

Для цитирования: Дорохов А.Ф., Санаев Н.К., Проватар А.Г. НАСЫЩЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗЕРКАЛА РАБОЧЕГО ЦИЛИНДРА ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ВЫСОКООРГАНИЗОВАННЫМИ ФОРМАМИ УГЛЕРОДА. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;42 (3):27-33. DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-27-33

For citation: Dorokhov A.F., Sanaev N. K., Provatar A. G. SATURATION OF THE SURFACE LAYER OF THE MIRROR CYLINDER OF PISTON INTERNAL COMBUSTION ENGINES IS HIGHLY ORGANIZED FORMS OF CARBON. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;42 (3):27-33. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-27-33

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ. МЕХАНИКА PHYSICAL-MATHEMATICAL SCIENCE. MECHANICS

УДК 621.9.015-621.432

DOI: 10.21822/2073-6185-2016-42-3-27-33

Дорохов А.Ф.¹, Санаев Н.К.², Проватар А.Г.³

¹Астраханский государственный технический университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16,
e-mail: dorokhovaf@rambler.ru,

²Дагестанский государственный технический университет,
367015 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70,
e-mail: nurik909@mail.ru,

³Волжский государственный университет водного транспорта,
Астраханский филиал,
414056, г. Астрахань, ул. Набережная Приволжского Затона, 14а,
e-mail: provatar@mail.ru.

НАСЫЩЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗЕРКАЛА РАБОЧЕГО ЦИЛИНДРА ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ВЫСОКООРГАНИЗОВАННЫМИ ФОРМАМИ УГЛЕРОДА

Аннотация. Целью настоящего исследования является рассмотрение задачи создания в поверхностном слое зеркала рабочего цилиндра структуры, обеспечивающей противоизносные и антифрикционные свойства. **Методы.** Открытие новых форм углерода - фуллеренов и изучение их свойств дало направление развитию микромеханики трения и износа на основе формирования новых качеств поверхностного слоя в парах трения путём насыщения его кристаллической структуры выпуклыми многогранными молекулами фуллеренов, преимущественно C_{60} и C_{70} . **Результат.** В таких случаях наиболее приемлемыми будут технологии нанесения, например – посредством безабразивного хонингования (шаржирования) цилиндров ДВС. Важным и новым в этом направлении является то, что в данном случае преследуется цель внедрения фуллеренов посредством их диффузии в кристаллическую решётку поверхностного слоя детали, подвергающейся трению и изнашиванию. **Вывод.** Доказано, что сочетание температурного, барометрического и напряжённого факторов при внедрении имплантата в поверхностный слой создаёт возможность избежать при работе двигателя возникновения термоупругих сил, стремящихся вытолкнуть безабразивный состав из впадин микрорельефа колец силами трения покоя.

Ключевые слова: фуллерены, диффузия, безабразивное хонингование, шаржирование, коэффициент диффузии, зеркало цилиндра

Alexander F.¹ Dorokhov, Nadyr K.² Sanaev, Aleksey G.³ Provatar
Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056,
e-mail: dorokhovaf@rambler.ru,
²Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave, Makhachkala, 367015,

e-mail: nurik909@mail.ru,
Astrakhan branch Volga State University of water transport,
14^a Volga Embankment Backwater Ave, Astrakhan, 414056,
e-mail: provatar@mail.ru

SATURATION OF THE SURFACE LAYER OF THE MIRROR CYLINDER OF PISTON INTERNAL COMBUSTION ENGINES IS HIGHLY ORGANIZED FORMS OF CARBON

Abstract. Aim. The purpose of the real research also is consideration of a problem of creation in a blanket of a mirror of the working cylinder of the structure providing antiwear and antifrictional properties. **Methods.** Opening of new forms of carbon - fullerenes and studying of their properties has channelized development of micromechanics of friction and wear on the basis of formation of new qualities of a blanket in couples of friction by saturation of its crystal structure by convex many-sided molecules of fullerenes, mainly to C₆₀ and C₇₀. **Results.** In such cases the most acceptable will be technologies of drawing, for example – by means of a bezabrazivny honingovaniye (charging) of DVS cylinders. And new in this direction the fact that in this case the aim of introduction of fullerenes, by means of their diffusion, in a crystal lattice of a blanket of the detail which is exposed to friction and wear is pursued is important. **Conclusion.** It is proved that the combination of temperature, barometric and intense factors at introduction of an implant in a blanket creates an opportunity to avoid during the operation of the engine of emergence of the thermoelastic forces seeking to push out bezabrazivny structure from hollows of a microrelief of rings and rest friction forces.

