

К РАЗРАБОТКЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТОРСИОННОГО МАЯТНИКА

ТАРАСОВ В. В., ЧУРКИН А. В., КАЛЕНТЬЕВ Е. А.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

АННОТАЦИЯ. Приведен обзор способов и конструкций установок для испытания фрикционных характеристик различных изделий, состоящих из элементов типа канатов, проволоки, волокон, нитей и т.п. Часть из них относится к витым, а другие к более общей группе – гибким телам (ремни, ленты, кабели), где оценка взаимодействия между отдельными элементами составляющих изделие также представляет практический интерес. В результате изучения некоторых конструкций установок и способов тестирования перечисленных выше объектов на основе, главным образом, патентных материалов, и проведенного анализа обоснованно выбрана схема испытаний с использованием торсионного (крутильного) маятника для определения фрикционных свойств смазок, применительно к стальным канатам. Дано описание установки для реализации выбранной схемы испытаний. Сбор информации о колебаниях осуществляется программным обеспечением ПО «PowerGraph» с использованием инкрементного датчика угла поворота.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: смазочные материалы, испытание канатов, фрикционные характеристики, программное обеспечение «PowerGraph».

ВВЕДЕНИЕ

В узлах и устройствах современной техники находят широкое применение различные гибкие звенья типа канатов (проволоки), кабелей, синтетических тросов, лент, скрученных прядей нитей и других подобных изделий. Исходя из функционального назначения, эти звенья могут конструктивно выполняться в виде свитых, т.е. сплетенных между собой, скрученных или спиралеобразных поликомпонентных элементов. Отдельные компоненты внутри свитых изделий, например, пряди стального каната, жилы кабеля и т.д., при эксплуатации смещаются относительно друг друга и находятся в активном фрикционном взаимодействии, что вызывает их изнашивание, снижает прочность, повышает вероятность разрушения (обрыва) и влияет на надежность всего изделия в целом.

Общеизвестным способом оценки эффективности различных смазочных материалов являются сравнительные испытания ряда выбранных смазок в идентичных условиях с фиксацией энергосиловых затрат при использовании известных критериев, например, коэффициента или силы трения, величины износа трибосопряжения, характеристик стабильности процесса (наличия фрикционных/автоколебаний колебаний, уровня температур в контактной зоне) и т.п. Одна из смазок в этом случае может быть использована в качестве условного эталона, по отношению к которому экспериментально определяется эффективность остальных смазочных материалов.

Помимо условий смазки трение между элементами зависит, прежде всего, от характера напряженно-деформированного состояния, температурного и эксплуатационного режима работы (статический, динамический, циклический), параметров внешней среды и др. Также значительное влияние оказывает и конструкция самого витого изделия: местонахождение и состав каждого элемента (проволоки, пряди и т.д.) каната, способа свивки (односторонняя, крестовая, комбинированная; одно- и многопрядная), различие схем контактирования (точечное или линейное касание), соотношения геометрических параметров элементов и физико-механические характеристики применяемых материалов и т.д. В данном случае, принимая во внимание невозможность и нецелесообразность теоретического расчета фрикционных характеристик (силы и коэффициента трения между элементами внутри свитых изделий) с учетом всех перечисленных выше параметров и условий, очевидно, что для решения этой задачи актуально применение экспериментальных методов.

Таким образом, целью настоящей работы является обоснование, выбор и разработка способа и конструкции установки для оценки эффективности смазочных материалов к витым стальным канатам.

Отметим, что в практике технических приложений к настоящему времени нет единых способов контроля трибологических свойств даже для канатов простых конструкций с десятками контактных зон, и тем более, для сложных многослойных, где их количество исчисляется сотнями. Для случаев с единичными гибкими элементами такие подходы известны [1 – 3].

Прямые решения реализуются, например, в устройствах, состоящих из двух прижимных плит, сжатых нагрузкой P , между которыми перемещается гибкое тело (канат, проволока, ремень и т.п.), т.е. здесь для определения коэффициента трения нормальная сила (нагрузка) задается извне исходя из априорной информации [2]. Однако специфической особенностью трения гибких тел является сложность измерения именно нормальной нагрузки в контакте, т.е. ее величина и является неизвестной. Кроме того, значение нагрузки в процессе скольжения может заметно изменяться в зависимости от колебания силы протягивания.

