

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

SHIP ELECTRIC POWER INSTALLATIONS AND MACHINE-PROPULSIVE COMPLEXES

Научная статья

УДК 621.891

doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-62-74

Исследование и разработка перспективных смазочных материалов для применения в судовых дизельных двигателях и повышения ресурса цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания

*В. А. Чанчиков^{1✉}, И. Н. Гужвенко², А. И. Андреев³,
М. А. Шулимова⁴, С. А. Свекольников⁵*

*^{1, 2, 3, 4} Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, bazelius87@mail.ru ✉*

*⁵ ЛУКОЙЛ-Астраханьэнерго,
Астрахань, Россия*

Аннотация. Приводятся результаты исследований влияния переменных характеристик смазочных масел судового назначения (концентрация слоистого модификатора трения в смазочном масле, вязкость смазочного масла, контактное давление в зоне трения) на трибологические параметры деталей цилиндропоршневой группы судовых дизельных двигателей внутреннего сгорания. Рассматриваются вопросы повышения надежности и износостойкости цилиндропоршневой группы судовых дизельных двигателей при введении в состав базового смазочного масла слоистого модификатора трения в концентрации в пределах 1,5 об. %. Проведены сравнительные трибологические исследования смазочного масла М-16Г2ЦС, в том числе с содержанием присадки на основе диселенида молибдена. Представлены зависимости изнашивания деталей цилиндропоршневой группы судового двигателя от различных параметров изучаемых смазочных материалов. Проведены исследования интенсивности изнашивания экспериментальных образцов в условиях переменных характеристик смазочных материалов. На основе проведенных трибологических исследований смазочных и конструкционных материалов произведено построение трибологического рейтинга смазочных композиций, содержащих судовое моторное масло М-16Г2ЦС как базовую основу и слоистый модификатор трения – диселенид молибдена, трибологически активную добавку. Средство испытания на противоизносную способность смазочных материалов – машина трения оригинальной конструкции с истирающимися образцами по схеме контакта «шар – цилиндр». Одним из переменных параметров в испытаниях являлось наличие механического перемешивания смазочной среды типа «масло + присадка» на ротационно-пульсационной установке РПУ-0,8-55А. Трибологическая эффективность рассматриваемой противоизносной присадки варьируется в зависимости от вида перемешивания раствора присадки до внесения в базовое смазочное масло и составляет 13–54 % (различие в диаметре пятна износа образца) для механического перемешивания и 45–56 % для ротационно-пульсационного вида перемешивания.

Ключевые слова: слоистый модификатор трения, дизельный двигатель, цилиндропоршневая группа, противоизносная присадка, машина трения, трибологический рейтинг, смазочная композиция, ротационно-пульсационная установка

Для цитирования: Чанчиков В. А., Гужвенко И. Н., Андреев А. И., Шулимова М. А., Свекольников С. А. Исследование и разработка перспективных смазочных материалов для применения в судовых дизельных двигателях и повышения ресурса цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 4. С. 62–74. doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-62-74.

Research and development of commercially viable lubricants to intensify working life of marine diesel engines and cylinder piston group in internal combustion engines

V. A. Chanchikov^{1✉}, I. N. Guzhvenko², A. I. Andreev³,
M. A. Shulimova⁴, S. A. Svekolyukov⁵

^{1, 2, 3, 4} Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, bazelius87@mail.ru ✉

⁵ LUKOIL-Astrakhanenergo,
Astrakhan, Russia

Abstract. The paper presents the results of studying the influence of variable characteristics of lubricating oils for marine diesel engines (concentration of layered friction modifier in lubricating oil, viscosity of lubricating oil, contact pressure in the friction zone) on the tribological parameters of parts of the cylinder-piston group of marine diesel engines. There are considered the aspects of increasing the reliability and wear resistance of the cylinder-piston group of marine diesel engines when a layered friction modifier is added to the base lubricating oil in a concentration of 1.5 vol.%. There have been carried out the comparative tribological studies of M-16Г2ЦС lubricating oil including an additive based on molybdenum diselenide. Dependences of the wear of parts of the cylinder-piston group of a marine engine on different parameters of the studied lubricants are shown. The wear rate of experimental samples in conditions of variable characteristics of lubricants has been studied. According to the tribological studies of lubricants and structural materials, the tribological rating of lubricating compositions containing M16Г2ЦС marine engine oil as a base and a layered friction modifier - molybdenum diselenide as a tribologically active additive was built. The test tool for the antiwear ability of lubricants is a friction machine of an original design with abraded samples according to the “ball-cylinder” contact scheme. Mechanical mixing of the lubricating medium of “oil + additive” type on the ППУ-0.8-55А rotary-pulsating unit was one of the variable parameters in the tests. The tribological efficiency of the studied antiwear additive varies depending on the type of mixing of the additive solution before adding to the base lubricating oil and makes 13-54% (the difference in the diameter of the wear spot of the sample) for mechanical mixing, and for rotary-pulsation mixing - 45-56%.

Keywords: layered friction modifier, diesel engine, cylinder-piston group, antiwear additive, friction machine, tribological rating, lubricant composition, rotary-pulsation plant

For citation: Chanchikov V. A., Guzhvenko I. N., Andreev A. I., Shulimova M. A., Svekolyukov S. A. Research and development of commercially viable lubricants to intensify working life of marine diesel engines and cylinder piston group in internal combustion engines. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2021;4:62-74. (In Russ.) doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-62-74.

Введение

Трение и изнашивание в цилиндропоршневой группе (ЦПГ) судового дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) является сложным процессом со следующими характерными особенностями:

- возвратно-поступательное движение с меняющейся от наибольшей к наименьшей (нулевой) скорости хода поршня и поршневых колец по цилиндровой гильзе вблизи «мертвых» точек хода;
- высокая контактная температура поверхностей трения и, соответственно, теплоотдача от цилиндровой гильзы в систему охлаждения двигателя;
- непостоянная по величине и уменьшающаяся до критических значений вблизи «мертвых» точек хода поршня толщина смазочной пленки;
- большие контактные нагрузки (при перекладке поршня и компрессионных колец от стенки к стенке гильзы цилиндра) юбки поршня, рабочей кромки поршневого кольца и зеркала гильзы под действием высокого внутрицилиндрового рабочего давления в двигателе.

