

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 531.43

*ИОНОВ ВЯЧЕСЛАВ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ, аспирант,
038103@sibmail.com,
ЛАРИОНОВ СЕРГЕЙ АРКАДЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
gidro-tomsk@mail.ru
САРКИСОВ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
sarkisov@tsuab.ru
КОПАНИЦА НАТАЛЬЯ ОЛЕГОВНА, докт. техн. наук, профессор,
kopanitsa@mail.ru
ГОРШКОВА АЛЕКСАНДРА ВЯЧЕСЛАВОВНА, канд. техн. наук,
gorshkova@mail.ru
ГОРЛЕНКО НИКОЛАЙ ПЕТРОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
gorlen52@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,
БЕЛЯЕВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
sabvt@rambler.ru
Омский автобронетанковый инженерный институт,
644098, г. Омск, 14, Военный городок ОАБВИ*

НАНОМОДИФИЦИРУЮЩАЯ ДОБАВКА ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Наномодификаторы находят все более широкое распространение в самых различных областях науки и техники. В работе проведены физико-химические исследования структуры и свойств синтезированной наномодифицированной добавки на основе местного сырья – торфа – путем его пиролизной обработки без доступа воздуха. Показано, что добавка представляет собой совокупность различных форм наноуглерода в сочетании с полярными и неполярными адсорбентами, роль которых выполняют оксид кремния (SiO_2), карбонат кальция (CaCO_3) и углерод (C), составляющие основу минеральной части низинного торфа.

Испытания исследуемой добавки типа ТМТ-600 (патент РФ № 107151) показали, что ее различное процентное содержание необходимо для регулирования триботехнических свойств пар трисопряжений различной степени нагруженности. При этом при содержании 0,5 масс. % наблюдается стабилизация коэффициента трения и повышение нагрузки схватывания.

Ключевые слова: торф; наноуглерод; нанотрубки; нановолокно; фуллерены; трисопряжение; трение; износ; триботехническая жидкость; смазочные материалы; транспортные машины; узлы; механизмы.

© Ионов В.В., Ларионов С.А., Саркисов Ю.С., Копаница Н.О., Горшкова А.В., Горленко Н.П., Беляев С.А., 2016

VYACHESLAV V. IONOV, Research Assistant,
038103@sibmail.com
SERGEI A. LARIONOV, PhD, A/Professor,
gidro-tomsk@mail.ru
YURII S. SARKISOV, DSc, Professor,
sarkisov@tsuab.ru
NATAL'YA O. KOPANITSA, DSc, Professor,
kopanitsa@mail.ru
ALEKSANDRA V. GORSHKOVA, PhD, A/Professor,
gorshkova@mail.ru
NIKOLAI P. GORLENKO, DSc, Professor,
gorlen52@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia,
SERGEI A. BELYAEV, PhD, A/Professor,
sabvt@rambler.ru
Omsk Tank Engineering Institute,
14-I Voennyi Gorodok, 644098, Omsk, Russia

NANO-MODIFIER FOR TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF MACHINE COMPONENTS

The paper presents physicochemical investigations of structure and properties of nano-modifier synthesized from the local raw material, namely, peat obtained by its pyrolysis in air-free conditions. This nano-modifying additive is a combination of various forms of nanocarbon and polar and non-polar adsorbing materials such as silica (SiO_2), calcium carbonate (CaCO_3) and carbon (C).

Test results of the type TMT-600 modifier (RF Patent N 107151) show that its different percentage is required to modify tribological properties of the steel tribocouple under different loading conditions. At 0,5 wt.% content of this nano-modifier, stabilization of the friction ratio and increase of seizure load are observed.

Keywords: peat; nanocarbon; nanotubes; nanofiber; fullerene; tribocouple; friction; wear; hydraulic fluid; lubricant; machine components.

