

**Механика материалов:  
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:  
strength, durability, safety**

DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-12-43-47

УДК (UDC) 620.178.3

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИАМИДНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ СЕПАРАТОРОВ БУКСОВЫХ УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**© **Николай Григорьевич Филиппенко**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Россия; e-mail: ifpi@mail.ru

*Статья поступила 12 июля 2016 г.*

При изготовлении любого изделия решают задачи обеспечения его заданными эксплуатационными свойствами. Для металлов данная задача не вызывает существенных трудностей, тогда как для полимеров ее решение требует дополнительных исследований. Показано, что свойства полимеров определяются их надмолекулярными структурами. Механические же характеристики зависят от условий структурообразования и могут изменяться в достаточно широких пределах. Рассмотренные существующие расчетные модели изнашивания весьма приближенно оценивают параметры для материала, подверженного износу в процессе эксплуатации, а результаты теоретических исследований данных проблем весьма противоречивы. Методики экспериментального определения причин преждевременного разрушения полимерных материалов и интерпретация их физического смысла требуют совершенствования. Исследованы основные причины преждевременного выхода их из строя ответственных деталей и узлов машин, изготовленных из композитных пластмасс. Определены условия, вызывающие нарушения целостности структуры полиамидных материалов в процессе их эксплуатации. Предложены методы определения причин возникновения усталостных разрушений с учетом реальных метеоклиматических условий эксплуатации материала сепараторов буксовых узлов подвижного состава ОАО РЖД. На примере образцов стеклонаполненного полиамида установлены необходимые и достаточные показатели для определения прочностных характеристик исследуемого материала, получены экспериментальные соотношения для оценки качества его разрушений.

**Ключевые слова:** полиамидные сепараторы; диагностирование; кинетика разрушения; буксовый узел подвижного состава.

**STUDY OF THE PROPERTIES AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POLYAMIDE CAGES  
OF THE AXLE EQUIPMENT OF THE ROLLING STOCK OF RUSSIAN RAILWAYS (RR)**© **Nikolai G. Filippenko**

Irkutsk State University of Railways, Irkutsk, Russia; e-mail: ifpi@mail.ru

*Submitted July 12, 2016.*

Conditions that cause violation of the integrity of the structure of polyamide materials in-service are analyzed. Methods proposed and developed by the authors with allowance for real meteorological conditions of the rolling stock operation in Russia are used to elucidate the causes of fatigue failure. Samples of glass-nylon composite (glass fiber reinforced nylon) are used to determine the necessary and sufficient indicators of strength characteristics of the material and derive experimental relationships to elucidate kinetics of the onset of fracture of polymer materials.

**Keywords:** polyamide cages; diagnostics; fracture kinetics; axle equipment of rolling stock.

Использование полимеров в качестве конструкционных материалов взамен металлических сплавов обусловлено их преимуществами, к которым можно отнести коррозионную стойкость, высокую удельную прочность, антимагнитные свойства и технологичность. Практика применения композитных пластмасс для изготовления ответственных деталей и узлов машин определила круг вопросов, связанных с причина-

ми их преждевременного выхода из строя. Полученные результаты противоречивы, поэтому методики экспериментального определения причин преждевременного разрушения полимерных материалов и интерпретация их физического смысла также требуют дальнейшего совершенствования.

Так, показателям гарантийного срока эксплуатации полиамидных сепараторов большинства подшип-

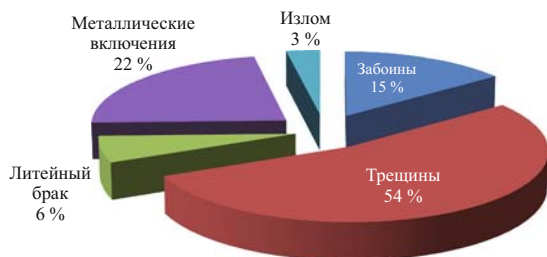


Рис. 1. Основные неисправности и дефекты полимерных сепараторов

ников качения (15 лет) противоречат данные, приведенные в стандарте на этот полимер, где декларируется снижение прочностных характеристик полиамида до 50 % по истечении одного года (причем только при его хранении) [1, 2].