Общая совокупность указанных выше факторов, сопровождающих процесс трения подвижных (кольца и поршня) и неподвижных (гильза) деталей ЦПГ, дополняется высокой вероятностью попадания во внутрицилиндровое пространство охлаждающей воды или запыленного воздуха. Эти факторы создают предпосылки для перехода деталей ЦПГ от нормальной скорости изнашивания к ускоренной ввиду коррозионных и абразивных составляющих процесса трения. В связи с этим для уменьшения изнашивания деталей ЦПГ необходимо обеспечить переход от граничного механизма трения к полужидкостному в трибологической паре «компрессионное кольцо – рабочий цилиндр». Перспективным в техническом плане шагом к переходу от трения при контакте микронеровностей поверхностей деталей ЦПГ к полужидкостному и гидродинамическому механизму их истирания является создание защитного слоя на этих поверхностях. Такой слой, толщина которого достигает 0,1–0,22 мкм, может быть создан путем введения в состав базового смазочного масла специальных твердосмазочных порошков типа сульфидов, селенидов и силицидов. Все они являются дихалькогенидами тугоплавких материалов типа серы, молибдена, кремния, а также других металлов. Сернистые соединения типа MoS_2 давно и успешно используются в машиностроительной промышленности и создании смазочных материалов для тяжело нагруженных узлов трения [1]. Силициды типа SiS_n охарактеризованы в отдельных литературных источниках как достаточно эффективные в условиях высоких температур (200–600 °С), но обладающие высокими энергетическими затратами на трение поверхностей [2]. Диселенид молибдена MoSe_2 также охарактеризован в ряде периодических литературных источников [3–5] как перспективный материал для создания трибологических спеченных поверхностей, сформированных на поверхности традиционных истирающихся металлов (сталь, чугун, цветные металлы), но практического применения в качестве твердых смазок в условиях ЦПГ не получил.

Трибологическая эффективность некоторых слоистых модификаторов трения (СМТ) успешно доказана различными исследованиями триботехнического направления [6, 7]. Наряду с периодическими изданиями, публикующими результаты испытаний СМТ, имеются сведения о запатентованных формулах СМТ [7], позволяющих повысить их седиментационную стойкость и диапазоны рабочих параметров: температуру, контактное давление и др. Анализ работ [6, 7] доказывает, что получение маслорастворимых коррозионно-устойчивых СМТ возможно при отказе от сернистых соединений типа MoS_2 и замене их селенистыми. Технологическим условием обработки селенистых соединений СМТ, например диселенида молибдена MoSe_2 , способствующим улучшению их седиментационной стойкости, по нашему мнению, может быть тщательное перемешивание данного твердосмазочного препарата в объеме стабилизирующих средств, например ненасыщенных кислот. В [8] приведена запатентованная формула противоизносной присадки на основе диселенида молибдена, стеариновой и олеиновой жирных ненасыщенных кислот, имеющих массовое соотношение 10/30/60 % в объеме получаемого раствора присадки. В ряде периодических научных источников [9, 10] отражены практические результаты получения устойчивого раствора противоизносной присадки, являющейся по сути маслорастворимым СМТ. Возможность использования присадки [8] как эффективной добавки для смазочных моторных и циркуляционных масел судового назначения, в зависимости от наличия предварительного перемешивания, рассматривается в данной работе.

Цели, задачи и методика исследования

Цель настоящего исследования – построение трибологического рейтинга смазочных композиций на основе циркуляционного масла М-16Г2ЦС и противоизносной присадки [8] на основе СМТ – диселенида молибдена. Реологические и трибологические характеристики циркуляционного масла М-16Г2ЦС по ГОСТ 12337-84 приведены в табл. 1. Содержание компонентов рассматриваемой противоизносной присадки и показатели ее плотности приведены в табл. 2.

Трибологический рейтинг смазочных композиций на основе смазочного масла и противоизносной присадки строился с помощью экспериментальной установки оригинальной конструкции [11].

Таблица 1
Table 1

Реологические и трибологические характеристики циркуляционного масла М-16Г2ЦС
Rheological and tribological characteristics of circulating oil M-16Г2ЦС

Параметры по ГОСТ 12337-84	Значение
Вязкость кинематическая при 100 °С, мм ² /с	15,5–17,0
Плотность при 20 °С, кг/м ³	910
Индекс задириобразования, Н	340
Критическая нагрузка, Н	823
Показатель изнашиваемости при постоянной нагрузке 196 Н	0,4

Таблица 2
Table 2

Компонентный состав и плотность разработанной противоизносной присадки
Component composition and density of the developed antiwear additive

Параметр	Значение
Плотность при 20 °С, кг/м ³	990
Содержание компонентов, масс. %	
Диселенид молибдена MoSe ₂	10
Стеариновая кислота C ₁₈ H ₃₆ O ₂	30
Олеиновая кислота C ₁₈ H ₃₄ O ₂	60

Базой сравнения выступало смазочное масло М-16Г2ЦС. Объем масла $V = 10 \text{ см}^3$ заливался в испытательную камеру установки.

В испытательной камере приводился в действие приводной вал, вращающий подвижный образец – кольцо подшипника из стали ШХ-15. Под нагрузкой строго вертикально к вращающемуся кольцу на его внешнем диаметре прижимался неподвижный образец – стальной шарик из аналогичного материала. Зазор между стенками испытательной камеры и вращающимся подшипниковым кольцом составлял $1,5 \pm 0,05 \text{ мм}$, что способствовало интенсивному набросу смазочного масла на поверхность кольца и сохранению устойчивого «масляного клина» на протяжении всего испытания. Параметры трибологического испытания приведены в табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Параметры трибологического испытания смазочных композиций и базового масла
Parameters of tribological testing of lubricating compositions and base oil

Параметры	Значение
Частота вращения подвижного образца n , об/мин	240 ± 10
Нагрузка на неподвижный образец F , Н	$147,15 \pm 5,9$
Диаметр подвижного образца D , мм	52
Диаметр неподвижного шарообразного образца d , мм	$8_{-0,062}$
Ширина подвижного образца B , мм	$15^{+0,05}$