Key words: fullerenes, diffusion, bezabrazivny honingovaniye, charging, diffusion coefficient, cylinder mirror

Введение. Поршневые двигатели внутреннего сгорания, особенно дизельные, являются основой приводов движителей большинства наземных и водных транспортных средств, которым нет альтернативы в обозримой перспективе.

Важным аспектом улучшения эксплуатационных показателей поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является повышение износостойкости зеркала рабочего цилиндра и уменьшение потерь мощности на преодоление сил трения в цилиндропоршневой группе (ЦПГ). В этом направлении выполнены многочисленные исследования, результаты которых изложены в работах различных авторов [1,2,3]. Однако большая часть этих исследований была посвящена повышению твёрдости поверхностного слоя зеркала рабочего цилиндра за счёт термической, химико-термической обработки поверхностного пластического деформирования, при этом уменьшение потерь мощности на преодоление сил трения в ЦПГ достигалось за счёт применения плакирующих присадок к моторным маслам [11,12,13,14,15].

Другое направление – создание различных типов регулярных микрорельефов на зеркале цилиндра, обеспечивающих повышение маслоёмкости поверхности или механическое нанесение на зеркало цилиндра различного рода антифрикционных приработочных покрытий многокомпонентного состава. При этом вопрос о создании в поверхностном слое условий, одновременно способствующих повышению твёрдости (следовательно, износостойкости) и антифрикционных свойств, не ставился.

Постановка задачи. Целью настоящего исследования является решение задачи создания в поверхностном слое зеркала рабочего цилиндра структуры, обеспечивающей противоизносные и антифрикционные свойства.

Открытие новых форм углерода - фуллеренов и изучение их свойств дало направление развитию микромеханики трения и износа на основе формирования новых качеств поверхностного слоя в парах трения путём насыщения его кристаллической структуры выпуклыми многогранными молекулами фуллеренов, преимущественно C₆₀ и C₇₀, которые в их твёрдом состоянии получили название фуллериты. Уже первые эксперименты по исследованию механических свойств фуллерита подтвердили надежду на создание высокоэффективного твердого смазывания на основе фуллеренов. Согласно работ [4,5,6], поверхность твердых материалов, покрытых фуллереновой пленкой, имеет аномально низкий коэффициент трения, повышенную долговеч-

ность и износостойкость. Если технология производства такого покрытия будет настроена, и будет обеспечиваться возможность его практического использования, то износостойкость деталей повысится в 1,5 – 2,5 раза, расходы топлива сократятся на 2 – 7% и мощность ДВС возрастёт на 2 – 4%.

Методы исследования. Наиболее распространённым способом внедрения фуллеренов в поверхностный слой пар трения это - нанесение, напыление, наплавка. Технологии напыления и наплавки достаточно хорошо отработаны и апробированы в производстве, но они наиболее применимы для формирования слоя со специальными свойствами для наружных поверхностей [3]. Но эти же технологии трудноприменимы для их реализации на внутренних поверхностях, например для зеркала цилиндра ДВС с диаметром менее 200 мм. В таких случаях наиболее приемлемыми будут технологии нанесения, например, посредством безабразивного хонингования (шаржирования) цилиндров ДВС, как указано в работах [7, 8]. Важным и новым в этом направлении является то, что в данном случае преследуется цель внедрения фуллеренов, посредством их диффузии в кристаллическую решётку поверхностного слоя детали, подвергающейся трению и изнашиванию, а не нанесения плёнки за счёт адгезии.

Заметим, что диффузия, как физическое явление, имеет несколько форм, которые достаточно полно описаны в научной литературе. Определим диффузию как процесс переноса вещества из одной части системы в другую, происходящий под действием градиента концентрации. Однако градиент концентрации – важная, но не единственная причина, вызывающая перенос вещества в системе.

