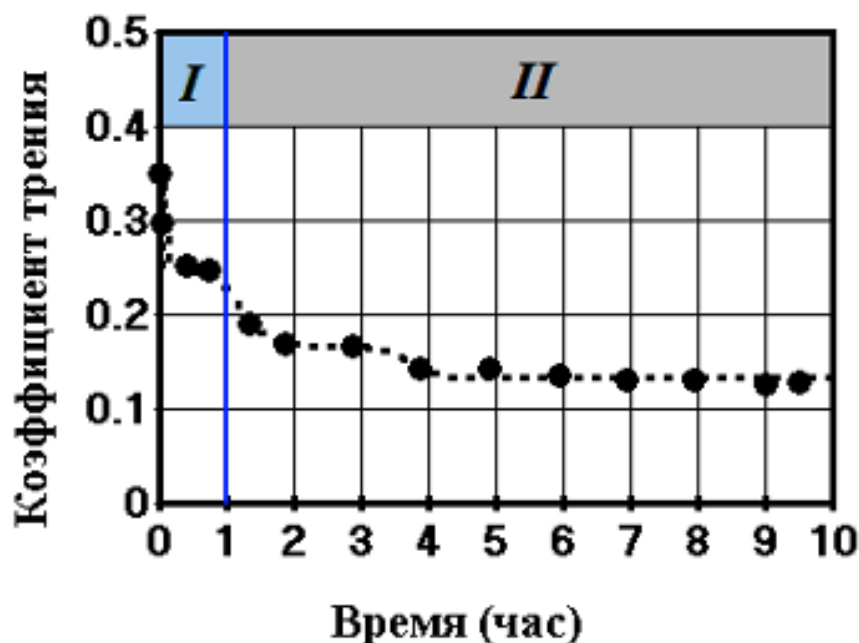


Рис. 1: Зависимости коэффициента трения от времени для трения материала АМАН по стали 20Х13 без облучения: I — на воздухе; II — в вакууме

Аналитически, зависимость коэффициента трения от времени для трения материала АМАН по стали 20Х13 без облучения (рис. 1) выражается формулой:

$$f_{LA} = \frac{0,35}{1 + \exp(-139t)} - \frac{0,1}{1 + \exp(-50(t - 0,1))} - \frac{0,083}{1 + \exp(-5(t - 1,2))} - \frac{0,034}{1 + \exp(-5(t - 3,7))}. \quad (3)$$

Исследование функции (3) показывает, что максимальное значение коэффициента трения составляет 0,34 и достигается в среде воздуха в момент времени приблизительно 2,3 мин, после чего он начинает снижаться в течение 1 часа на воздухе и продолжает уменьшаться в вакууме в продолжении 9 часов. Интегрирование (3) по всему интервалу от 0 до 10 часов и деление полученного результата на длину данного интервала времени даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,156.

На рисунке 2 показаны точки, полученные при оцифровке графика [7] для трения материала АМАН по стали 20Х13 с облучением, и соответствующий график аппроксимирующей функции.