Во время испытания истираемые шарообразный и цилиндрический образцы сближались, т. е. под действием износа опускался неподвижный образец. При этом, как подтвердили предварительные ходовые испытания в работе [11], подвижный образец – в силу лучшего режима смазывания и устойчивого теплового режима – практически не изнашивается, что дает основания к расчету диаметра пятна износа шарообразного образца как функции от величины его вертикального перемещения $d = f(h)$. Диаметр пятна износа $d = f(h)$ неподвижного образца под нагрузкой F является для каждой из испытываемых смазочных сред результатом трибологического испытания. По каждому из таких результатов строился последовательный рейтинг смазочных материалов по уменьшению диаметра пятна износа $d = f(h)$. Альтернативными базовому смазочному маслу смазочными материалами являлись композиции «масло + присадка» в вариантах механического ручного перемешивания и роторно-пульсационного перемешивания на установке РПУ-0,8-55А с частотой вращения $2\,900 \pm 50 \text{ об/мин}$. Испытания различных объем-

ных концентраций присадки [8] с СМТ в виде диселенида молибдена создавали условия для реализации испытательной сетки параметров $C_i X_i$, где C_i – переменное значение объемной концентрации присадки с СМТ в базовом смазочном масле, а X_i – варианты данного переменного значения концентрации C_i . Построение трибологического рейтинга завершалось при достижении примерно равного диаметра пятна износа для каждого из вариантов перемешивания X_i , тем самым выявлялась трибологически эффективная объемная концентрация C_i , приводящая примерно к одному и тому же минимальному по величине значению $d = f(h)$. Степень сравнения между отдельными значениями C_i на каждом из вариантов перемешивания будет отражать необходимость дальнейшего увеличения концентрации для улучшения трибологической эффективности смазочных композиций. При стремлении степени сравнения к единице между двумя ближайшими шагами концентрации C_i дальнейшее увеличение объемной концентрации по шагу варианта перемешивания X_i является нецелесообразным.

Технология изготовления объектов трибологических испытаний

Объектами трибологических испытаний выступали циркуляционное масло М-16Г2ЦС и присадка [8] с содержанием СМТ – диселенида молибдена. Для испытаний были подготовлены следующие смазочные материалы:

- чистое циркуляционное масло М-16Г2ЦС по ГОСТ 12337-84 (база исследования условно обозначена B_0);
- смесь масла М-16Г2ЦС с серией объемных концентраций присадок $C_i = 0,5–1,5$ %, полученная путем ручного перемешивания получаемых растворов X_1 ;
- смесь масла М-16Г2ЦС с серией объемных концентраций присадок $C_i = 0,5–1,5$ %, полученная путем ротационно-пульсационного перемешивания получаемых растворов X_2 .

Ручное механическое перемешивание получаемых смазочных композиций производилось деревянным стержнем в течение 30 мин, ротационно-пульсационное перемешивание на установке РПУ-0,8-55А – в течение аналогичного периода времени. Характеристика и техническое описание ротационно-пульсационной установки приведены в работах [9, 10].

При перемешивании на установке РПУ-0,8-55А смазочные композиции варианта перемешивания X_2 предварительно механически перемешивали в течение 30 мин деревянным стержнем. Объем каждой концентрации смазочных композиций для вариантов X_1 и X_2 был идентичен и составлял $1\ 000\ \text{см}^3$. Для варианта X_2 такой объем удовлетворял минимальному значению загрузки в начальный бункер установки РПУ. Для уменьшения возможных потерь при перемешивании раствора (особенно для частиц диселенида молибдена) установка РПУ эксплуатировалась с перекрытым циркуляционным контуром и смешивание происходило непосредственно в ротационной камере.

Для первичного приготовления растворов по схемам перемешивания X_1 и X_2 использовали следующую технологию. В емкость объемом 2 л заливали ненасыщенную жирную олеиновую кислоту массой 600 г, а также предварительно расплавленную стеариновую кислоту массой 300 г. Расхождения в массах для каждой из кислот – 0,5 г, что контролировали лабораторными весами с точностью измерения до 0,01 г в режиме их тарирования. Раствор двух кислот перемешивали в течение 10 мин до получения однородной гомогенной жидкости светлого желтого цвета. К указанному раствору кислот добавляли диселенид молибдена в исходном твердом состоянии массой $100 \pm 0,5$ г, который незамедлительно начинали перемешивать механически деревянным стержнем в течение 30 мин. При получении однородного раствора диселенид молибдена был полностью перемешанным в объеме жирных кислот.

Полученные растворы противоизносной присадки получали статус шагов трибологического испытания X_1 и X_2 с той разницей, что раствор X_2 перемешивался в дальнейшем на установке РПУ-0,8-55А в течение 30 мин.

Получаемые растворы противоизносной присадки X_1 и X_2 после механического и ротационно-пульсационного перемешиваний механически смешивались с циркуляционным маслом B_0 в серии объемных концентраций C_i . Для каждого из вариантов X_i шаг значения объемной концентрации составлял 0,05 % (табл. 4).

Все концентрации C_i для последующего трибологического испытания на машине трения по [11] тарировались по $10\ \text{см}^3$ в пробоотборные пробирки гравитационным путем.

Таблица 4
Table 4

Концентрации присадок при различном перемешивании смазочных композиций, об. %
Concentration of additives with different mixing of lubricating compositions, %

C_i	Вид перемешивания X_i	
	Механический X_1	Ротационно-пульсационный X_2
1	0,50	0,50
2	1,00	1,00
3	1,05	1,05
4	1,10	1,10
5	1,15	1,15
6	1,20	1,20
7	1,25	1,25
8	1,30	1,30
9	1,35	1,35
10	1,40	1,40
11	1,45	1,45
12	1,50	1,50

Таким образом, в трибологическом испытании участвовали $N_2 = 25$ образцов смазочных сред, из них одна – в виде базового смазочного масла (свойства по табл. 1), 12 смазочных сред X_1 с присадкой [8], подготовленной до смешивания с базовым маслом в концентрациях $C_i = 0,5–1,5$ % механическим перемешиванием и 12 аналогичных смазочных сред X_2 , подготовленных ротационно-пульсационным перемешиванием на установке РПУ-0,5-55А.