При свободной диффузии не взаимодействующих между собой частиц (в отсутствие приложенных внешних сил) в однородном и изотропном твердом теле поток диффузионных частиц пропорционален градиенту концентрации dC/dx (для одномерного случая). Связь между ними определяется первым законом Фика, $J = -D dC/dx$, где D , коэффициент диффузии атомов. Из данного выражения можем определить коэффициент диффузии как скорость, с которой система способна при заданных условиях создать нулевую разность концентраций. Знак «минус» в выражении означает, что поток атомов направлен из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией.

В рассматриваемом случае необходимо диффундировать молекулы фуллерена из состава безабразивных хонинговальных брусков (безабразивный состав – БА) в поверхностный слой обрабатываемого зеркала цилиндра. Безабразивные бруски для такого вида обработки получают спеканием многокомпонентного состава из 20% фуллерена C_{60} , 5% меди и 75% политетрафторэтилена (фторопласт-4). Предполагается использовать для диффундирования в поверхностный слой обрабатываемого изделия такие формы диффузии, как термодиффузия и бародиффузия. Скорость термодиффузии, выражаемая коэффициентом диффузии D_T , определяется выражением [9, 10],

$$D_T = D_0 \exp [- Q/(k_B T)], \text{ м}^2/\text{с} \quad (1)$$

где D_0 – частотный фактор, $\text{м}^2/\text{с}$; Q – энергия активации процесса диффузии, эВ; k_B – постоянная Больцмана, $1,380\ 648\ 52(79) \cdot 10^{-23}$ Дж K^{-1} . Экспериментальные значения при диффундировании углерода в железоуглеродистый сплав: $D_0 = 2,0 \cdot 10^{-5}$; $Q = 0,9$, [10]. Обеспечение термодиффузии требует создания температурного градиента, что возможно при нагреве обрабатываемого изделия до значений температур, соответствующих его эксплуатационным температурам. Аналогично коэффициенту термодиффузии определяется коэффициент бародиффузии, D_p .

$$D_p = D_0 \exp [- Q/(k_B p)], \text{ м}^2/\text{с}, \quad (2)$$

где p – давление в зоне диффундирования, Па. Давление в зоне диффундирования будет определяться давлением разжима хонинговальных брусков.

В данном случае предполагается, что, в следствие принципа аддитивности, направленность обеих форм диффузии будет одинакова, и тогда общий суммарный коэффициент диффузии будет представлять собой сумму выражений 1 и 2, т.е.

$$D_{\Sigma} = D_T + D_p. \quad (3)$$

При этом надо учитывать то, что D определяет количество вещества (кг), проходящего через единичную площадь (1 м^2) в 1 секунду – $\text{м}^2/\text{с}$. Тогда значение D_{Σ} необходимо привести к площади поверхности зеркала цилиндра, т.е. $D_{\text{общ}} = D_{\Sigma} * K_{\text{з.ц}}$, где $K_{\text{з.ц}}$ – коэффициент, характеризующий соотношение площади поверхности зеркала конкретного цилиндра (в м^2) к поверхности в 1 м^2 . Окончательно, количество диффундированного вещества будет определяться временем обработки цилиндровой втулки t_0 , где t_0 – основное время шаржирования, мин.

Фактором, усиливающим диффузионное проникновение фуллера в поверхностный слой, может послужить ситуация, при которой будут более явно выделены дислокации и свободные вакансии в кристаллической решётке. Такая ситуация может быть создана за счёт организации напряжений растяжения поверхностного слоя изделия в который будет диффундировать фуллерен.

Обсуждение результатов. С учётом всех вышеизложенных факторов предлагается конструктивная схема приспособления для насыщения поверхностного слоя зеркала цилиндровой втулки фуллереном путём безабразивного хонингования – шаржирования (рис. 1).