Анализ литературных данных показал, что разработанные расчетные модели изнашивания весьма приближенно оценивают параметры для материала, модифицированного трением, т.е. подверженного фактическому износу в процессе эксплуатации.

Расчетные модели оценки интенсивности изнашивания полимеров и резин, включающие кинетические выражения С. Б. Ратнера, весьма сложны для практического использования из-за невозможности получения некоторых констант изнашивания [3, 4].

Проведенный анализ позволяет заключить, что единая теория определения причин повреждаемости и разрушения изделий из полимерных материалов отсутствует [3 – 5].

Пригодность изделий из полимерных материалов при производстве ремонтных работ, как правило, устанавливают визуально операторы (субъективный параметр) ремонтных участков.

Объективность диагностирования, в частности, полиамидных сепараторов ограничена особенностями приборов, посредством которых проводится контроль целостности сепаратора, подвергнутого критическому нагружению.

Цель данной работы — исследования кинетики разрушений полиамидных материалов сепараторов буксовых узлов. С учетом вышеизложенного были поставлены следующие задачи:

исследование конструктивных особенностей, режимов эксплуатации, способов контроля и технологии ремонта буксовых узлов подвижного состава;

определения наиболее информативных прочностных показателей для полимерных конструктивных материалов;

моделирование ситуаций, соответствующих внешним условиям работы буксовых узлов подвижного состава;

экспериментальное исследование динамики изменений прочностных характеристик сепараторов в зависимости от условий их эксплуатации;

определение кинетики разрушения (трещинообразования) полиамидных материалов.

Необходимо отметить, что полимерные сепараторы пришли на смену лагунам. Их изготавливают из композитных армированных стекловолокном полиамидов марки «Армамид ПА СВ 30-1ЭТМ» и др. В конструкции сепаратора из полиамида (ПА) (по сравнению с сепараторами из медных сплавов) увеличено количество тел качения в подшипнике с 14 до 15, что значительно снизило нагрузку на подшипниковый узел. Опыт эксплуатации корпорацией ОАО РЖД с 1997 г. данных сепараторов подшипников серий 30-42726Е2М, 30-232726Е2М в боксах грузовых, а с 2001 г. — и пассажирских вагонов показал как их преимущества, так и ряд недостатков. Отметим, что при выпуске сепараторов дата производства на них не маркируется.

Теоретических обоснований повреждаемости и разрушения изделий из полимерных материалов, как было отмечено ранее, не найдено, а поэтому для определения причин возникновения неисправностей авторами выбран экспериментальный метод.

Исходя из анализа видов и случаев брака [6] в качестве объекта исследования выбран основной элемент буксового узла подвижного состава ОАО РЖД — стеклонаполненный полиамидный сепаратор роликового подшипника. Проведены исследования отбраковки полиамидных сепараторов за 2010 – 2015 гг. по ЛВЧД-7 г. Иркутска. Результаты исследований представлены на рис. 1.

Анализ полученных данных показал, что наиболее частыми причинами отбраковки являются трещины в поверхностном слое сепаратора. Причем при снижении за этот период основных неисправностей и дефектов полимерных сепараторов уровень отбраковки по «трещинам» не снижается, а в некоторых случаях — повышается. Так, по трещинам (ЛВЧД-7 г. Иркутска) было отбраковано 54 % сепараторов, что в абсолютном количестве равно более чем 1,5 тысячам штук.

Проведенные ранее исследования показали, что количество брака непосредственно связано с сезонностью (погодно-климатическими условиями) эксплуатации [7], но не выявили причин возникновения дефектов.

Для оценки интенсивности изнашивания полимеров и резин построены расчетные модели с использованием кинетических выражений [8]. Так, С. Б. Ратнер предложил расчетную модель изнашивания, определяемую формулой

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{U_0 - f\gamma\sigma}{R\vartheta}\right), \quad (1)$$

где  $I_0$  — константа изнашивания;  $U_0$  — энергия активации разрушаемых связей;  $\sigma$  — напряжение;  $\gamma$  — постоянная, связанная со структурой материала;  $f$  — коэффициент трения;  $R\vartheta$  — энергия теплового движения. Особенностью полученного выражения является

наличие в эффективной величине энергии активации (числитель дроби) механической составляющей, выраженной вторым слагаемым. Однако физический смысл констант  $I_0$ ,  $\gamma$  и в этом случае не ясен.

