

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

SHIP ELECTRIC POWER INSTALLATIONS AND MACHINE-PROPULSIVE COMPLEXES

Научная статья

УДК 621.891

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-22-34>

Экспериментальное исследование трибологических характеристик смазочных масел со слоистыми модификаторами трения и возможности их применения в судовой технике

В. А. Чанчиков¹✉, И. Н. Гужвенко², Н. В. Прямухина³, М. С. Прямухина⁴, О. П. Ковалев⁵

¹⁻⁴ Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, bazelius87@mail.ru ✉

⁵ Дмитровский рыбохозяйственный технологический институт, филиал Астраханского государственного
технического университета, пос. Рыбное, Московская область, Россия

Аннотация. Проведены исследования смазочной способности нескольких смазочных композиций, две из которых содержат противоизносную присадку на основе слоистого модификатора трения – диселенида молибдена. В качестве базовой смазочной среды и объекта сравнения выступает масло МС-20, которое не содержит функциональных противоизносных присадок. Два варианта сочетания противоизносной присадки с данным маслом отличаются проведением процесса первоначальной подготовки присадки до внесения ее в базовое смазочное масло путем ротационно-пульсационного измельчения и перемешивания. Противоизносные испытания построены в виде последовательного трибологического рейтинга данных типов смазочных сред при различных наработках пути трения исследуемых образцов. Средством испытания выступает машина трения ротационного типа оригинальной конструкции. Проанализированы отличия методики проведения противоизносных испытаний и преимущества предложенной схемы перед аналогичной, актуальной для ГОСТ Р 51860-2002. В числе результатов проведенного трибологического исследования приводятся топографические картины износа образцов для испытаний, зависимости интенсивности изнашивания трибологических поверхностей от контактных давлений, зависимости диаметра пятна износа от величины износа образцов. Выявлено, что присадка противоизносного действия, имеющая в своем составе слоистый модификатор трения типа селенистого диалкогогенита (диселенид молибдена), способствует улучшению смазочной пленки на поверхностях трения и снижению их износа, по сравнению с применением бесприсадочного масла МС-20. Величина износа неподвижного шарообразного образца при испытаниях смазочной среды с противоизносной присадкой снижается на 66–85 %, по сравнению с базовым смазочным маслом без применения присадок. Диаметр пятна износа на неподвижном образце при данных условиях испытаний снижается на 28–67 %, что доказывает эффективность предварительной подготовки роторно-пульсационным перемешиванием смазочной композиции с твердой взвешенной основой даже при относительно малом времени подготовки.

Ключевые слова: интенсивность изнашивания, износ, дизельный двигатель, цилиндропоршневая группа, машина трения, противоизносная присадка, смазочное масло, смазочная способность, неконформный контакт «шар – цилиндр»

Для цитирования: Чанчиков В. А., Гужвенко И. Н., Прямухина Н. В., Прямухина М. С., Ковалев О. П. Экспериментальное исследование трибологических характеристик смазочных масел со слоистыми модификаторами трения и возможности их применения в судовой технике // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 1. С. 22–34. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-22-34>.

Original article

Experimental studying tribological characteristics of lubricating oils with layered friction modifiers and their application in marine technology

V. A. Chanchikov^{1✉}, I. N. Guzhvenko², N. V. Pryamukhina³, M. S. Pryamukhina⁴, O. P. Kovalev⁵

¹⁻⁴ Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, bazelius87@mail.ru ✉

⁵ Dmitrov Fisheries Technological Institute, branch Astrakhan State Technical University,
Rybnoye, Moscow region, Russia