Технология проведения трибологических испытаний

Трибологические испытания смазочных материалов проводились по схеме «шар – цилиндр» на оригинальной машине трения, конструктивно охарактеризованной в работе [11]. Каждый вид смазочной среды, т. е. B_0 , $C_i X_1$ и $C_i X_2$, заливали в объеме 5 см^3 в закрытую испытательную камеру машины трения, где при включении приводного электродвигателя начинал вращаться вал с подвижным цилиндрическим образцом. При этом на подвижный образец накладывалась нагрузка от неподвижного сферического образца, создаваемая набором грузов на выносной штанге. Частота вращения подвижного образца n , нагрузка F , а также диаметральные размеры образцов D/d выдерживались согласно данным табл. 3 на протяжении всей наработки испытаний. Линейный износ h неподвижного сферического образца на протяжении всей наработки регистрировался механическим датчиком индикаторного типа, соединенным выдвижной головкой с державкой образца. Точность измерения параметра h составляла 1 мкм. Объем наработки испытаний по каждой из рассматриваемых смазочных сред приведен в табл. 5.

Таблица 5
Table 5

Объем наработок по трибологическим испытаниям
Scope of operating time of tribological tests

Этап наработки S_i	Объем наработки S (путь трения), м
1	500
2	1 000
3	2 000
4	3 500
5	5 000
6	7 500
7	9 000
8	10 000
9	11 000
10	12 000

Наработка для каждой испытываемой смазочной среды составляла $S = 12\,000$ м, каждый этап наработки $S_1–S_{10}$ последовательно входил в этот путь трения, т. е. на протяжении общей наработки электродвигатель испытательной установки не отключался. Благодаря возможности отсчета линейного износа h по индикатору часового типа износ на неподвижном образце, а сле-

довательно, и диаметр пятна износа d последовательно накапливались, что позволяло значительно сократить время трибологического испытания, по сравнению со стандартизированными условиями его проведения [12]. Таким образом, для каждой из испытываемых смазочных сред в объеме $N_{\Sigma} = 25$ требовалась наработка $S = 12\,000$ м вместо наработки $S = 61\,500$ м, в случае если бы каждый шаг наработки выполнялся, как это указано в [12], для отдельного образца. С учетом первоначальной программы трибологического испытания для выполнения всех наработок по [12] для каждого из вариантов смазочной среды $N_{\Sigma} = 25$ (B_0 , C_iX_1 и C_iX_2) необходимо было бы затратить $S_{\Sigma} = 1537,5$ тыс. м и $i = 250$ пар испытательных образцов, а также $V_{\Sigma} = 2\,500$ см³ смазочных материалов. В описываемых испытаниях соответствующие показатели для всех планируемых сочетаний смазочных сред составляли: $S_{\Sigma} = 300$ тыс. м; $i = 25$; $V_{\Sigma} = 250$ см³, что значительно сократило временные затраты на проведение трибологических испытаний, снизило их материалоемкость и объем временных и технологических действий для подготовки смазочных материалов.

Трибологические испытания смазочных сред, содержащих противоизносную присадку [8], выполнялись на шагах X_1 и X_2 последовательно по мере возрастания объемной концентрации присадки C_i .

По окончании трибологического испытания каждой из смазочных сред проводилось сравнение итогового диаметра пятна износа d неподвижного образца по шагам испытания X_1 и X_2 между отдельными концентрациями присадки [8] в смазочном масле. При получении значения d , примерно равного между двумя шагами концентраций C_i и отличающегося на $d_{\Delta} = 0,01-0,03$ мм, испытания других концентраций присадки не выполнялись. Это означало, что трибологическая эффективность последних испытанных концентраций присадок для шагов X_1 и X_2 примерно одинакова и дальнейшее увеличение объемной концентрации противоизносной присадки нецелесообразно. При этом проводилось сравнение диаметров пятна износа по соответствующему шагу исследования: X_1 или X_2 . Если степень сравнения d_{\max}/d_{\min} между ближайшими по шагу исследования концентрациями стремится к значению 1,05 и ниже, это может свидетельствовать о потере возможной трибологической эффективности при дальнейшем увеличении объемной концентрации присадки. Следовательно, при уравнивании значений диаметров пятна износа дальнейшее увеличение концентрации может привести к удорожанию смазочной композиции как в случае механического перемешивания по шагу X_1 , так и по шагу ротационно-пульсационного перемешивания X_2 . Меньшая из концентраций C_i , на одном из шагов (X_1 или X_2) дающая одинаковое значение диаметра пятна износа d неподвижного образца, характеризует выгодный способ приготовления раствора присадки перед его введением в базовое смазочное масло.

Получение и обработка результатов трибологических испытаний

Результаты трибологических исследований были получены по следующим параметрам:

- величина линейного износа неподвижного образца h , мм;
- величина диаметра пятна износа у вершины неподвижного образца d , мм;
- интенсивность изнашивания неподвижного образца I за наработку пути трения S , м.

С учетом того, что пятно износа у вершины неподвижного образца на предельно малом участке соприкосновения с подвижным образцом представляет собой лунку некоторой глубины, диаметр отпечатка износа неподвижного образца, мм, будет равен:

$$d_i = ((d_0 - (d_0 - 2h_i)^2)^{0,5}),$$

где $d_0 = 7,938$ – диаметр окружности неизношенного неподвижного образца, мм; h_i – фактический линейный износ в вершине образца, мм.

Интенсивность изнашивания неподвижного образца за i -ю наработку из табл. 5 рассчитывается как безразмерный параметр:

$$I = h_i / S_i,$$

где h_i – фактический линейный износ в вершине образца, мм; S_i – путь трения в соответствующей наработке трибологического испытания, м.

Для данного трибологического испытания наибольший интерес представляют следующие соотношения:

- диаметр износа вершины образца по наработке пути трения $d = f(S)$;
- интенсивность изнашивания неподвижного образца по наработкам трибологического испытания $I = f(S)$.

Как самостоятельная величина, характеризующая трибологическую эффективность противоизносной присадки [8] в вариантах технологического перемешивания X_1 и X_2 по отношению к базовому маслу B_0 , между вариантами X_1 и X_2 , а также между величинами объемной концентрации C_i противоизносной присадки в базовом масле внутри вариантов X_1 и X_2 , выступает соотношение диаметров пятна износа в вершине неподвижного образца между характерными точками трибологического исследования.