Принципиально также, что наличие трения одновременно по двум поверхностям гибкого тела не является типичным случаем для устройств и механизмов, где применяются передачи с гибкой связью. Поэтому такой способ может быть использован только для ориентировочных оценок фрикционных характеристик в зоне трения. Аналогичный прием используется и для случаев оценки фрикционных свойств применительно к несвитым волокнам [4].

Вариант с приложением сил трения с одной стороны гибкого тела предложен Муром Д. [5], где нагрузка гибкому телу (плоскому ремню) задается с помощью пневматической системы наддува, однако и здесь нормальная нагрузка, как и в предыдущем случае [2], по сути не отвечает действительным условиям нагружения фрикционных передач.

В устройствах, представленных в работах [3, 6], предложены схемы количественного определения характеристик трения фрикционных гибких тел (нить, ремень, лента, канат), применяемых в различных фрикционных передачах разных областей назначения (ременные передачи, текстильные и швейные машины, ленточные транспортеры и круговые пилорамы с замкнутой ленточной пилой, кабельное и трикотажное производство и др.). Причем здесь нормальная сила в контакте формируется естественным образом за счет осевого растяжения гибкого элемента в трибосопряжении, как это происходит в реальных конструкциях.

Известен также способ [1], используемый для оценки фрикционных характеристик отдельных элементов, расположенных непосредственно внутри свитого изделия, где коэффициент трения предлагается рассчитывать по Эйлеру в соответствии с результатами измерения силы трения при вытягивании (извлечении) единичного элемента (токопроводящей жилы кабеля – ТПЖ) после предварительного растяжения свитого изделия (многожильного кабеля), при этом учитывается длина и шаг свивки кабеля. Вытягивание элемента из оболочки сборного кабельного изделия приводит к его разрушению. Важно и то, что как отмечают авторы этого способа [7, 8]: «В кабельных изделиях не определены сжимающие усилия оболочки кабеля и воздействия элементов друг на друга», т.е. задача решается лишь частично. Поэтому способ имеет ограниченную область применения – главным образом для оценки фрикционных характеристик применительно к кабельному производству, однако для изделий типа стальных канатов, имеющих более сложную и разнообразную номенклатуру и варианты конструкций, он малоэффективен. В частности это касается случаев подбора смазочных материалов для эксплуатации стальных канатов.

В работах Хромова О.В. [9, 10] приводится иной принцип диагностики применительно к стальным канатам, здесь оценка интересующих параметров производится через анализ затухающих колебания при осевом нагружении исследуемого изделия. Такой прием оправдан для случаев оценки демпфирующих свойств «упругих связей в машинах, реализующих процессы сматывания или наматывания длинномерных изделий (намоточные

станки и канатовьющие машины)» в околорезонансных режимах. Подобные режимы имеют значение для достаточно узкого класса технологического оборудования, но сам принцип имеет перспективы дальнейшего применения. В рамках предложенного метода автор не изучал влияния фрикционных процессов на характеристики «внутреннего трения» стальных спиральных канатов.

Авторы настоящей статьи также использовали физический принцип, основанный на анализе затухающих колебаний системы, но для схемы с торсионным (крутильным) маятником [11]. Способ реализуется следующим образом.

Гибкий элемент (канат, прядь и т.п.) обрабатывают эталонным смазочным материалом, также допускается использовать и необработанный, так называемый «сухой» образец. Прикладывают первоначальное вертикальное осевое усилие путем закрепления на образце груза массой M , а также вводят дополнительное силовое воздействие, в виде момента кручения свободного конца каната на некоторый угол φ , постоянный для каждого эксперимента, затем воздействие снимают. Под действием упругих сил канат будет стремиться занять исходное состояние равновесия. При этом регистрируют отклик системы в виде затухающих возвратно-крутильных колебаний и вычисляют его логарифмический декремент затухания по известной зависимости:

$$\mathcal{G}_{эм} = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta T,$$

где $\mathcal{G}_{эм}$ – логарифмический декремент затухания для эталонного образца; $A(t)$ – амплитуда колебаний в момент времени t ; $A(t+T)$ – амплитуда колебаний в момент времени $t+T$; δ – коэффициент затухания; T – период колебаний.