Abstract. The paper presents the results of studying the lubricity of several lubricating compositions, two of which contain an antiwear additive based on a layered friction modifier - molybdenum diselenide. Oil MC-20, which does not contain functional antiwear additives, is used as a base lubricating medium and an object of comparison. Two variants for combining an antiwear additive with this oil differ in the process of initial preparation of the additive before adding it to the base lubricating oil by rotary pulsation grinding and stirring. Antiwear tests are arranged in the form of a consistent tribological rating of the given types of lubricating media at various operating time of the friction path of the test samples. The test tool is a rotary-type friction machine of an original design. There are analyzed the differences in the antiwear test methodology and the advantages of the proposed scheme over the analogous one, which is relevant for GOST R 51860-2002. Among the results of the tribological study carried out, topographic patterns of wear of test specimens, the dependence of the wear rate of tribological surfaces on contact pressures, and the dependence of the wear scar diameter on the amount of specimen wear are given. The antiwear additive has been found to contain a layered friction modifier of selenium dichalcogenide (molybdenum diselenide) type, it improves the lubricating film on friction surfaces and reduces their wear compared to the use of nonadditive oil MS-20. The wear degree of a stationary ball-shaped specimen when testing a lubricating medium with the antiwear additive is reduced by 66-85% compared to a base lubricating oil without additives. The diameter of the wear spot on a stationary specimen under these test conditions is reduced by 28-67%, which proves the effectiveness of preliminary preparation by rotary-pulsation mixing of a lubricant composition with a solid suspended base even with a relatively short preparation time.

Keywords: wear rate, wear, diesel engine, cylinder-piston group, friction machine, antiwear additive, lubricating oil, lubricity, non-conformal “ball-cylinder” contact

For citation: Chanchikov V. A., Guzhvenko I. N., Pryamukhina N. V., Pryamukhina M. S., Kovalev O. P. Experimental studying tribological characteristics of lubricating oils with layered friction modifiers and their application in marine technology. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2022;1:22-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-22-34>.

Введение

Комплексные присадки для судовых моторных масел, используемых в дизельных тронковых двигателях судов морского и речного флота, являются важным компонентом, влияющим на изнашивание и ресурс прецизионных пар трения. Среди подобных трибологических пар выделяются по значению детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) – поршневые компрессионные и маслосъемные кольца, а также тронковые поверхности поршней, взаимодействующие с зеркальными поверхностями рабочих цилиндровых втулок. Эти взаимодействующие между собой поверхности («втулка – поршень» и «втулка – поршневое кольцо») сформированы рабочими профилями деталей ЦПГ, которые имеют малую шероховатость и в результате воздействия высоких температур и давлений легко выходят за пределы допустимого износа задолго до перехода данных поверхностей трения в предельное состояние. Нарушение микрогеометрии рабочих профилей поверхностей деталей ЦПГ, совершающих возвратно-поступательное высоко-

частотное движение, влечет за собой ухудшение экологических параметров двигателя и рост эксплуатационных издержек – увеличение расхода топлива, расхода масла на угар и т. д. [1].

Наиболее значимые механизмы изнашивания деталей ЦПГ тронковых судовых дизелей выражаются в коррозионном износе образующих поверхностей трения, их адгезионном износе с частичным переносом отслоившегося изношенного материала с одной трибологической поверхности на сопряженную с ней, а также в абразивном износе при попадании инородных включений в смазочное масло. Данные механизмы могут действовать как по отдельности, так и совместно в результате трибологической деструкции смазочного масла.

По характеру воздействия на смазочное масло присадки подразделяются на ряд функциональных видов либо на комплексные пакеты. Среди наиболее часто встречающихся функциональных видов присадок выделяются антиокислительные, противоизносные и вязкостные. «Аварийным» механизмом воздействия на уже изношенные поверхности

трения ЦПГ судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) обладают вязкостные и противоизносные присадки. Данные виды присадок способны модифицировать рельеф изношенных поверхностей трения или уменьшить зазоры в изношенных сопряженных деталях при их сложной кинематике взаимодействия.

Работоспособность и эффективность воздействия противоизносных присадок на изношенные поверхности при создании замещающего рельефа (в особенности слоистых модификаторов трения) зависит от постоянства их компонентного состава. Слоистые модификаторы трения, применяющиеся в тяжело нагруженных узлах, являются, как правило, твердыми веществами [2–8], которые в исходном агрегатном состоянии мало пригодны для эффективного использования в узлах трения ЦПГ. Для насыщения поверхностей трения ЦПГ такой твердой основой, как дисульфид молибдена MoS_2 , графит С, диселениды и дисилициды тугоплавких металлов, минеральные серпентиниты, требуется частичная разборка ДВС, что в зависимости от его размеров и конструктивно-технологической сложности исполнения влечет за собой значительные издержки. Кроме того, на ранней стадии исследования, в 60–70-х гг. прошлого столетия [2], многие из слоистых модификаторов трения, включая фторопласты, получили неоднозначную оценку по стойкости защитного слоя твердой присадки на насыщаемой поверхности трения в узлах реверсивного движения скольжения, а ряд сульфидов (MoS_2) и силицидов ($MoSi_2$) оказались непригодны в температурном диапазоне работы подвижных и статичных деталей тронковых ЦПГ (220–300 °С).