В результате проведенного трибологического исследования становятся известными наименее эффективная по противоизносным свойствам смазочная среда (наибольший диаметр пятна износа образца) и наиболее эффективная смазочная среда для смазочных композиций вариантов X_1 и X_2 (наименьшие диаметры пятна износа образцов). Убывающая величина диаметров пятна износа неподвижных образцов для различных вариантов рассматриваемых смазочных материалов представляет собой рейтинг по возрастающей трибологической эффективности.

По итогам проведенных трибологических испытаний по шагам B_0 (базовое масло М-16Г2ЦС), X_1 и X_2 (варианты предварительного перемешивания присадки, содержащей СМТ [8] до введения в базовое масло), а также между значениями объемных концентраций C_i противоизносной присадки в шагах X_1 и X_2 были получены нижеследующие основные результаты.

В табл. 6 приведены численные результаты по диаметрам d_i износа неподвижного образца (трибологический рейтинг смазочных композиций) в соответствующих сериях трибологического испытания. Шаг испытания X_1 , характеризуемый механическим перемешиванием противоизносной присадки [8] перед внесением ее в базовое смазочное масло B_0 , указан в табл. 6 индексом М, шаг ротационно-пульсационного перемешивания X_2 обозначен индексом РП. Рядом с индексами вариантов перемешивания приведены объемные концентрации присадки в смазочном масле.

Таблица 6
Table 6

**Трибологический рейтинг испытываемых смазочных композиций,
построенный по возрастающей их эффективности**
Tribological rating of the tested lubricating compositions ranged in the increasing efficiency

№	Наименование смазочной композиции	Диаметр пятна износа d_i , мм	Сравнение с базой B_0
Входят в трибологический рейтинг			
	B_0	3,2	
1	$B_0 + 0,5 \% М$	2,82	1,13
2	$B_0 + 1,0 \% М$	2,45	1,31
3	$B_0 + 1,05 \% М$	2,35	1,36
4	$B_0 + 1,1 \% М$	2,29	1,40
5	$B_0 + 0,5 \% РП$	2,25	1,42
6	$B_0 + 1,15 \% М$	2,18	1,47
7	$B_0 + 1,2 \% М$	1,96	1,63
8	$B_0 + 1,0 \% РП$	1,9	1,68
9	$B_0 + 1,05 \% РП$	1,82	1,76
10	$B_0 + 1,25 \% М$	1,75	1,83
11	$B_0 + 1,1 \% РП$	1,7	1,88
12	$B_0 + 1,3 \% М$	1,58	2,03
13	$B_0 + 1,15 \% РП$	1,55	2,06
14	$B_0 + 1,2 \% РП$	1,41	2,27
15	$B_0 + 1,35 \% М$	1,38	2,32
16	$B_0 + 1,25 \% РП$	1,29	2,48
17	$B_0 + 1,4 \% М$	1,29	2,48
18	$B_0 + 1,45 \% М$	1,26	2,54
19	$B_0 + 1,3 \% РП$	1,25	2,56
Вне рейтинга			
20	$B_0 + 1,5 \% М$	1,25	2,56
21	$B_0 + 1,35 \% РП$	1,25	2,56
22	$B_0 + 1,4 \% РП$	1,25	2,56
23	$B_0 + 1,45 \% РП$	1,25	2,56
24	$B_0 + 1,5 \% РП$	1,25	2,56
25	$B_0 + 1,5 \% РП$	1,25	2,56

На рис. 1 приведена графическая зависимость $d = f(S)$ диаметра пятна износа неподвижного образца от пройденного пути трения, на рис. 2 – зависимость интенсивности изнашивания от пройденного пути трения $I = f(S)$. Данные графики относятся к смазочной композиции с наиболь-

шим диаметром пятна износа (базовому маслу) и наименьшими диаметрами пятна износа среди шагов X_1 и X_2 в случае получения смазочных композиций с противоизносной присадкой [8].

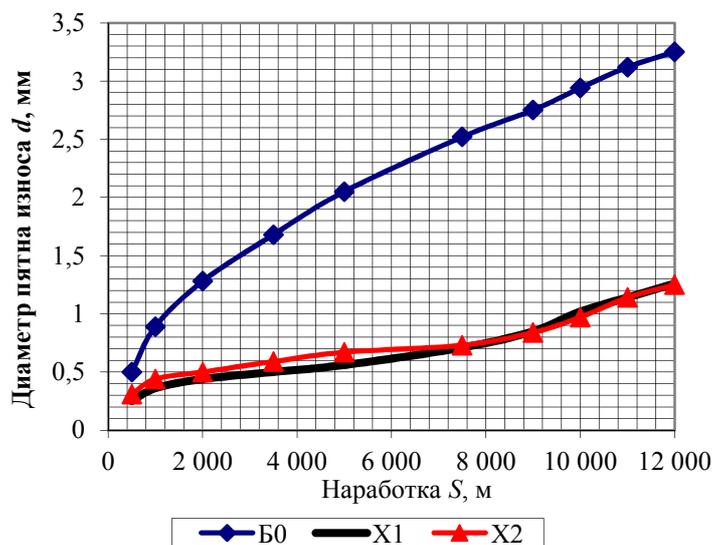


Рис. 1. Зависимость диаметра пятна износа неподвижного образца от пройденного пути трения для смазочных сред с наибольшей и наименьшей трибологической эффективностью

Fig. 1. Dependence of the wear spot diameter of a stationary sample on the traversed friction path for lubricants with the highest and lowest tribological efficiency

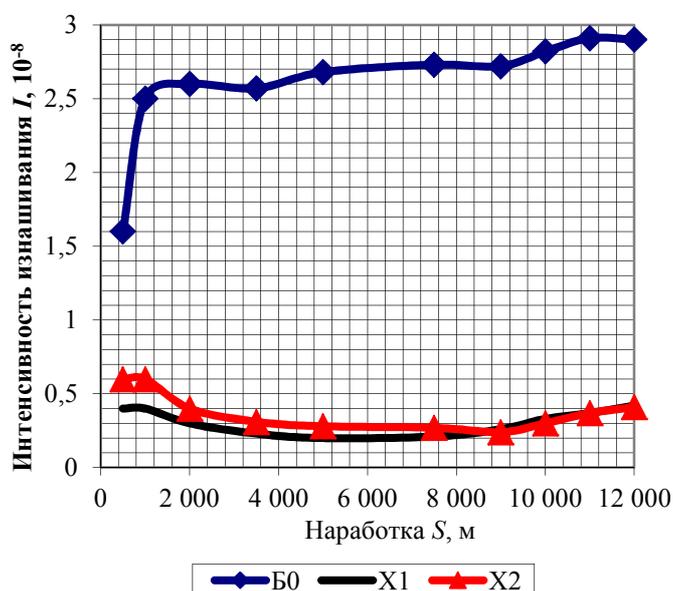


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания неподвижного образца от пройденного пути трения для смазочных сред с наибольшей и наименьшей трибологической эффективностью