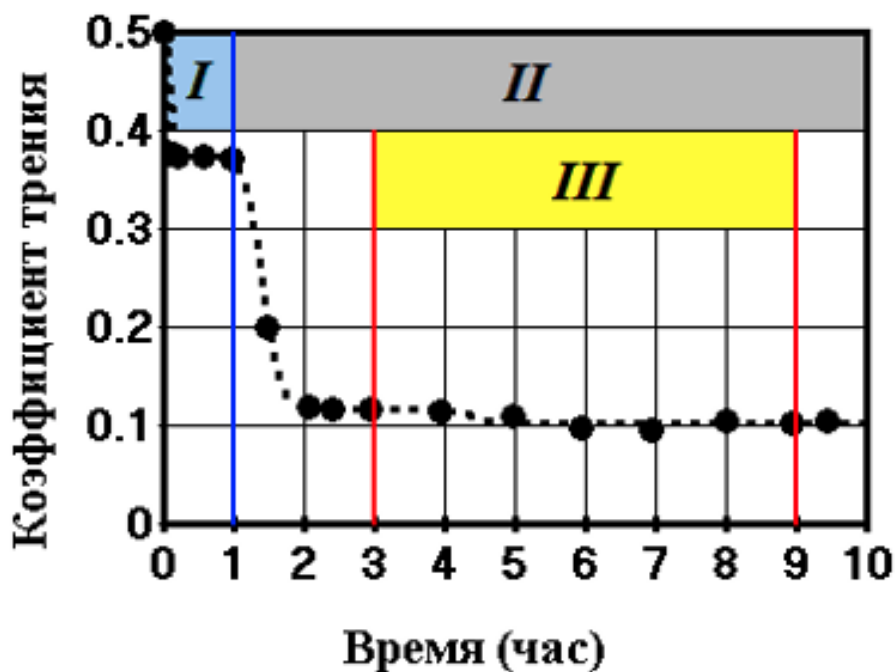


Рис. 2: Зависимости коэффициента трения от времени для трения материала АМАН по стали 20Х13 с облучением: I – на воздухе; II – в вакууме, III – с облучением

Аналитически, зависимость коэффициента трения от времени для трения материала АМАН по стали 20Х13 с облучением (рис. 2) выражается формулой:

$$f_{LA} = \frac{0,5}{1 + \exp(-130t)} - \frac{0,125}{1 + \exp(-50(t - 0,1))} - \frac{0,259}{1 + \exp(-8(t - 1,4))} - \frac{0,0129}{1 + \exp(-8(t - 4,4))}. \quad (4)$$

Исследование функции (4) показывает, что максимальное значение коэффициента трения составляет 0,49 и достигается в среде воздуха в момент времени приблизительно 2,46 мин, после чего он начинает снижаться в течение 1 часа на воздухе и продолжает уменьшаться в вакууме в продолжении 9 часов, в том числе в условиях ионной бомбардировки. Интегрирование (4) по всему интервалу от 0 до 10 часов и деление полученного результата на длину данного интервала времени даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,146.

Интегрирование (3) по интервалу от 3 до 9 часов (вакуум) и деление полученного результата на длину данного интервала времени даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,14. Интегрирование (4) по интервалу от 3 до 9 часов (вакуум с ионной бомбардировкой) и деление полученного результата на длину данного интервала времени даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,106. Полученные данные очень хорошо согласуются со средними значениями коэффициента трения, полученными в работе [7].

Зависимости интенсивности изменения коэффициента трения во времени без облучения и с облучением в вакууме показаны на рисунке 3, 4.

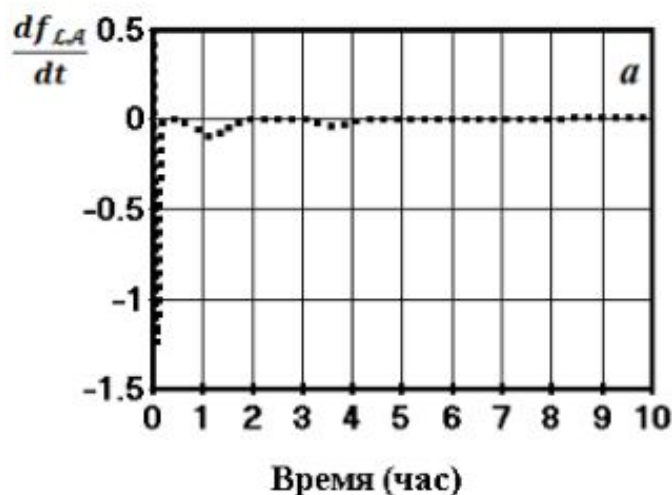


Рис. 3: Зависимости интенсивности изменения коэффициента трения во времени без облучения