Наномодификаторы находят все более широкое распространение в самых различных областях науки и техники, производства [1–3]. Однако, несмотря на высокую эффективность, их применение зачастую сдерживается сложностью синтеза и дороговизной. В этой связи разработка методов синтеза наномодифицирующих добавок полифункционального назначения на основе местного сырья, отвечающих критериям технологической доступности и эффективности, энерго-, ресурсосбережения, экологической безопасности, природной сбалансированности и биосовместимости, а также экономической целесообразности является в настоящее время не просто актуальной, а представляет значительный практический и теоретический интерес.

Сырьевая база Сибирского региона позволяет создавать модифицирующие добавки на основе торфа для регулирования свойств сухих строительных смесей и других композиционных материалов. Запасы этого частично возобновляемого ресурса в Томской области составляют 29,3 млрд т в расчете на

40%-ю влажность. По этому показателю Томская область занимает второе место в России, уступая лишь Тюменской.

В процессе термической обработки торфа большая часть органических веществ подвергается деструкции. Полученные методом термообработки добавки предложено разделять по составу на четыре вида в зависимости от температуры обработки торфа: органические (200 °С) с высоким содержанием веществ органической природы; органоминеральные (400 °С) с преобладанием органических соединений; минерал-органические (600 °С) с преобладанием минеральных соединений и минеральные (800 °С и более) с низким содержанием органики [4, 5].

Синтезированная добавка, получившая название ТМТ-600, нашла широкое применение в стройиндустрии для регулирования свойств цементных систем [6–10]. Чтобы иметь представление о составе, структуре и свойствах синтезируемой добавки, провели комплексный анализ вещества.

С этой целью 100 мг порошка пиролиза торфа насыпали в сосуд с 5 мл 96%-го этанола, затем диспергировали с помощью звуковой ванны СТ-400D на мощности 60 Вт. Полученную взвесь отстаивали в течение 5 мин. За это время крупные частицы оседали на дно сосуда, а сама взвесь над осадком разделялась на два отчетливо видимых слоя. С помощью микродозатора с каждого из 3 слоев (включая самый нижний с осадком) отбирали 2–3 капли взвеси и наносили на поверхность чистого предметного стекла. После высыхания взвеси на стекло напыляли пленку углерода и отрывали ее с помощью желатина. Полученные препараты исследовали на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Результаты показали, что в нижнем слое взвеси (осадке) размеры частиц варьируются от десятых долей микрометра до нескольких микрометров (рис. 1).

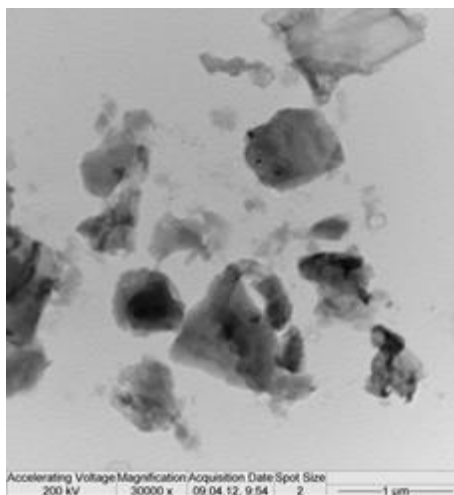


Рис. 1. Частицы в осадке

Наряду с крупными частицами присутствуют мелкие сферические (менее 5 нм), как правило, сгруппированные в агломераты (рис. 2), и частицы вы-

тянутой формы – нановолокна (рис. 3), размеры которых достигают 200 и более нанометров при поперечном размере 20 и менее нанометров.