Fig. 2. Dependence of the wear rate of a stationary sample on the traversed friction path for lubricants with the highest and lowest tribological efficiency

Рисунки 3 и 4 характеризуют градицию к снижению диаметра пятна износа в вершине неподвижного образца d_i по увеличению объемной концентрации присадки в случаях механического и ротационно-пульсационного предварительного перемешивания растворов присадки [8]. Для удобства сравнения на рис. 3 и 4 также приведено значение d_i для базового смазочного масла М-16Г2ЦС.

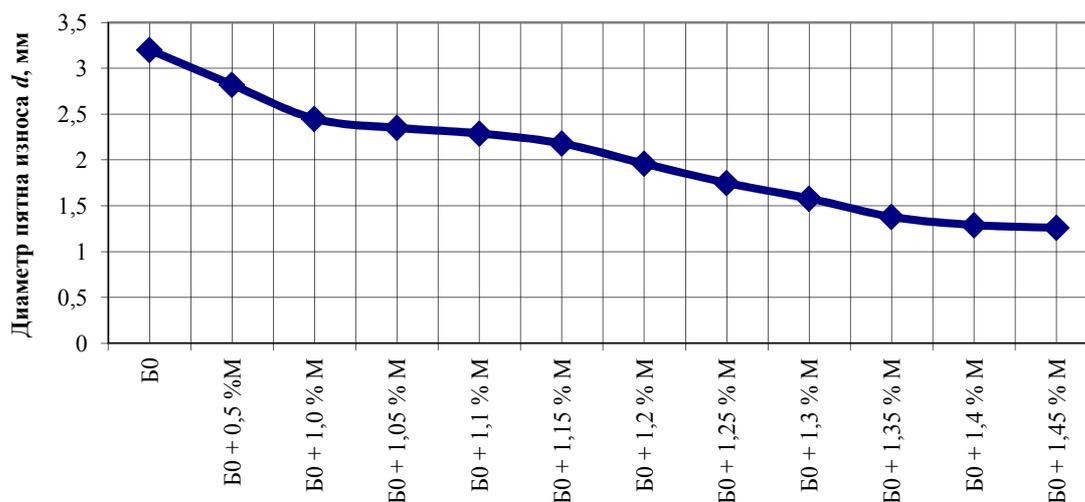


Рис. 3. Динамика снижения диаметра пятна износа для неподвижных образцов, смазываемых смазочной композицией «масло B_0 + механически перемешанная присадка СМТ» в различных объемных концентрациях противоизносной присадки

Fig. 3. Dynamics of reducing the wear spot diameter for stationary samples lubricated with the composition “oil B_0 + mechanically mixed additive CMT” in different volume concentrations of antiwear additive

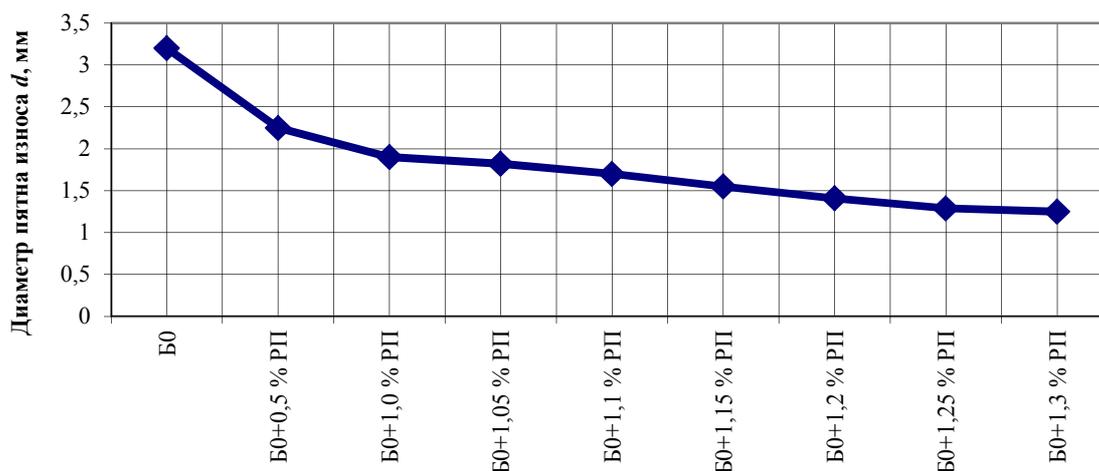


Рис. 4. Динамика снижения диаметра износа для неподвижных образцов, смазываемых смазочной композицией «масло B_0 + ротационно-пульсационно перемешанная присадка СМТ» в различных объемных концентрациях противоизносной присадки

Fig. 4. Dynamics of reducing the wear diameter for stationary samples lubricated with a composition “oil B_0 + rotary-pulsation-mixed additive CMT” in different volume concentrations of antiwear ad

В табл. 6 раздел «Вне рейтинга» (№ 21–25) характеризует смазочные композиции, для которых значение диаметра пятна износа неподвижного образца не уменьшалось относительно последнего наименьшего значения d_i в вариативном трибологическом рейтинге с № 1–20. Таким образом, наилучшую трибологическую эффективность по снижению износа истираемого образца иллюстрируют смазочные композиции, содержащие концентрацию присадки 1,45 об. % (механическое перемешивание присадки) и 1,3 об. % (ротационно-пульсационное перемешивание присадки). Трибологический рейтинг, приведенный в табл. 6, доказывает нецелесообразность дальнейшего увеличения в смазочном масле объемной концентрации присадки, содержащей СМТ в виде диселенида молибдена.