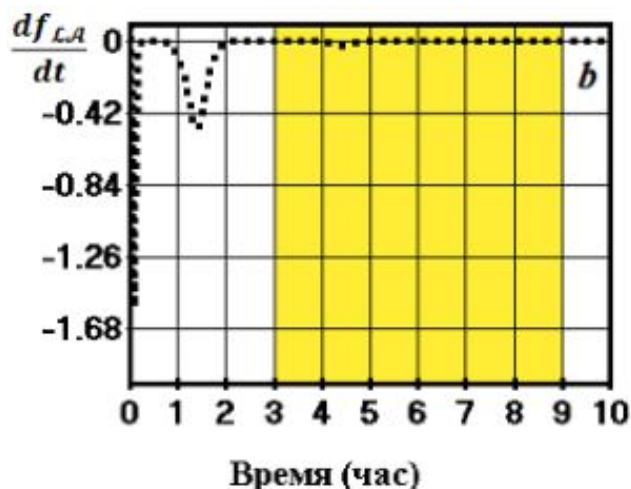


Рис. 4: Зависимости интенсивности изменения коэффициента трения во времени с облучением в вакууме

Максимумы и минимумы функций, графики которых показаны на рисунках 3, 4, приведены в таблице.

	Без облучения		С облучением	
	t, ч	$\frac{df_{LA}}{dt}, \text{ ч}^{-1}$	t, ч	$\frac{df_{LA}}{dt}, \text{ ч}^{-1}$
min	0.10001	-1.25164	0.10001	-1.56242
max	0.28787	-0.00467	0.32995	$-4.6 \cdot 10^{-4}$
min	1.2	-0.10375	1.4	-0.518
max	2.53997	-0.00102	3.08748	$-1 \cdot 10^{-5}$
min	3.69999	-0.0425	4.4	-0.0258

Из приведённых графиков и таблицы видно, что в обоих случаях имеют место быть скачкообразные изменения интенсивности коэффициента трения, вместе с тем, на интервале времени соответствующем ионной бомбардировке интенсивности изменения коэффициента трения близка либо равна нулю.

Таким образом, ионная бомбардировка не обуславливает колебания коэффициента трения при изменении состояния фрикционного контакта. Вместе с тем, облучение способствует снижению коэффициента трения на 24%, что может быть связано с рекристаллизацией, радиационным наклёпом, сшиванием цепи молекул и т.д. [7].

3. Заключение

В результате проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведённый анализ экспериментальных результатов показывает справедливость предложенной формулы (2), описывающей зависимость коэффициента трения от времени при фрикционном взаимодействии материала АМАН со сталью в воздушной среде, вакууме и при ионной бомбардировке.
2. В разработанной математической модели введён ряд новых триботехнических характеристик, которые позволяют более детально охарактеризовать фрикционное взаимодействие в системе «АМАН-сталь».
3. Предложенная модель описывает изменение коэффициента трения при целенаправленном изменении внешних условий воздействия на пару трения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серебрянский А.И. Обоснование выбора антифрикционных материалов для узлов трения технологического оборудования лесозаготовительных машин / А. И. Серебрянский // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2006. № 3. С. 107-108.
2. Трение, изнашивание и смазка: справочник / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. Т.1. М.: Машиностроение, 1978. 400 с.
3. Башкарев А.Я. Пластмассы в строительных и землеройных машинах / А.Я. Башкарев и др. – Л.: Машиностроение, 1981. 191 с.
4. Богатырева Ж.И. Оценка температуры трения подшипников скольжения / Ж. И. Богатырева // Транспорт: наука, образование, производство. Воронеж, 2020. С. 218-221.