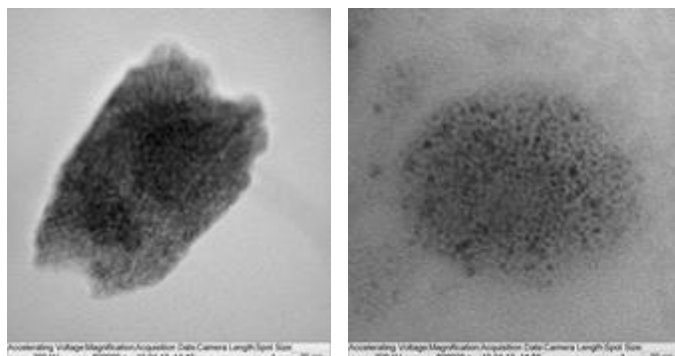


Рис. 2. Агломераты мелких частиц

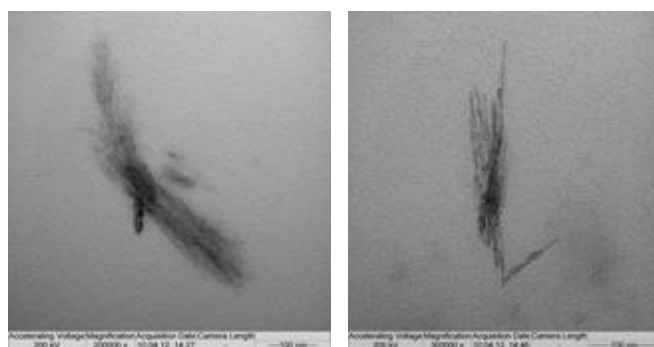


Рис. 3. Нановолокна

В среднем и верхнем слое взвеси частиц также присутствуют единичные частицы, аналогичные представленным на рис. 1 и 2. Кроме того, имеются нановолокна большей длины (до 200 нм и более) с поперечником 2–4 нм с налипшими на них частицами размером 10–20 нм (рис. 4) и частицы сложной формы (рис. 5).

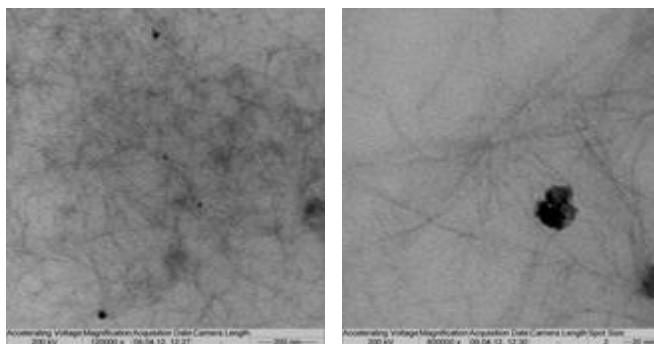


Рис. 4. Нановолокна с наночастицами

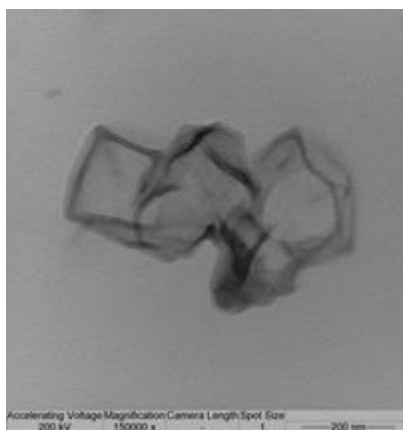


Рис. 5. Частицы сложной формы

Во всех слоях взвеси обнаруживаются частицы с четко видимыми периодическими структурами (рис. 6), представляющимися нам нанотрубками. Шаг периода варьируется от 1,0–1,2 нм до 4,7–4,8 нм.