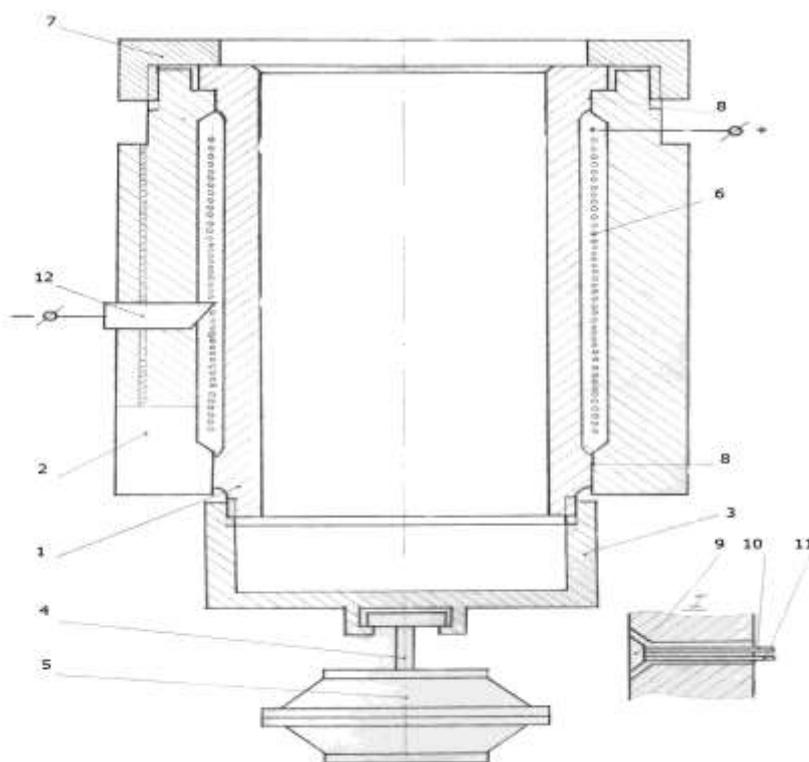


Рисунок 1 - Конструктивная схема приспособления

Как показано на рисунке 1, 1 – цилиндровая втулка; 2 – корпус приспособления; 3 – стакан, навинчиваемый на резьбу на нижней части втулки; 4 – шток пневмокамеры; 5 – пневмокамера; 6 – индукторная обмотка; 7 – прижимная гайка приспособления; 8 – места установки термопар в приспособлении; 9 – спай термопары; 10, 11 – термоэлектроды; 12 – подвижный контакт в пазе корпуса приспособления.

Цилиндровая втулка, установленная в приспособлении, базируется по верхнему посадочному пояску и торцу бурта, фиксируется прижимной гайкой 7, а на её нижнюю часть навинчивается стакан 3.

В индукторную обмотку подаётся ток, посредством чего втулка разогревается. В теле втулки создаётся температурное поле, аналогичное или близкое к её действительному температурному полю в эксплуатации, показатели которого определены расчётно или экспериментально. Значения температурного поля регулируются силой тока путём перемещения подвижного контакта 12 по показаниям термомпар 8. Посредством пневмокамеры в поверхностном слое зеркала цилиндра создаются упругие напряжения растяжения $\sigma_p = E \epsilon$, где E – модуль упругости для материала цилиндра, МПа. Так создаются условия, способствующие проникновению фуллеренов в поверхностный слой зеркала цилиндра, в результате чего ожидается повышение его износостойкости и трибологических характеристик.

Внедрение БС в поверхностный слой будет достаточно успешным при формировании специального микропрофиля поверхности путём плосковершинного хонингования. Процесс плосковершинного хонингования производится в результате трех операций:

- черновое хонингование алмазными брусками зернистостью 160/125 мкм, частота вращения хонинговальной головки $n = 100$ об/мин, скорость возвратно-поступательного движения хонинговальной головки, $V_{В-П} = 31$ дв.х/мин, давление разжима хонинговальных брусков по манометру станка $p = 1,3$ МПа, смазочно-охлаждающая жидкость - керосин 70%, масло минеральное – 30%;
- получистовое хонингование алмазными брусками зернистостью 100/80 мкм, $n = 100$ об/мин. $V_{В-П} = 31$ дв.х/мин, $p = 1,0$ МПа. СОЖ керосин 70%, масло 30%;
- чистовое хонингование алмазными брусками зернистостью 80/60 мкм, $n = 100$ об/мин. $V_{В-П} = 31$ дв.х/мин, $p = 0,4$ МПа. СОЖ керосин 70%, масло 30%.

В результате комплекса хонинговальных операций на обработанной поверхности зеркала цилиндра образуется система микронеровностей, которая состоит из сравнительно глубоких впадин, оставшихся от чернового хонингования и площадок с собственной шероховатостью, образовавшихся после окончательного хонингования путём частичного срезания выступов исходного профиля, как показано на рис. 2.