При этом использование дихалькогенидов тугоплавких металлов, таких как молибден, вольфрам и кремний, в качестве смазочных материалов имеет различный успех в промышленности и сдерживается возможностями применения указанных смазочных материалов в качестве твердых смазок для специфических узлов трения – вакуумные условия, сверхвысокие температуры (более 600 °С), космическая промышленность и др. [2, 5–7]. Возможности в расширении диапазона применения твердых смазок подразумевают их использование в составе противоизносных присадок в смазочных маслах. В этом случае твердая смазка выступает в качестве вещества, взвешенного в объеме стабилизирующих компонентов, например жирных ненасыщенных кислот. Исследования смазочной способности моторных масел с такого рода добавками, проводимые с модельными образцами деталей и полноразмерными деталями судовых тронковых двигателей, отражены в работах [9–12]. Результаты испытаний на износостойкость поверхностей деталей из серого легированного чугуна при вариации вязкости, объемных и массовых концентраций присадки и ее

взвешенного состояния в объеме базового смазочного масла проиллюстрировали убедительные результаты и целесообразность использования присадки как противоизносной добавки для моторных смазочных масел [13]. Эффективность смазывания и износостойкость поверхностей трения деталей судовой ЦПГ в проведенных испытаниях повышались в 2,5–3 раза по сравнению с бесприсадочным маслом МС-20 высокой вязкости. Это свидетельствует об удовлетворительной способности модификатора трения осаждаться из объема смазочного масла на данные поверхности трения в условиях высоких контактных давлений и температур до 250–300 °С [13].

Проведенные в работах [9–12] исследования были реализованы в условиях применения сложных экспериментальных установок с возвратно-поступательным механизмом движения [9, 10, 12] либо с реальным малогабаритным двигателем [11] при наличии точных тензометрических и термометрических схем считывания информации, а также измерителей износа и счетчиков «мертвых» положений подвижного образца при испытаниях. Подобные меры дают высокую точность трибологических исследований нахождения коэффициента трения, но значительно усложняют испытательную установку структурно. Кроме того, цикл испытаний является достаточно долговременным.

Вышеуказанные проблемы дают предпосылку к разработке и использованию малогабаритной машины трения упрощенной конструкции со схемой движения образцов, отвлеченной от возвратно-поступательной схемы. Данная схема подразумевает чистое вращательное движение подвижного образца и реализована коллективом авторов в работе [14], где выполняется подробная структурная и энергетическая характеристика такой исследовательской установки для противоизносных испытаний. На данный момент описанная ротационная неконформная схема движения и нагружения образцов с использованием пары трения «шар – цилиндр» приведена в стандартизованном нормативном документе [15]. Однако данный источник регламентирует проведение циклов противоизносных испытаний различных смазочных материалов с применением достаточно громоздкой стационарной машины трения СМТ-1. Это снижает допустимый диапазон условий применения подобных схем противоизносных испытаний и мобильность исследовательской установки.

Описанная в работе [14] ротационная машина трения имеет малые габариты и может использоваться как переносной трибометр для построения трибологического рейтинга различных смазочных материалов. Данная установка позволяет проводить исследования с последовательно возрастающим путем трения для поиска оптимального состава смазочных материалов, в том числе с добавлением противоизносных присадок.