Иная модель изнашивания при фреттинге представлена в работе [9]. Она отражает связь механических и физико-химических свойств материала с характеристиками микрогеометрии контакта и параметрами внешних воздействий. Скорость линейного износа определяется по следующей зависимости:

$$J = \frac{\varepsilon C_m k T \sigma_{\text{эКВ}} L}{\alpha h \sigma_{\text{в}}^2 A_a d}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — предельное относительное удлинение;  $C_m$  — атомная теплоемкость;  $\sigma_{\text{эКВ}}$  — эквивалентная нагрузка;  $d$  — диаметр элементарного пятна контакта;  $h$  — постоянная Планка;  $L$  — проскальзывание на контакте;  $\alpha$  — коэффициент теплового линейного расширения;  $\sigma_{\text{в}}$  — предел прочности;  $A_a$  — номинальная площадь контакта. Эквивалентная нагрузка

$$\sigma_{\text{эКВ}} = 3\tau = 3(q_r \mu + 2\pi A f \sqrt{\rho G}), \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность материала;  $G$  — модуль сдвига;  $q_r$  — фактическое давление в контакте;  $f$  и  $A$  — характеристики режима фреттинга — частота и среднегеометрическая амплитуда осцилляции в плоскостях контакта. При этом механизм разрушения материала поверхностного слоя рассматривается как атермический, а его активационные параметры и скорость разрушения (частота активации локального объема) оцениваются аналитическим путем [10]. Однако методики их экспериментального определения и интерпретация физического смысла также требуют дальнейшего совершенствования.

Более того, при использовании приведенной расчетной модели изнашивания определенную сложность представляет оценка ее параметров для материала, модифицированного трением поверхностного слоя. Кроме того, учет влияния различных способов модифицирования поверхностей через коэффициент трения [9] не всегда оправдан, поскольку не существует надежной корреляции между фрикционными и противозносными характеристиками материалов.

В большинстве исследований работоспособности цилиндрических роликоподшипников повышение их износостойкости связывают с оптимизацией геометрии поверхностей трения, что отражено в теоретических [11] и экспериментальных работах А. В. Гайдамака [12]. Вместе с тем такой подход следует признать недостаточно эффективным из-за невозможности учета всех видов деформации деталей в процессе их эксплуатации.

Из приведенного анализа следует, что имеющиеся оценки активационных параметров разрушения материалов недостаточны для проведения расчетов на из-

нос, так как они не учитывают ряд существенных факторов: влияния среды, модификации и пр.

Неоднородность и анизотропия материала поверхностного слоя не позволяют использовать для его описания классические теории (упругости, механики сплошной среды и др.) [13]. Поэтому заранее рассчитать такие параметры, как прочность межатомных связей в кристаллической решетке, твердость, размеры дислокационных ячеек и т.п., при помощи известных теоретических методов не представляется возможным. Единственным источником данных в таком случае остается эксперимент, проведенный в строго выдержанных условиях [14].

Практика показала, что ударная вязкость позволяет судить о стойкости материалов к хрупкому разрушению, однако данный критерий не имеет исчерпывающего физического обоснования по ряду причин. Во-первых, поверхность разрушения является трехмерной, поэтому точная оценка ее площади проблематична. Во-вторых, большая часть энергии тратится не на образование новых поверхностей при растрескивании, а на предшествующую пластическую деформацию, сосредоточенную в некотором объеме образца, прилегающем к месту разрушения. В этой связи В. В. Федоров определил ударную вязкость как условный параметр, не в полной мере пригодный для применения в окончательных расчетах на прочность. Поэтому за показатель прочности и износостойкости полимерного материала приняты комплексные динамические показатели его твердости и пластичности (вязкости), соответствующие условиям эксплуатации.

В работе [15] подробно рассмотрены условия эксплуатации полиамидных сепараторов, в частности климатические. В рамках данного исследования прослежены метеорологические данные последних лет по городам Иркутск, Братск, Улан-Удэ. Динамика сезонных показателей температуры и влажности оказалась достаточно стабильной.