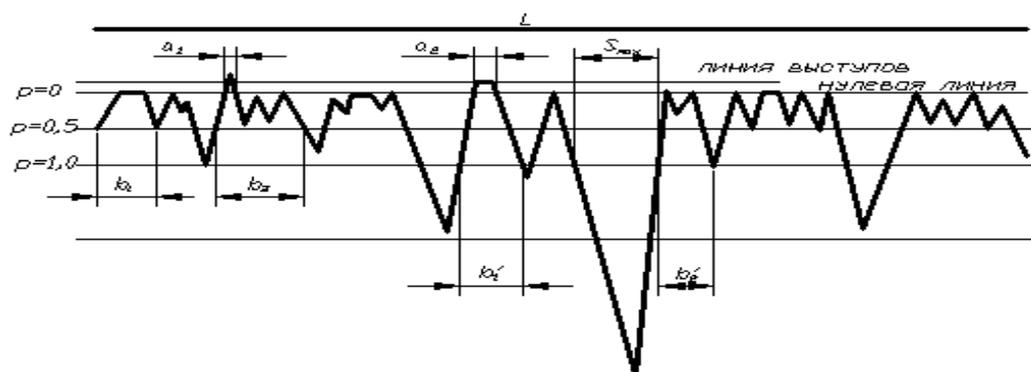


Рисунок 2 - Профилограмма зеркала цилиндрической втулки

Вывод. При втирании БС в поверхностный слой зеркала цилиндра, сам БС, а также элементы микрорельефа зеркала упруго деформируются. В дальнейшем, при работе двигателя, под действием рабочей температуры, появляются температурные деформации, что предопределяет сложное напряжённое состояние соединения «цилиндр – БС».

Сочетание трёх факторов при внедрении имплантата в поверхностный слой – температурного, барометрического и напряжённого даёт возможность избежать при работе двигателя возникновения термоупругих сил, стремящихся вытолкнуть БС из впадин микрорельефа и он будет там находиться, удерживаемый силами разжима поршневых колец и силами трения по кою. Диффузионное проникновение фуллерена в поверхностный слой зеркала цилиндра будет

продолжаться ещё какое-то время после начала эксплуатации двигателя под действием тех же факторов – температуры, давления и напряжённого состояния.

Библиографический список:

1. Мышкин М.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. – М.: Физматлит, 2007 – С. 150-368.
2. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением: Справочник. – С-Пб.: Политехника, 1998. – 414 с.
3. Технология упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: материалы 17-ой междунар. науч.-практ. конф. 14-17 апреля 2015 года. – С-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015 –С.345-365.
4. Елецкий А.В., Смирнов В.М. Фуллерены // УФН, 1993. - №2. - С.33-58.
5. Gusev A.I., Rempel A.A. Nanocrystalline Materials. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2004, pp. 250-280.
6. Сидоров Л.Н., Юровская М.А., Борщевский А.Я. и др. Фуллерены. — М.: Экзамен, 2005. - 687 с.
7. Дорохов А.Ф., Санаев Н.К. Исследование надёжности сцепления антифрикционного покрытия с рабочей поверхностью цилиндра судового ДВС //Вестник Астраханского государственного технического университета. Морская техника и технология. 5(46)/2008, Астрахань,- Издательство АГТУ.- С. 143-147.
8. Дорохов А.Ф., Санаев Н.К., Масуев М.А. Снижение потерь мощности на преодоление сил трения в судовых высокооборотных дизелях//Трение и смазка в машинах и механизмах, № 9, 2008. С. 18-21.
9. Гуров К.П., Карташкин Б.А., Угастэ Ю.Э. Взаимная диффузия в многофазных металлических системах. - М.: Наука, 1981. -350 с.
10. Диффузия в кристаллах: Интернет-ресурс <http://dssp.petrstu.ru>.
11. Silva S.A.M., Perez J., Torresi R.M., Luengo C.A., Ticianelli E.A. Surface and electrochemical investigations of a fiillerene soot. *Electrochimica Acta*. 1999, vol.44, no.20, pp.3565 – 3574.
12. Yang Z.H., Wu H.Q. Electrochemical intercalation of lithium into fullerene soot. *Mat Lett*. 2001, vol.50, no.2, pp.108-114.
13. Wang Z., Ogata H., Morimoto Sh., Fujishige M., Takeuchi K., Hashimoto Y., Endo M. High-temperature-induced growth of graphite whiskers from fullerene waste soot. *Carbon*, 2015, vol.90, pp.154-159.
14. Endo M., Kim Y.A., Hayashi T. et al. Microstructural changes induced in "Stacked cup" carbon nanofibers by hit treatment. *Carbon*. 2003, vol.41, pp.1941 – 1947.
15. Goel A., Hebgen P., Vander Sande J.B., Howard J.B. Combustion synthesis of fullerenes and fullerenic nanostructures. *Carbon*, 2002, vol.40, no.2, pp.177- 182.