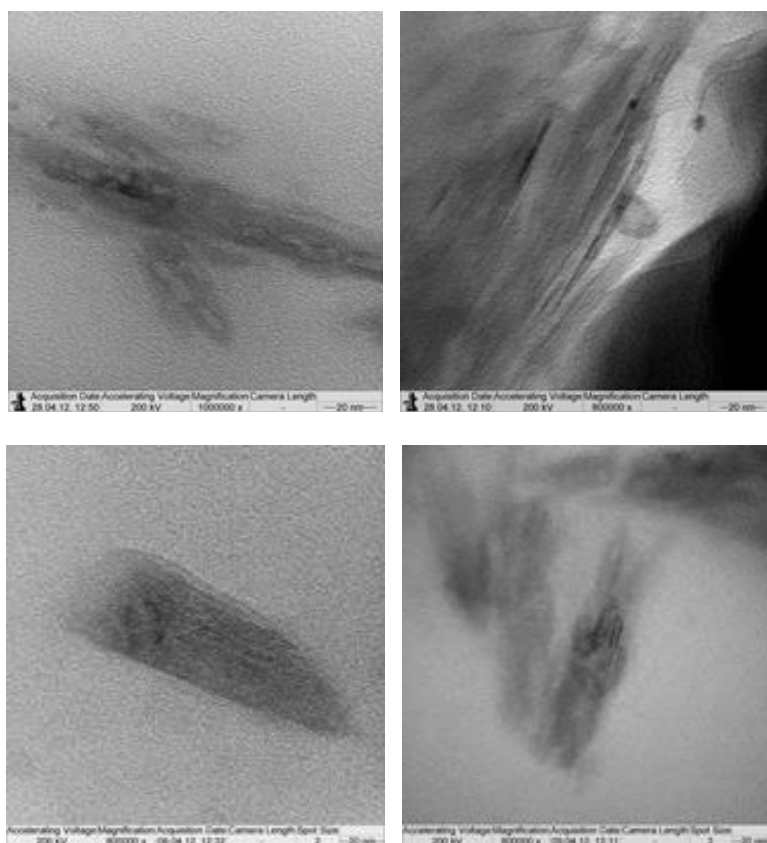


Рис. 6. Наночастицы с периодическими структурами

Как видно из проведенного анализа результатов комплексных физико-химических исследований добавки ТМТ-600, она представляет собой рационально подобранную смесь различных форм нанокремнезема и микро- и макросоставляющих торфа. Количественное содержание добавки отражено в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования состава модифицирующей добавки ТМТ-600

Состав	Размеры, нм	Содержание, %
SiO ₂	> 400	43,81
CaCO ₃	180	47,99
С (графит)	15	7,77
CaAl ₂ Si ₂ O ₈	100	0,31
С60	10–20	0,12

Наномодификаторы на основе углерода уже нашли широкое применение в машиностроении. Известно, что одним из главных требований к рабочим жидкостям, применяемым в системах машин, является высокая смазывающая способность, исключающая повышенный износ и схватывание трибосопряжений [11–13].

Характерной особенностью наноструктурных материалов является их способность влиять на трибологические свойства смазочных материалов. Особый интерес представляют исследования модифицирующих свойств наномодификаторов относительно эксплуатационных свойств гидравлических масел.

Авторами проводилось исследование трибологических характеристик нанодисперсной добавки ТМТ-600 [4] и сравнение результатов в трибологических испытаниях чистых масел.

Смазочные материалы оценивались по следующим показателям: моменту трения; несущей способности, критической нагрузки, при которой происходит схватывание образцов; противоизносным свойствам.

Испытания проводились по плану многофакторного эксперимента по трибологической схеме «вращающийся ролик – неподвижные колодки с погружением в масло».

Исходным материалом при проведении испытаний на трение и износ явилось гидравлическое масло И-20.

Для каждого проводимого эксперимента изготавливались новые колодки в паре трения «ролик-колодки». Ролик вырезался из поршневого пальца автомобиля БелАЗ 7540, выполненного из стали 15Х, колодки изготавливались из стали 20.

Матрица эксперимента приведена в табл. 2.

Образец-ролик выполнен из стали 15Х, имеющей твердость HRC 60; чистота обработки поверхности Ra 0,63. Образцы колодки выполнены из стали 20, контурная площадь касания образцов 0,55 см².

Антифрикционные испытания проводились при постоянной нагрузке и следующих условиях:

– скорость скольжения при испытаниях смазочной среды И-20 и И-20+ТМТ $V = 2,5$ м/с;

- нормальная нагрузка на каждый образец $F_n = 200$ Н для масла И-20;
- длительность испытаний И-20 и И-20+ТМТ = 60 мин.