Более того, метеорологические данные отмеченных регионов соответствуют погодным условиям широт большей части Транссибирской магистрали РЖД, представленной на рис. 2 (карта РЖД). Таким образом, анализ климатических и природных условий эксплуатации позволил определить условия моделирования сезонностей, соответствующих уральскому, сибирскому и дальневосточному дивизионам РЖД.

Для проведения экспериментальных исследований в соответствии с ГОСТ 4647–80 были получены образцы из полиамидных сепараторов для испытаний на ударную вязкость и твердость. Согласно ВНИИЖТ [16] образцы изготавливали из наиболее нагружаемых элементов сепаратора. Режимы обработки образцов при их изготовлении подбирали таким образом, чтобы температурные воздействия от резания не оказывали влияния на структуру полиамида. Образцы получали по единой технологии одновременно на весь комплекс экспериментов. Всего было испытано более 150 об-





Рис. 2. Исследованные климатические и природные зоны эксплуатации РЖД

разцов, изготовленных из сепараторов из полиамида «Армид» различных заводов-изготовителей.

Испытание образцов полимерных материалов проводили (на установке маятникового копра модели 2083 КМ-0,4) на двухопорный изгиб (метод Шарпи) по ГОСТ 9454, ГОСТ 9455, ISO 148-2-1998, ASTM-A370, EN 100045-1. Режимы испытаний — постоянные, потенциальная энергия топора  $P_p = \text{const} = 2J$ . Испытывали по семь – девять образцов одного геометрического размера. Их подвергали однократному воздействию независимо от состояния после испытаний. Ударная вязкость образцов без надрезов [в кДж/м или (кгс · см)/см]

$$a_n = A_n/b_s, \quad (4)$$

где  $A_n$  — энергия удара, затраченная на разрушение образца без надреза, Дж (кгс · см);  $b$  — ширина образца по его середине, мм (см);  $s$  — толщина образца по его середине, мм (см).

Для определения твердости образцов использовали прибор ТЭМП-3. Применяемый метод динамического измерения твердости полимеров характеризуется широким диапазоном и малой погрешностью измерений. Измерение проводили по шкале Лейба, которая соответствует всем требованиям стандарта ASTM A956.

Полученные данные позволили оценить состояние исследуемого материала в смоделированных условиях, соответствующих реальным условиям эксплуатации. Кроме того, пространственное измерение твердости дало возможность выявить очаги и изменения, возникшие в материале в процессе его эксплуатации, определить характер и зону воздействия источника разрушений, а также существенно повысить достоверность оценки состояния полимера в стадии его активной эксплуатации.

Таким образом, в смоделированных условиях, соответствующих реальным климатическим условиям эксплуатации регионов Урала, Сибири и Дальнего Востока, определены твердость и ударная вязкость образцов полиамидных сепараторов.

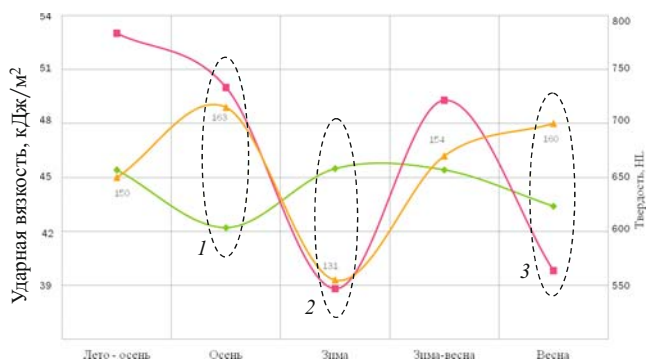


Рис. 3. Результаты экспериментального определения твердости, ударной вязкости и отбраковки стеклонаполненных полиамидных сепараторов: ◆ — твердость; ■ — ударная вязкость; ▲ — отбракованные сепараторы

Полученные экспериментальные результаты — твердость, ударная вязкость образцов полиамида и статистика отбраковки стеклонаполненных полиамидных сепараторов — представлены на рис. 3.

Анализ данных позволил определить причины возникновения неисправностей полиамидных сепараторов в процессе их эксплуатации.