Затем повторяют эксперимент с аналогичным образцом, обработанным смазочным материалом №1, далее смазочным материалом №2 и т.д., в каждом случае ведется регистрация картины затухающих колебаний с определением логарифмического декремента затухания $\mathcal{G}_{№1}, \mathcal{G}_{№2}, \dots, \mathcal{G}_{№n}$.

В качестве критерия фрикционных характеристик смазочных материалов используется отношение логарифмических декрементов затухания к логарифмическому декременту затухания эталонного образца

$$\frac{\mathcal{G}_{№1}}{\mathcal{G}_{эм}}, \frac{\mathcal{G}_{№2}}{\mathcal{G}_{эм}}, \dots, \frac{\mathcal{G}_{№n}}{\mathcal{G}_{эм}},$$

где n – количество исследуемых образцов смазочных материалов.

Очевидно, что чем меньше величина отношения логарифмических декрементов затухания, тем лучше фрикционные характеристики смазочного материала по сравнению с эталоном. Для оценки смазочных материалов между собой можно использовать прямое сравнение логарифмических декрементов затухания.

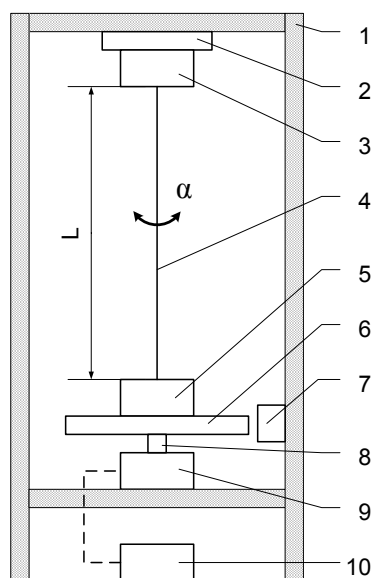
Возможность применения торсионного маятника проверена авторами экспериментально на упрощённом макетном варианте установки, включая испытания смазок при низких температурах [12, 13]. Полученные при этом результаты были качественно подтверждены при сравнительных испытаниях канатов на выносливость (долговечность) с теми же смазками на пробной машине [14].

Схема испытаний с использованием торсионного маятника нашла свое применение и в исследовании механизма трения для нанотрибоконтактов при моделировании взаимодействия иглы АСМ (атомно-силового микроскопа) с атомарно-гладкой поверхностью в режиме измерения латеральных сил (торсионный изгиб кантилевера), действующих на вольфрамовый зонд [15].

Приведённый краткий обзор способов и средств оценки эффективности смазочных материалов, используемых при эксплуатации гибких и витых изделий, показал, что применение торсионного маятника для диагностики фрикционных характеристик указанных изделий является одним из доступных и достоверных способов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

С учетом проведенного анализа, была разработана экспериментальная установка, построенная на основе схемы вертикального крутильного (торсионного) маятника (рис. 1). Интегральным критерием эффективности работы смазочного материала выступает логарифмический декремент затухания колебаний диска 6, закрепленного при помощи зажимного патрона 5 на конце испытуемого троса 4 заданной длины L , выводимого из равновесного состояния на начальном этапе эксперимента закручиванием каната на угол α .



1 – рама, 2 – поворотный стол, 3 – верхний зажимной патрон, 4 – испытуемый трос-канат, 5 – нижний зажимной патрон, 6 – диск, 7 – тормоз, 8 – шлицевая муфта, 9 – инкрементный датчик, 10 – система сбора данных

Рис. 1. Схема установки для определения фрикционных свойств смазочных материалов стальных канатов

Испытательная установка включает раму 1, поворотный столик 2, верхний зажимной патрон 3, установленный соосно столику 2, испытуемый трос 4 заданной длины L , одним концом закрепленный в верхнем патроне 3, а другим – в нижнем зажимном патроне 5, установленном на диске 6, которые вместе образуют груз заданной массы G , тормоз 7 размещен на раме 1 и фиксирует угловое положение диска 6, который посредством шлицевой муфты 8 соединен с инкрементным датчиком 9, размещенным на раме 1 и связанным с системой сбора данных 10.