Таблица 2

Условия эксперимента

№ п/п	Смазочная среда	Пара трения	Вид испытания	Концентрация ТМТ в базовом масле, %
1	И-20	Ст.15Х-Ст.20	Антифрикционность, задиристость	0
2	И-20 + ТМТ-600	Ст.15Х-Ст.20	Антифрикционность, задиристость	0,01 0,1 0,5 1 5

Для оценки противоизносных, антифрикционных свойств и нагрузочной способности присадок к маслам осуществлялась приработка образцов трения в чистом и модифицированном составах масел до выхода характеристик по моменту трения ($M_{тр}$) на стационарный режим. При этом приработка образцов трения осуществляется при ступенчатой нагрузке, не превышающей $0,75 \Delta F_N$.

Противоизносные испытания проводятся при постоянной нагрузке F_N на образцы по схеме. Противозадирные свойства масла определяются путем ступенчатого нагружения образцов до схватывания.

Исследования проводились на оригинальном триботехническом стенде ТК-2, созданном в лаборатории ТГАСУ.

Некоторые результаты испытаний, согласно матрице эксперимента (табл. 2), приведены в виде графических зависимостей, полученных в режиме реального времени (рис. 7, 8).

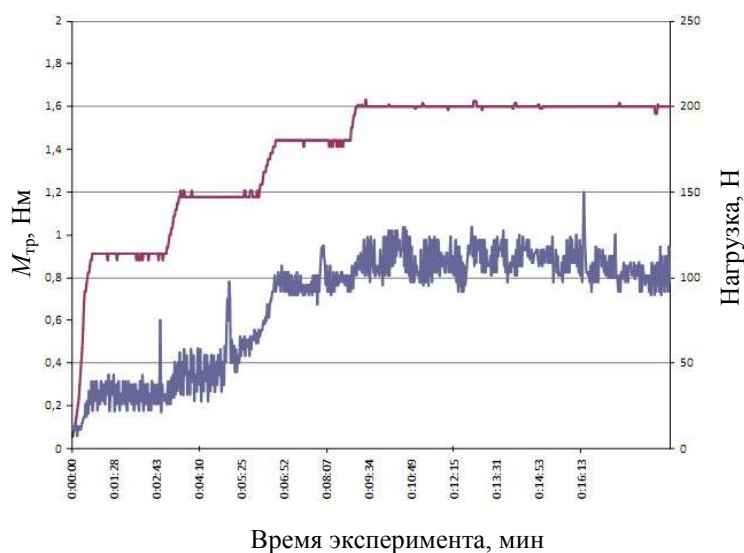


Рис. 7. Общий вид зависимости момента трения $M_{тр}$ от нагрузки F_N для чистого эталонного масла

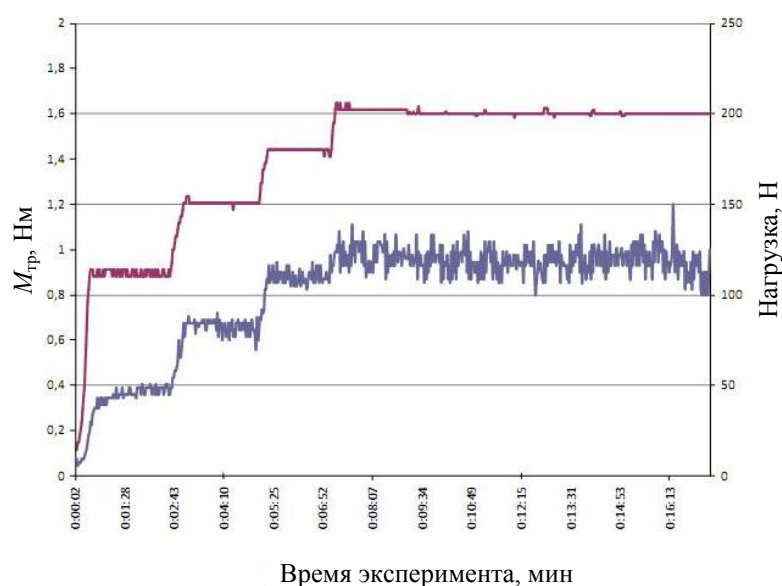


Рис. 8. Общий вид зависимости момента трения $M_{тр}$ от нагрузки F_N масла, модифицированного содержанием 0,5 % ТМТ-600

Можно сделать вывод, что применение наномодификатора ТМТ-600 позволяет улучшить противоизносные и антифрикционные свойства базового масла И-20 (табл. 3).