Выводы

1. Противоизносная присадка, содержащая слоистый модификатор трения на основе механически перемешанных диселенида молибдена, жирных ненасыщенных кислот – олеиновой и стеариновой, достаточно эффективна для снижения износа поверхности трения в сравнении с чистым смазочным маслом М-16Г2ЦС.

2. Трибологическая эффективность рассматриваемой противоизносной присадки значительно варьируется в зависимости от вида перемешивания раствора присадки до внесения в базовое смазочное масло и составляет 13–54 % (различие в диаметре пятна износа образца) для механического перемешивания, а для ротационно-пульсационного перемешивания – 45–56 % (см. табл. 6, рис. 3 и 4).

3. Эффективными объемными концентрациями присадки в смазочном масле, снижающими диаметр износа неподвижного сферического образца, являются $C_i = 0,5–1,5$ % как для механического, так и для ротационно-пульсационного перемешивания, однако для механического вида перемешивания необходимо расширять диапазон объемных концентраций, вплоть до $C_i = 0,5–1,45$ %, для ротационно-пульсационного вида перемешивания этот диапазон значений концентраций $C_i = 0,5–1,3$ % (см. рис. 3 и 4).

4. При существенном различии в диапазоне объемных концентраций присадки, содержащей СМТ в масле, следует отметить, что уменьшения диаметра пятна износа не происходит: для механического вида перемешивания – после значения $C_i = 1,45$ %, для ротационно-пульсационного вида перемешивания – после $C_i = 1,3$ % (см. табл. 6).

5. Для ротационно-пульсационного перемешивания раствора присадки следует отметить более плавную, постоянную динамику снижения диаметра пятна износа, чем для механического перемешивания, для последнего имеются промежуточные колебания значений d_i между значениями концентраций $C_i = 1,0–1,35$ %, т. е. практически во всем диапазоне значений C_i (см. рис. 3 и 4).

6. Зависимость интенсивности изнашивания от пути трения $S = 500–12\ 000$ м неподвижного образца при испытаниях смазочного масла М-16Г2ЦС значительно отличается по своей форме от аналогичного параметра для смазочных масел, снабженных присадкой с СМТ, как для механического, так и для ротационно-пульсационного перемешивания раствора присадки (см. рис. 2).

7. При существенном отличии формы зависимости $I = f(S)$ зависимость диаметра пятна износа $d = f(S)$ также существенно различается для базового смазочного масла и смазочных композиций с присадкой при различных вариантах предварительного перемешивания (рис. 1).

8. Различие в формах графиков и относительной динамики накопления их значений для зависимостей $I = f(S)$ и $d = f(S)$ для базового смазочного масла и его композиций с добавкой присадок, содержащих СМТ, следует объяснить эффективным защитным слоем покрытия металлических поверхностей для твердосмазочного диселенида молибдена, удовлетворительно растворяющегося в объеме противоизносной присадки.

9. Большие различия между значениями диаметров пятна износа при аналогичных объемных концентрациях присадки для механического и ротационно-пульсационного вариантов перемешивания возможно объяснить принципиально разной динамикой седиментационных процессов диселенида молибдена в готовом растворе противоизносной присадки.

10. При организации технологических процессов приготовления растворов присадки, содержащей СМТ, следует придерживаться ротационно-пульсационной технологии перемешивания раствора, приготовление смазочных композиций на основе добавок данной присадки с объемной концентрацией $C > 1,3$ % нецелесообразно ввиду некоторого удорожания получаемой смазочной среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Марченко Е. А., Лобова Т. А. Использование дихалькогенидов тугоплавких металлов для обеспечения стабильности работы узлов трения // Вестн. науч.-техн. развития. 2009. № 5 (21). С. 16–21.
2. Воронков Б. Д. Подшипники сухого трения. Л.: Машиностроение, 1968. 140 с.
3. Марченко Е. А. О механизме изнашивания диселенида молибдена // Трение и износ. 2000. № 4. Т. 21. С. 438–443.
4. Марченко Е. А., Лобова Т. А. Взаимодействие поверхностей трения со смазочными материалами типа 2Н-МоS2 // Трение и износ. 2008. № 4. Т. 29. С. 391–398.

5. Долгополов К. Н., Любимов Д. Н., Пономаренко А. Г., Чигаренко Г. Г., Бойко М. В. Структура смазочных слоев, формирующихся в присутствии присадок минеральных модификаторов трения // Трение и износ. 2009. № 5. Т. 30. С. 516–521.
6. Буяновский И. А., Лобова Т. А., Марченко Е. А., Чулков И. П. Применение мелкодисперсного диселенида вольфрама для улучшения трибологических характеристик масел и пластичных смазок // Механизация строительства. 2014. № 5. С. 11–14.
7. Пат. РФ № 2095399. Смазочный состав и способ его получения / Лобова Т. А., Леонтьев Н. И., Литвинов А. П., Чулина Г. Ф.; опубл. 10.11.1997.
8. Пат. RU2525404C2 Рос. Федерация, МПК C10M 169/04, C10M 125/22. Противоизносная присадка / Перекрестов А. П., Дроздов Ю. Н., Чанчиков В. А., Гужвенко И. Н., Свекольников С. А. № 2570643; заявл. 22.07.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34.
9. Перекрестов А. П., Саламех А., Чанчиков В. А., Гужвенко И. Н., Абубакаров А. Я. Исследование эксплуатационных свойств противоизносных присадок для моторных смазочных масел в зависимости от процессов их обработки и седиментации // Науч. проблемы вод. трансп. 2020. № 64. С. 102–112.
10. Гужвенко И. Н., Чанчиков В. А., Перекрестов А. П., Свекольников С. А., Бурмистрова О. В. Исследование влияния дисперсности слоистых модификаторов трения на противоизносные свойства смазочных материалов // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. 2016. № 1 (2). Т. 18. С. 187–192.
11. Перекрестов А. П., Чанчиков В. А., Гужвенко И. Н., Свекольников С. А., Арстаналиев Е. У., Абишев М. Н., Медетов Ш. М. Разработка машины трения для ускоренных противоизносных сравнительных испытаний смазочных материалов // Вестн. Атыраус. ин-та нефти и газа. 2016. № 1 (37). С. 96–99.
12. ГОСТ Р 51860-2002. Обеспечение износостойкости изделий – оценка противоизносных свойств смазочных материалов методом «шар – цилиндр». М.: Госстандарт России, 2002. 9 с.