5. Шевченко В.П. Восстановление шарнирных соединений лесосечных машин электродуговой металлизацией. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Химки, 1986. 20 с.
6. Серебрянский А.И. Методика и результаты исследований температуры трения в шарнирах лесных манипуляторов / А.И. Серебрянский, В.В. Абрамов, Д.А. Канищев // Лесотехнический журнал. 2014. Т. 4. № 1(13). С. 189-194. DOI 10.12737/3368.
7. Акишин А.И., Трояновская Г.И., Исаев Л.Н., Сергеева Л.М., Андреева М.Г., Марченко Е.А., Алексеев Н.М. Поведение пар трения и некоторых самосмазывающихся материалов в вакууме при ионной бомбардировке / Теория трения и износа // Акад. наук СССР. Науч. совет по трению и смазкам. М.: Наука, 1965. С. 285-289.
8. Decarburization and the Influence of Laser Cutting on Steel Structure / N.N. Sergeev, I.V. Minaev, A.E. Gvozdev [et al.] // Steel in Translation. 2018. Vol. 48. No 5. P. 313-319. DOI 10.3103/S096709121805008X.
9. Бреки А.Д. Триботехнические характеристики материалов пар трения и смазочных сред в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.04 / Бреки Александр Джалюльевич; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»]. Санкт-Петербург, 2021. 378 с.
10. Бреки А.Д. Триботехнические характеристики материалов пар трения и смазочных сред в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта: автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.02.04 / Бреки Александр Джалюльевич; [Место защиты: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого]. - Санкт-Петербург, 2021. 43 с.

REFERENCES

1. Serebryansky A.I., 2006, «*Substantiation of the choice of antifriction materials for friction units of technological equipment of logging machines*», Bulletin of the Moscow State Forest University – Forest Bulletin, № 3. pp. 107-108.
2. *Friction, wear and lubrication: a handbook* / Ed. I.V. Kragelsky and V.V. Alice. T.1. M.: Mashinostroenie, 1978., 400 p. Demkin N.B., Ryzhov E.V., 1981, Surface quality and contact of machine parts. M.: Mashinostroenie, 224 p.
3. Bashkarev A.Ya. *Plastics in construction and earth-moving machines*. L.: Mashinostroenie, 1981. 191 p.
4. Bogatyreva Zh.I. 2020, «Evaluation of the friction temperature of plain bearings», *Transport: science, education, production*. Voronezh. pp. 218-221.
5. Shevchenko V.P. Restoration of hinged joints of logging machines by electric arc plating. Abstract diss. ...cand. tech. Sciences. Khimki, 1986. 20 p.
6. Serebryansky A.I., Abramov V.V., Kanishchev D.A. 2014, «Methods and results of research of friction temperature in the hinges of forest manipulators», *Forestry journal*. V.4. № 1(13). pp. 189-194. DOI 10.12737/3368.
7. Akishin A.I., Troyanovskaya G.I., Isaev L.N., Sergeeva L.M., Andreeva M.G., Marchenko E.A., Alekseev N.M. 1965, «*Behavior of friction pairs and some self-lubricating materials in vacuum under ion bombardment*», *Theory of friction and wear* // Acad. sciences of the USSR. Scientific advice on friction and lubrication. M.: Nauka, pp. 285-289.

8. Sergeev N.N., Minaev I.V., Gvozdev A.E. 2018, «Decarburization and the Influence of Laser Cutting on Steel Structure», *Steel in Translation*, Vol.48. № 5. pp. 313-319. DOI 10.3103/S096709121805008X.
9. Breki A.D. 2021, *Tribological characteristics of materials of friction pairs and lubricating media under conditions of spontaneous changes in the states of friction contact*: dissertation . . . Doctor of Technical Sciences: 05.02.04 / Breki Alexander Dzhalevich; [Place of defense: FGAOU VO «St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great»]. St. Petersburg., 2021, 378 p.
10. Breki A.D. 2021, *Tribotechnical characteristics of materials of friction pairs and lubricating media under conditions of spontaneous changes in the states of friction contact*: Abstract of the thesis. . . Doctor of Technical Sciences: 05.02.04 / Alexander Dzhalyulyevich Breki; [Place of defense: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. St. Petersburg., 2021, 43 p.

Получено: 23.12.2022

Принято в печать: 24.04.2023