При концентрациях ТМТ-600 0,01–0,1 % нет изменения смазывающих характеристик масла.

При концентрациях ТМТ-600 0,5 % наблюдается стабилизация коэффициента трения при небольших нагрузках и повышение нагрузки схватывания на 36 %.

При концентрациях ТМТ-600 1 % наблюдается стабилизация коэффициента трения при небольших нагрузках и повышение нагрузки схватывания на 53 %.

При концентрациях ТМТ-600 5 % наблюдается повышение коэффициента трения и снижение нагрузки схватывания на 41 %.

Таблица 3

**Соотношения предельных нагрузок F_N (Н)
для исследованных смазочных составов**

Концентрация ТМТ-600 в базовом масле, %	Нагрузка схватывания, Н
0,01	Нет изменения
0,1	Нет изменения
0,5	+ 36 %
1	+ 53 %
5	–41 %

Таким образом, проведенные эксперименты показали высокую эффективность повышения смазочной способности рабочих жидкостей путем их модифицирования ТМТ-600. Дальнейшие исследования в области синтеза наномодификаторов направленного действия на основе торфа и других видов местного сырья представляют значительный как теоретический, так и практический интерес.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite* / Z. Li, H. Wang, S. He, Y. Lu, M. Wang // *Mater. Lett.* – 2006. – № 3. – P. 356–359.
2. *Nazari, A. The effects of ZrO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength self compacting concrete* / A. Nazari, H. Riahi // *Materials Research.* – 2010. – № 4. – Pp. 1–13.
3. *Nazari, A. Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of self-compacting concrete* / A. Nazari, H. Riahi // *Sadhana.* – 2011. – № 3. – P. 371–391.
4. *Tribochemistry and antiwear mechanism of organic-inorganic nanoparticles as lubricant additives* / B. Li, X. Wang, W. Liu, Q. Xue // *Tribol. Lett.* 22. – 2006. – P. 79–84.
5. *Пат. 107151. Российская Федерация. Установка для получения модифицирующей торфяной добавки и производства сухих строительных смесей с указанной добавкой* / Ю.С. Саркисов, Н.О. Копаница, А.В. Касаткина. – Оpubл. 10.08.2011, Бюл. № 22.
6. *Копаница, Н.О. Эффективные органоминеральные добавки на основе местного сырья* / Н.О. Копаница, Ю.С. Саркисов, А.В. Касаткина // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* – 2013. – № 4. – С. 184–190.
7. *Копаница, Н.О. Новые органоминеральные добавки на основе торфа для цементных систем* / Н.О. Копаница, Ю.С. Саркисов, А.В. Касаткина // *Строительные материалы.* – 2015. – № 4. – С. 93–96.
8. *Горшкова, А.В. Сухие строительные смеси с модифицирующей добавкой на основе торфа* : автореф. ... канд. наук. – Томск, 2015. – 24 с.
9. *Диагностика агрегатов машин методом высоковольтного тлеющего разряда* / Ю.А. Власов, Э.И. Удлер, Н.Т. Тищенко, Ю.С. Саркисов. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2013. – 198 с.
10. *Копаница, Н.О. Стеновые строительные материалы на основе модифицированных торфов Сибири* / Н.О. Копаница, А.И. Кудяков, Ю.С. Саркисов. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2013. – 295 с.
11. *Торфяные ресурсы Томской области и пути их использования в строительстве* / Л.В. Касицкая, Ю.С. Саркисов, Н.П. Горленко, Н.О. Копаница, А.И. Кудяков ; под ред. А.И. Кудякова, Ю.С. Саркисова. – Томск : SST, 2007. – 292 с.
12. *Tribological effects of fullerene (C60) nanoparticles added in mineral lubricants according to its viscosity* / B.C. Ku, Y.C. Han, J.E. Lee, J.K. Lee, S.H. Park, Y.J. Hwang // *Int. J. Prec.* – 2010. – Eng. Manuf. – № 11. – P. 607–611.
13. *Maharaj, Y. Effect of carbon nanohorns on nanofriction and wear reduction in dry and liquid environments* / Y. Maharaj, B. Bhushan, S. Iijima // *J. Colloid Interf. Sci.* – 2013. – P. 147–160.