References:

1. Myshkin M.K., Petrokovets M.I. Friction, lubrication, wear. Physical foundations and technical applications of tribology. *Moscow: Fizmatlit*, 2007, pp.150-368. (In Russian)
2. Shneyder Yu.G. Technology of finishing by pressure: a Handbook. St. Petersburg: *Politekhnik*, [Politehnica], 1998, 414 p. (In Russian)

3. Technology hardening, coating and repair: theory and practice: proceedings of the 17th Intern. scientific.-pract. Conf. April 14-17, 2015. St. Petersburg: *Publishing house of Polytechnical University*, 2015, pp.345-365. (In Russian)
4. Eleetskii A.V., Smirnov V.M. Fullerene. *UFN*, 1993, no. 2, pp.33-58. (In Russian)
5. Gusev A.I., Rempel A.A. Nanocrystalline Materials. Cambridge: *Cambridge International Science Publishing*, 2004, pp. 250-280.
6. Sidorov L.N., Yurovskaya M.A., Borshchevsky A.Ya. Fullerenes. *Moscow: Exam*, 2005, p.687. (In Russian)
7. Dorokhov A.F., Sanaev N.K. Investigation of the reliability of adhesion anti-friction coatings with the working surface of the cylinder marine engine. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. [Herald of Astrakhan State Technical University. Marine engineering and technology]. Astrakhan. Publishing house of ASTU, 2008, vol.46, no.5, pp.143-147. (In Russian)
8. Dorokhov A.F., Sanaev N.K., Masuev M.A. Reduction of power losses to overcome friction forces in marine high-speed diesel engines. *Friction and lubrication in machines and mechanism* B.A., and Yu. e Ugaste Mutual diffusion in multiphase metallic systems. *Moscow: Nauka*, 1981, 350p. (In Russian)
9. Diffusion in crystals: an Internet resource. Access mode <http://dssp.petrstu.ru> (In Russian)
10. Silva S.A.M., Perez J., Torresi R.M., Luengo C.A., Ticianelli E.A. Surface and electrochemical investigations of a fullerene soot. *Electrochimica Acta*. 1999, vol.44, no.20, pp.3565 – 3574.
11. Yang Z.H., Wu H.Q. Electrochemical intercalation of lithium into fullerene soot. *Mat Lett*. 2001, vol.50, no.2, pp.108-114.
12. Wang Z., Ogata H., Morimoto Sh., Fujishige M., Takeuchi K., Hashimoto Y., Endo M. High-temperature-induced growth of graphite whiskers from fullerene waste soot. *Carbon*, 2015, vol.90, pp.154-159.
13. Endo M., Kim Y.A., Hayashi T. et al. Microstructural changes induced in "stacked cup" carbon nanofibers by hit treatment. *Carbon*. 2003, vol.41, pp.1941 – 1947.
14. Goel A., Hebgan P., Vander Sande J.B., Howard J.B. Combustion synthesis of fullerenes and fullerenic nanostructures. *Carbon*, 2002, vol.40, no.2, pp.177- 182.

Сведения об авторах.

Дорохов Александр Федорович – доктор технических наук, профессор.

Санаев Надыр Кельбиханович – кандидат экономических наук, декан заочного факультета, доцент кафедры организации и безопасности движения транспортного факультета.

Проватар Алексей Геннадьевич – начальник судоводительского отделения Каспийского института морского и речного транспорта.

Authors information.

Alexander F.Dorohov – doctor of technical Sciences, Professor.

Aleksey G. Prowatar – head of the navigation Department of the Caspian Institute of sea and river transport.

Nadyr K. Sanaev – candidate of economic Sciences, Dean of distance faculty, associate Professor of Department of organization and traffic safety, transport faculty.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.06.2016.

Принята в печать 20.07.2016.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 01.06.2016.

Accepted for publication 20.07.2016.