REFERENCES

1. Marchenko E. A., Lobova T. A. Ispol'zovanie dikhal'kogenidov tugoplavkikh metallov dlia obespecheniia stabil'nosti raboty uzlov treniia [Using refractory metal dichalcogenides to ensure stability of friction units]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiia*, 2009, no. 5 (21), pp. 16-21.
2. Voronkov B. D. *Podshipniki sukhogo treniia* [Dry friction bearings]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1968. 140 p.
3. Marchenko E. A. O mekhanizme iznashivaniia diselenida molibdena [On molybdenum diselenide wearing mechanism]. *Trenie i iznos*, 2000, no. 4, vol. 21, pp. 438-443.
4. Marchenko E. A., Lobova T. A. Vzaimodeistvie poverkhnostei treniia so smazochnymi materialami tipa 2N-MoS2 [Interaction of friction surfaces with lubricants 2H-MoS2 type]. *Trenie i iznos*, 2008, no. 4, vol. 29, pp. 391-398.
5. Dolgoplov K. N., Liubimov D. N., Ponomarenko A. G., Chigarenko G. G., Boiko M. V. Struktura smazochnykh sloev, formiruuiushchikhsia v prisutstvii prisadok mineral'nykh modifikatorov treniia [Structure of lubricating layers formed in presence of additives of mineral friction modifiers]. *Trenie i iznos*, 2009, no. 5, vol. 30, pp. 516-521.
6. Buianovskii I. A., Lobova T. A., Marchenko E. A., Chulkov I. P. Primenenie melkodispersnogo diselenida vol'frama dlia uluchsheniia tribologicheskikh kharakteristik masel i plastichnykh smazok [Application of finely dispersed tungsten diselenide to improve tribological characteristics of oils and greases]. *Mekhanizatsiia stroitel'stva*, 2014, no. 5, pp. 11-14.
7. Lobova T. A., Leont'ev N. I., Litvinov A. P., Chulina G. F. *Smazochnyi sostav i sposob ego polucheniia* [Lubricating composition and method of its production]. Patent RF, no. 2095399, 10.11.1997.
8. Perekrestov A. P., Drozdov Iu. N., Chanchikov V. A., Guzhvenko I. N., Svekol'nikov S. A. *Pro-tivoiznosnaia prisadka* [Antiwear additive]. Patent RF № 2570643, 10.12.2015.
9. Perekrestov A. P., Salamekh A., Chanchikov V. A., Guzhvenko I. N., Abubakarov A. Ia. Issledovanie ekspluatatsionnykh svoistv protivoznosnykh prisadok dlia motornykh smazochnykh masel v zavisimosti ot protsessov ikh obrabotki i sedimentatsii [Studying performance properties of antiwear additives for motor lubricating oils depending on their processing and sedimentation]. *Nauchnye problemy vodnogo transporta*, 2020, no. 64, pp. 102-112.
10. Guzhvenko I. N., Chanchikov V. A., Perekrestov A. P., Svekol'nikov S. A., Burmistrova O. V. Issledovanie vliianiia dispersnosti sloistykh modifikatorov treniia na protivoznosnye svoistva smazochnykh materialov [Studying effect of dispersity of layered friction modifiers on antiwear properties of lubricants]. *Izvestiia Samar-skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2016, no. 1 (2), vol. 18, pp. 187-192.
11. Perekrestov A. P., Chanchikov V. A., Guzhvenko I. N., Svekol'nikov S. A., Arstanaliev E. U., Abishev M. N., Medetov Sh. M. Razrabotka mashiny treniia dlia uskorennykh protivoznosnykh sravnitel'nykh ispytaniim smazochnykh materialov [Developing friction machine for accelerated anti-wear comparative testing of lubricants]. *Vestnik Atyrauskogo instituta nefii i gaza*, 2016, no. 1 (37), pp. 96-99.

12. *GOST R 51860-2002. Obespechenie iznosostoikosti izdelii – otsenka protivnoiznosnykh svoystv smazochnykh materialov metodom «shar – tsilindr»* [GOST R 51860-2002. Ensuring wear resistance of products - assessment of antiwear properties of lubricants by the “ball – cylinder” method]. Moscow, Gosstandart Rossii Publ., 2002. 9 p.

Статья поступила в редакцию 04.10.2021; одобрена после рецензирования 28.10.2021; принята к публикации 08.11.2021.
The article was submitted 04.10.2021; approved after reviewing 28.10.2021; accepted for publication 08.11.2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Василий Александрович Чанчиков – кандидат технических наук; доцент кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; bazelius87@mail.ru

Иван Николаевич Гужвенко – ассистент кафедры техники и технологии наземного транспорта; Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; ivan.3124@yandex.ru

Александр Иванович Андреев – аспирант кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; aresut79@mail.ru

Марина Александровна Шулимова – кандидат экономических наук, доцент; доцент кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; mshulimova@mail.ru

Сергей Александрович Свекольников – ведущий инженер отдела эксплуатации; ЛУКОЙЛ-Астраханьэнерго; 414041, Астрахань, ул. Августовская, 11Б; sergey080206@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasily A. Chanchikov – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Shipbuilding and Marine Engineering Complexes; Astrakhan State Technical University; 414056, Astrakhan, Tatishcheva St., 16; bazelius87@mail.ru

Ivan N. Guzhvenko – Assistant of the Department of Techniques and Technologies of Land Transport; Astrakhan State Technical University; 414056, Astrakhan, Tatishcheva St., 16; ivan.3124@yandex.ru

Alexander I. Andreev – Postgraduate Student of the Department of Heat Engineering and Refrigerating Equipment; Astrakhan State Technical University; 414056, Astrakhan, Tatishcheva St., 16; aresut79@mail.ru

Marina A. Shulimova – Candidate of Economics, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Shipbuilding and Marine Engineering Complexes; Astrakhan State Technical University; 414056, Astrakhan, Tatishcheva St., 16; mshulimova@mail.ru

Sergey A. Svekolnykov – Leading Engineer of the Operation Department; LUKOIL-Astrakhanenergo; 414041, Astrakhan, Avgustovskaia St., 11B; sergey080206@yandex.ru