Работа установки осуществляется следующим образом.

На этапе подготовки эксперимента оператор закрепляет трос-канат 4 заданной длины L в верхнем 3 и нижнем 5 зажимных патронах. Система приводится в равновесное состояние, при котором происходит вытяжка каната и полная остановка крутильных колебаний. После чего оператор фиксирует положение диска 6 тормозом 7.

Затем оператор закручивает канат на заданный угол α вращением зажимного патрона 3 посредством поворотного стола 2, фиксирует положение последнего и далее запускает в работу систему сбора данных 10 углового положения инкрементного датчика 9.

Далее оператор размыканием тормоза 7 и диска 6 запускает крутильные колебания системы, при этом регистрируются показания инкрементного датчика 9 в течение заданного интервала времени.

В последующем оператором производится обработка данных, полученных системой сбора информации 10 и вычисляются необходимые параметры процесса затухания колебаний системы.

Разработанная экспериментальная установка позволяет проводить испытания канатов для следующих диапазонов: диаметр каната (D) 1 – 10 мм; длина каната (L) 200 – 1400 мм; углы кручения (α) $\pm 360^\circ$;

Положение угла поворота диска 6 отслеживается инкрементным оптическим энкодером Omron E6B2-CWZ6C с разрешением 2000 прямоугольных импульсов на один оборот вала. Регистрацию потока данных фаз А и В энкодера осуществляли с использованием аналого-цифрового преобразователя LTR22, осуществлявшего сбор данных с частотой 50 кГц.

Расчет знакопеременного угла поворота крутильного маятника реализуется с выполнением ряда функций программного обеспечения «PowerGraph». Расчет разбит на два этапа: первый реализуется в реальном времени в процессе эксперимента (RT), а второй как постобработка – реализуемый по результатам вычисления первого этапа, после завершения процесса колебаний (Off-line), это связано с наличием аппаратных ограничений АЦП по объему вычислений.

Сначала на этапе "RT" сигналы фаз А и В преобразуются функциями программного обеспечения, «зашумленные» сигналы амплитудой примерно 5,2 В преобразуются в «чистый» сигнал прямоугольной формы амплитудой 1 В с неизменным периодом следования фаз. Далее осуществляется вычисление сдвига фаз между сигналами А и В, после чего данный сигнал дифференцируется функцией и получаем сигнал с набором импульсов в положительной и отрицательной области графика, которые соответственно меняют знак при смене направления вращения энкодера.

В дальнейшем на этапе обработки "Off-line" суммируя количество положительных и отрицательных импульсов, получаем функцию изменения количества импульсов от времени. Для преобразования к углам поворота диска крутильного датчика потребуется перевести число импульсов в угол, используя разрешающую способность датчика, а именно $0,18^\circ$ на один импульс.

В качестве примера покажем график (рис. 2) испытания несмазанного (сухого) стального каната диаметром 2,5 мм длиной 1 м на установке при использовании груза весом 5 кг (патрон+диск). Канат закручивался поворотным столом на угол α – 360 градусов.