REFERENCES

1. *Li Z., Wang H., He S., Lu Y., Wang M. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. Mater. Lett.* 2006. V. 60. No. 3. Pp. 356–359.
2. *Nazari A., Riahi H. The effects of ZrO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength self compacting concrete. Materials Research.* 2010. V. 13. No. 4. P. 1–13.
3. *Nazari A., Riahi H. Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of self-compacting concrete. Sadhana.* 2011. V. 36. Pt. 3. Pp. 371–391.

4. Li, B., Wang, X., Liu, W., Xue, Q. Tribochemistry and antiwear mechanism of organic–inorganic nanoparticles as lubricant additives. *Tribol. Lett.* 2006. No. 22. Pp. 79–84.
5. Sarkisov Yu.S., Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V. Ustanovka dlya polucheniya modifitsiruyushchei torfyanoi dobavki i proizvodstva sukhikh stroitel'nykh smesei s ukazannoi dobavkoi [Apparatus for production of modifying peat additive and dry construction mixes]. RF Patent N 107151. 2011. (rus)
6. Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S., Kasatkina A.V. Effektivnye organimineral'nye dobavki na osnove mestnogo syr'ya [Efficient organomineral agents based on local raw materials]. *Vestnik TSUAB*. 2013. No. 4. Pp. 184–190. (rus)
7. Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S., Kasatkina A.V. Novye organimineral'nye dobavki na osnove torfa dlya tsementnykh sistem [New peat-based additives for cement systems]. *Construction Materials*. 2016. No. 4. Pp. 93–96. (rus)
8. Gorshkova A.V. Sukhie stroitel'nye smesi s modifitsiruyushchei dobavkoi na osnove torfa. Avtoreferat na soiskanie uchenoi stepeni kand. nauk [Dry construction mixes with peat-based modifying additive. PhD Abstract].
9. Vlasov Yu.A., Udler E.I., Tishchenko N.T., Sarkisov Yu.S. Diagnostika agregatov mashin metodom vysokovol'nogo tleyushchego razryada [Machine aggregate diagnostics using glow discharge]. Tomsk: TSUAB Publ., 2013. 198 p. (rus)
10. Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S., Kasatkina A.V. Novye organomineral'nye dobavki na osnove mestnogo syr'ya [New organomineral agents based on local raw materials]. *Vestnik TSUAB*. No. 4. Pp. 184–190. (rus)
11. Kasitskaya L.V., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Kopanitsa N.O., Kudyakov A.I. Torfyanye resursy Tomskoi oblasti i puti ikh ispol'zovaniya v stroitel'stve [Peat bogs of Tomsk region and their use in construction]. Eds. A.I. Kudyakov, Yu.S. Sarkisov. Tomsk: SST Publ., 2007. 292 p. (rus)
12. Ku B.C., Han Y.C., Lee J.E., Lee J.K., Park S.H., Hwang Y.J. Tribological effects of fullerene (C60) nanoparticles added in mineral lubricants according to its viscosity. *Int. J. Prec. Eng. Manuf.* 2010. No. 11. Pp. 607–611.
13. Maharaj Y., Bhushan B., Iijima S. Effect of carbon nanohorns on nanofriction and wear reduction in dry and liquid environments. *J. Colloid Interf. Sci.* 2013. No. 400. Pp. 147–160.