Так, на рис. 3 выделены три характерные зоны (1 – 3). В рамках данных исследований им присвоены термины «осеннего разрушения», «зимнего разрушения» и «весеннего разрушения» соответственно. Найдены условия, при которых происходит повышенное изнашивание, как деформационное, так и усталостное: осеннему разрушению соответствуют 163 ед, весеннему — 160 ед.

Зона 2 зимнего разрушения является самой благоприятной для эксплуатации подвижного состава. Это период минимального количества отбракованных сепараторов, что подтверждают статистические исследования браковки сепараторов ЛВЧД-7 г. Иркутска.

Несмотря на идентичность динамики отбраковки полиамидных сепараторов в осенний и весенний периоды эксплуатации (163 и 160 единицы) физические причины возникновения их усталостных разрушений имеют разную природу. Так, при упрочнении конструкционных материалов, вызванных снижением температуры среды, изменение твердости сопровождается уменьшением пластичности, которая напрямую зависит от влажности.

Исходя из полученных в ходе исследований результатов, можно сделать вывод, что причинами разрушения полиамидных сепараторов подшипников буксовых узлов подвижного состава ОАО РЖД являются:

в осенний период эксплуатации — высокая пластичность в сочетании с малой твердостью, активизирующая деформационные формы изнашивания;

в весенний период эксплуатации — высокая твердость в сочетании с малой пластичностью, что вызывает усталостные разрушения.

Практическую значимость полученных результатов можно определить после разработки технологии подготовки и восстановления работоспособности полиамидных сепараторов в демисезонные периоды эксплуатации подвижного состава, что является темой дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 10589–87. Полиамид 610 литьевой. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 12 с.
- ГОСТ 22372–77. Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. — М.: Изд-во стандартов, 1977. — 12 с.
- Громаковский Д. Г., Ефимов В. П., Ковтунов Е. П., Мохонько Е. П., Кулаков Г. А., Ибатуллин И. Д.** Триботехнические основы повышения износостойкости рельс, колес и колесных подшипников / Международная науч.-техн. конференция «Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин»: науч. тр. — Самара: Машиностроение, 2003. С. 207 – 212.
- Громаковский Д. Г., Ибатуллин И. Д.** Новый метод оценки пластичности материалов / Семинар «Акустико-эмиссионный метод диагностики на железнодорожном транспорте»: сб. докл. — СПб.: НП Объединение разработчиков и производителей наукоемкой продукции для железных дорог, 2003. С. 51 – 56.
- Геккер Ф. Р., Хайрамов С. И.** Влияние динамического контактного взаимодействия на силу трения скольжения / Машиноведение. 1985. № 5. С. 88 – 93.
- Богинский О. И.** Укреплять безопасность движения / Вагоны и вагонное хозяйство. 2007. № 4(12). С. 10 – 13.
- Лившин А. В., Машович А. Я., Филиппенко Н. Г.** Аспекты электротермической обработки материалов электромагнитным полем высокой частоты / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. Вып. 2(30). С. 135 – 140.
- Финкель В. М.** Физические основы торможения разрушения. — М.: Металлургия, 1977. — 360 с.
- Лихачев В. А., Малинин В. Г.** Структурно-аналитическая теория прочности. В 2 т. — СПб.: Наука, 1995.
- Закревский В. А., Похотин В. А.** Автоионизационный механизм разрыва химических связей в макромолекулах / Высокомолекулярные соединения. 1981. Т. 23А. № 3. С. 658 – 667.
- Гайдамака А. В., Борзилов И. Д., Дунай Л. М.** Исследование напряженного состояния конструкции сепаратора крупногабаритных роликовых подшипников / Вестник ХГПУ. 1997. Вып. 7. С. 5 – 7.
- Гайдамака А. В., Алифиренко В. Ю.** Влияние геометрии маслоудерживающей канавки в гнездах сепаратора со стороны поверхностей трения колец на напряженно-деформированное состояние его конструкции / Вестник ХГПУ. 2010. Вып. 40. С. 79 – 82.
- Демкин Н. Б., Рыжов Э. В.** Качество поверхности и контакт деталей машин. — М.: Машиностроение, 1981. — 244 с.
- Ибатуллин И. Д.** Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. — Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2008. — 387 с.
- Филиппенко Н. Г.** Математическая модель процесса высокочастотной обработки полимерных материалов / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. Вып. 1 (33). С. 76 – 79.
- Аверин Н. А., Русанов О. А., Иванов С. Г.** Исследования нагруженности полиамидных сепараторов для буксовых подшипников методом конечных элементов / Вестник ВНИИЖТ. 2007. № 3. С. 24 – 29.