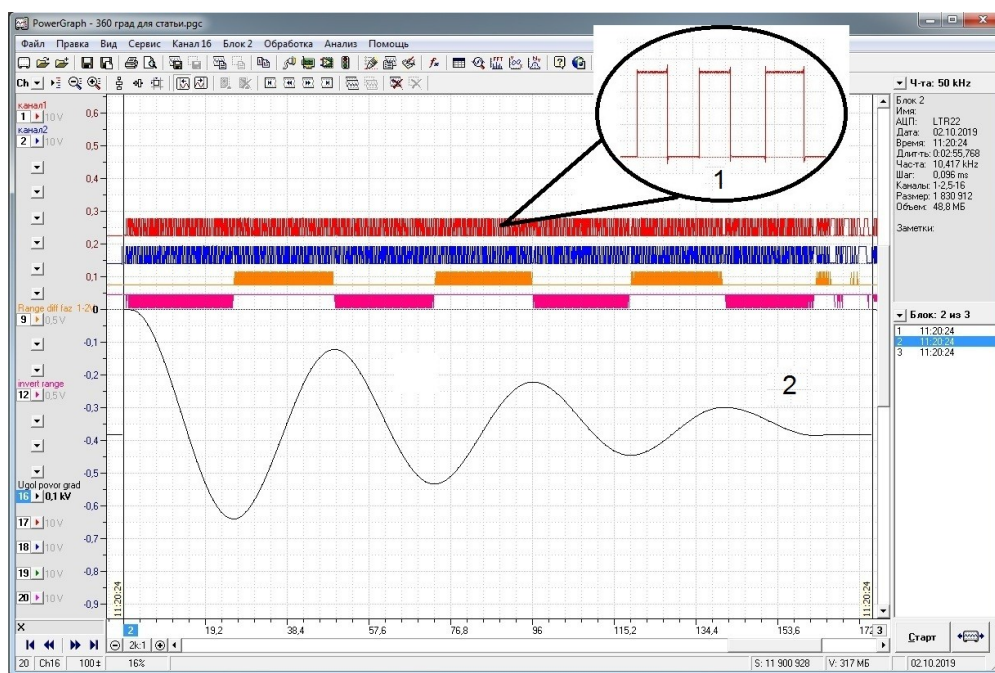


Рис. 2. Экспериментальный график колебаний крутильного (торсионного) маятника на установке:
 1 – сырой сигнал одной из фаз инкрементного датчика снятый в режиме сбора данных "RT",
 2 - обработанная кривая колебаний, полученная на этапе постобработки "Off-line"

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотренный в работе способ сравнительной оценки эффективности смазочных материалов может быть успешно использован при диагностике и анализе трибологических процессов и их последствий после некоторых эксплуатационных ситуаций, влияющих на долговечность витых изделий. Например, после эксплуатации изделия во влажной, коррозионной, запыленной атмосфере или после критического, экстремального ударного (импульсного, знакопеременного, циклического), температурного (низкие и высокие температуры) нагружения, сложных комбинированных воздействий, в том числе с наложением вибрации и т.п.

Учитывая доступность и простоту предложенного технического решения, способ может также применяться на контрольных операциях или в межоперационных переходах в цикле технологического изготовления свитых изделий различного служебного назначения.

В частности, способ апробирован авторами при подборе смазочных материалов, используемых для предэксплуатационной обработки («пропитки») стальных канатов [16].

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что рассмотренный в работе способ и разработанная установка для сравнительной оценки фрикционного взаимодействия между элементами свитого стального каната на основе торсионного маятника, может быть также результативно использован для решения различных задач, связанных с вопросами эксплуатации и производства витых изделий.

Помимо конструктивного в работе представлен вариант аппаратного и программного решения задачи регистрации знакопеременного угла поворота крутильного маятника ($\pm 3600^\circ$) в приложении к задаче исследования фрикционных характеристик смазочных материалов в стальных канатах при различных внешних воздействиях.

В качестве датчика угла использовали инкрементный энкодер с разрешением $0,18^\circ$ прямоугольных импульсов на оборот вала установленный соосно исследуемому канату. Регистрацию сигналов энкодера (фаз А и В) реализовали аналого-цифровым преобразователем LTR22 (Lcard) с частотой 50 кГц, а обработка сигналов осуществлена программным обеспечением «PowerGraph».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-48-180006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исмаилов Г. М., Мусалимов В. М., Саркисов Д. Ю., Лутовинов С. В., Окунев С. А. Способ определения силы трения и коэффициента трения // Патент РФ № 2408869, 2011.
2. Андреев А. В. Передача трением. М.: Машиностроение, 1978. 176 с.
3. Тарасов В. В., Калентьев Е. А., Постников В. А., Новиков В. Н., Чуркин А. В. Способ и устройство для определения коэффициента трения гибких тел // Патент РФ № 2420727, 2011.
4. Рачковская Е. В., Мурадханов В. А., Кухарь А. В. Способ определения фрикционных свойств волокна и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2135982, 1999.
5. Мур Д. Ф. Основы и применение трибоники / пер. с англ. С.А. Харламова. М.: Мир, 1978, 487 с.
6. Побежалко В. И. VIP-Трибометр для определения характеристик трения гибких тел // Патент РФ № 2486493, 2013.
7. Исмаилов Г. М. Контактные напряжения в кабелях // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2011, № 5(107). С. 35-38.
8. Исмаилов Г. М., Мусалимов В. М., Шиянов В. Д., Лутовинов С. В. Оценка силового взаимодействия элементов конструкции кабеля при деформации изгиба // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318, № 2. С. 44-48.
9. Хромов О. В. Экспериментальные исследования характеристик внутреннего трения стальных спиральных канатов и проволоки // Труды Одесского политехнического университета. 2009, № 1(131). С. 32-35.
10. Хромов О. В. Выбор модели внутреннего трения на основе экспериментальных осциллограмм затухающих колебаний системы // Вісник СевНТУ. 2010. Т. 106. С. 35-39.

11. Тарасов В. В., Калентьев Е. А., Новиков В. Н. Способ оценки фрикционного взаимодействия элементов свитых изделий // Патент РФ № 2573448, 2016.

12. Новиков В. Н., Тарасов В. В., Калентьев Е. А. Определение фрикционных характеристик смазочных материалов для стальных канатов, работающих при низких температурах // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2. С. 49-52.

13. Тарасов В. В., Калентьев Е. А., Новиков В. Н. Стальные канаты. Расчет конструкций и оценка эксплуатационных свойств // Материалы научных исследований «Механика и физикохимия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов». Ижевск: Изд-во ИМ УрО РАН, 2015. С. 237-259.

14. Тарасов В. В., Постников В. А., Новиков В. Н., Чуркин А. В., Калентьев Е. А. Устройство для испытания канатов на выносливость // Патент РФ № 2416083, 2011.

15. Дедков Г. В., Карамурзов Б. С., Насипов А. Ж. Прибор для моделирования процессов трения // Патент РФ № 2212649, 2003.

16. Тарасов В. В., Буденков Б. А., Постников В. А. Способ определения качества пропиточной жидкости канатов // Патент РФ № 2308715, 2007.

TO DEVELOP AN INSTALLATION TO ASSESS THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF LUBRICANTS BASED ON THE TORSION PENDULUM

Tarasov V. V., Churkin A. V., Kalentyev E. A.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Science, Izhevsk, Russia

SUMMARY. An overview of the methods and designs of installations to test the frictional characteristics of various products, consisting of elements such as ropes, wire, fibers, threads, etc. Some of them belong to twisted, and others to the more general group - flexible bodies (belts, ribbons, cables), where the evaluation of interaction between the individual elements of the components of the product is also of practical interest. As a result of the study of some of the installation designs and the methods of testing the above-mentioned objects based mainly on patent materials, and the analysis, a reasonable test scheme using torsion (the steeple) pendulum to determine the frictional properties of the lubricant, applied to steel ropes. A description of the installation for the implementation of the selected test scheme has been given. Fluctuation information is collected by PowerGraph software using an incremental angle sensor.

KEYWORDS: lubricants, rope testing, frictional characteristics, PowerGraph software.

REFERENCES

1. Ismailov G. M., Musalimov V. M., Sarkisov D. Yu., Lutovinov S. V., Okunev S. A. Sposob opredeleniya sily treniya i koehffitsienta treniya [The method of determining the friction force and friction coefficient]. *Patent RU 2408869*, 2011.

2. Andreev A. V. *Peredacha treniem* [Friction transmission]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 176 p.

3. Tarasov V. V., Kalent'ev E. A., Postnikov V. A., Novikov V. N., Churkin A. V. Sposob i ustroystvo dlya opredeleniya koehffitsienta treniya gibkikh tel [Method and device for determining the coefficient of friction of flexible bodies]. *Patent RU 2420727*, 2011.