## REFERENCES

- RF State Standard 10589–87. Polyamide 610 injection molding. — Moscow: Izd. standartov, 1987. — 12 p. [in Russian].
- RF State Standard 22372–77. The dielectric materials. Methods of determining dielectric permeability and tangent of dielectric loss angle. — Moscow: Izd. standartov, 1977. — 12 p. [in Russian].
- Gromakovskii D. G., Efimov V. P., Kovtunov E. P., Mokhon'ko E. P., Kulakov G. A., Ibatullin I. D.** Tribological basis for improving the wear resistance of rail, wheels and wheel bearings / International scientific-technical. conference "Actual problems of reliability of technological, power and transport machines": scientific works. — Samara: Mashinostroenie, 2003. P. 207 – 212 [in Russian].
- Gromakovskii D. G., Ibatullin I. D.** A new method of measuring plasticity of materials / Seminar "Acoustic Emission Diagnostic Method for Railway Transport": a collection of reports. — St. Petersburg: NP Ob"edinenie razrabotchikov i proizvoditelei naukoemkoi produktsii dlya zheleznykh dorog, 2003. P. 51 – 56 [in Russian].
- Gekker F. R., Khairamiev S. I.** The influence of dynamic contact interaction of hard friction / Mashinovedenie. 1985. N 5. P. 88 – 93 [in Russian].
- Boginskii O. I.** To strengthen the safety / Vagony Vagon. Khoz. 2007. N 4(12). P. 10 – 13 [in Russian].
- Livshits A. V., Mashovich A. Ya, Filippenko N. G.** Aspects of electro-thermal materials processing by electromagnetic field of high frequency / Sovr. Tekhnol. Sist. Analiz. Modelir. 2011. Issue 2(30). P. 135 – 140 [in Russian].
- Finkel' V. M.** The physical basis of inhibition of destruction. — Moscow: Metallurgiya, 1977. — 360 p. [in Russian].
- Likhachev V. A., Malinin V. G.** The structural-analytical theory of strength. In 2 vols. — St. Petersburg: Nauka, 1995 [in Russian].
- Zakrevskii V. A., Pokhotin V. A.** Auto-ionization mechanism of rupture of chemical bonds in macromolecules / Vysokomol. Soed. 1981. Vol. 23A. N 3. P. 658 – 667 [in Russian].
- Gaidamaka A. V., Borzilov I. D., Dunai L. M.** Investigation of the stress state of the separator oversized roller bearings / Vestnik KhGPU. 1997. Issue 7. P. 5 – 7 [in Russian].
- Gaidamaka A. V., Alifirenko V. Yu.** Influence of geometry mallo-donitae grooves in the nests of the separator-side surfaces of the friction rings on the stress-strain state of its design / Vestnik KhGPU. 2010. Issue 40. P. 79 – 82 [in Russian].
- Demkin N. B., Ryzhov É. V.** The surface quality and contact of machine parts. — Moscow: Mashinostroenie, 1981. — 244 p. [in Russian].
- Ibatullin I. D.** The kinetics of fatigue damage and fracture of surface layers. — Samara: Izd. Samar. Gos. Tekhn. Univ., 2008. — 387 p. [in Russian].
- Filippenko N. G.** Mathematical model of the process of high-frequency processing of polymeric materials / Sovr. Tekhnol. Sist. Analiz. Modelir. 2012. Issue 1(33). P. 76 – 79 [in Russian].
- Averin N. A., Rusanov O. A., Ivanov S. G.** Study of the loading of polyamide cages for axlebox bearings by finite element method / Vestnik VNIIZhT. 2007. N 3. P. 24 – 29 [in Russian].