4. Rachkovskaya E. V., Muradkhanov V. A., Kukhar' A. V. Sposob opredeleniya friktsionnykh svoystv volokna i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [A method for determining the frictional properties of a fiber and a device for its implementation]. *Patent RU 2135982*, 1999.

5. Mur D. F. *Principles and applications of tribology*. Editors: D. W. Hopkins. Oxford, New York: Pergamon Press, 1975. 400 p.

6. Pobezhalko V. I. VIP-Tribometr dlya opredeleniya kharakteristik treniya gibkikh tel [Tribometer for determining the friction characteristics of flexible bodies]. *Patent RU 2486493*, 2013.

7. Ismailov G. M. Kontaktnye napryazheniya v kabelyakh [Contact voltages in cables]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Tomsk State Pedagogical University Bulletin], 2011, no. 5(107), pp. 35-38.

8. Ismailov G. M., Musalimov V. M., Shiyarov V. D., Lutovinov S. V. Otsenka silovogo vzaimodeystviya ehlementov konstruksii kabelya pri deformatsii izgiba [Evaluation of the force interaction of cable structure elements during bending deformation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2011, vol. 318, no. 2, pp. 44-48.

9. Khromov O. V. Ehksperimental'nye issledovaniya kharakteristik vnutrennego treniya stal'nykh spiral'nykh kanatov i provoloki [Experimental study of internal friction characteristics of steel helical rope and wire]. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Odessa Polytechnic University], 2009, no. 1(131), pp. 32-35.

10. Khromov O. V. Vybore modeli vnutrennego treniya na osnove ehksperimental'nykh ostsillogramm zatukhayushchikh kolebaniy sistemy [Selection of an Internal Friction Model on the Basis of Experimental Oscillograms for Damped Vibrations of the System]. *Visnik SevNTU* [News of SevNTU], 2010, vol. 106, pp. 35-39.

11. Tarasov V. V., Kalent'ev E. A., Novikov V. N. Sposob otsenki friktsionnogo vzaimodeystviya ehlementov svitykh izdeliy [A method for evaluating the frictional interaction of elements of twisted products]. *Patent RU 2573448*, 2016.

12. Novikov V. N., Tarasov V. V., Kalent'ev E. A. Opredelenie friktsionnykh kharakteristik smazochnykh materialov dlya stal'nykh kanatov, rabotayushchikh pri nizkikh temperaturakh [Determination of friction characteristics of lubricants for steel wire ropes operating at low temperatures]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent Systems in Manufacturing], 2014, no. 2, pp. 49-52.

13. Tarasov V. V., Kalent'ev E. A., Novikov V. N. Stal'nye kanaty. Raschet konstruksiy i otsenka ehkspluatatsionnykh svoystv [Steel ropes. Structural Analysis and Performance Assessment]. *Materialy nauchnykh issledovaniy «Mekhanika i fizikokhimiya geterogennykh sred, nanosistem i novykh materialov»* [Materials of Scientific Research «Mechanics and Physicochemistry of Heterogeneous Media, Nanosystems and New Materials»]. Izhevsk: IM UB RAS Publ., 2015. pp. 237-259.

14. Tarasov V. V., Postnikov V. A., Novikov V. N., Churkin A. V., Kalent'ev E. A. Ustroystvo dlya ispytaniya kanatov na vynoslivost' [Endurance rope testing device]. *Patent RU 2416083*, 2011.

15. Dedkov G. V., Karamurzov B. S., Nasipov A. Zh. Pribor dlya modelirovaniya protsessov treniya [Device for modeling friction processes]. *Patent RU 2212649*, 2003.

16. Tarasov V. V., Budenkov B. A., Postnikov V. A. Sposob opredeleniya kachestva propitochnoy zhidkosti kanatov [The method of determining the quality of the impregnating fluid of the ropes]. *Patent RU 2308715*, 2007.

Тарасов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, тел. 8(3412) 20-29-25, e-mail: tvv@udman.ru

Чуркин Александр Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: sasaki@udman.ru

Калентьев Евгений Александрович, старший научный сотрудник, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: eugenekalentev@gmail.com