Цели и задачи исследования

В работе поставлена задача провести трибологическое исследование смазочной способности масла с добавлением двух вариантов противоизносной присадки по [13]: в перемешанном состоянии и отсутствии перемешивания перед испытаниями трибологических образцов. Данный вопрос был практически не затронут в исследованиях [9–12], между тем обозначенная проблема актуальна для смазочных материалов в судовой технике. Присадка со слоистым модификатором трения, как это стало известно [9], теряет эффективность уже после 4–8 ч хранения, что вызвано ускоренным осаждением более крупных частиц диселенида молибдена. Противоизносные исследования, реализуемые по разработанным планам испытаний на установках, приведенным в работах [9, 10, 12], требуют больших временных затрат, в то же время типовые временные затраты на проведение исследований по схеме «шар – цилиндр» не превышают 25 ч для всех наработок по критерию «путь трения образцов». Поэтому целесообразно использование машины трения согласно [14] в исследовании смазочной способности трех вариантов смазочного масла:

1. Базовое смазочное масло;

2. Базовое смазочное масло с добавлением 1,0 % масс. противоизносной присадки по [13] без ее перемешивания;

3. То же по п. 2 при перемешивании присадки.

Таким образом, в краткие сроки возможно построить трибологический рейтинг заявленных вариантов смазочных материалов и выбрать из них оптимальный вариант для использования в узлах трения судовых ДВС. В связи с этим перечислим основные задачи исследования смазочной способности смазочных материалов на ротационной машине трения оригинальной конструкции [14]:

– построение трибологического рейтинга для смазочных масел с противоизносной присадкой [13];

– определение возможности использования исследуемых смазочных материалов для обеспечения износостойкости поверхностей трения при различном контактном давлении;

– выбор наиболее эффективного смазочного материала;

– определение гидродинамической несущей способности смазочных материалов, при которой износ поверхностей трения стремится к нулевому значению.

Разработка машины трения для трибологических испытаний

Общий вид машины трения ротационного типа представлен на рис. 1, общий вид деталей испытательной камеры – на рис. 2.

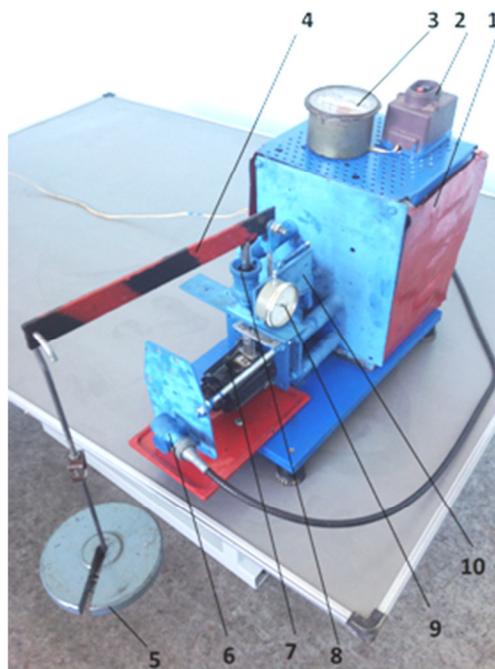


Рис. 1. Общий вид ротационной машины трения:
1 – электродвигатель и редуктор в защитном кожухе;
2 – пусковое устройство электродвигателя; 3 – счетчик пути трения; 4 – балка нагружения образцов; 5 – груз;
6 – угловой редуктор счетчика пути трения;
7 – испытательная камера; 8 – направляющая для вертикального штока неподвижного образца;
9 – индикатор износа неподвижного образца;
10 – направляющая для продольного перемещения неподвижного образца

Fig. 1. General view of the rotary friction machine:
1 - electric motor and gearbox in a protective casing;
2 - starting device of the electric motor; 3 - friction path counter; 4 - loading beam for specimens; 5 - cargo;
6 - angular reducer of the friction path counter;
7 - test chamber; 8 - guide for the vertical rod of a stationary sample;
9 - indicator of wear of a stationary sample;
10 - guide for longitudinal movement of a stationary sample

В коробе 1, установленном на раме, располагается двигатель и редуктор, приводящие в действие вращающийся вал установки. На переднем конце приводного вала располагается угловой редуктор счетчика пройденного пути трения 6. Вал вращается внутри испытательной камеры 7 и несет на себе закрепленный подвижный образец 2 (рис. 2) – кольцо роликового подшипника диаметром 52 мм. Материал кольца – подшипниковая сталь ШХ-15. Ширина кольца в осевом направлении (вдоль приводного вала) – 15 мм. С кольцом подшипника неконформным способом взаимодействует неподвижный образец 3 (рис. 2) – шарик диаметром 8 мм. Образцы из стали ШХ-15 истираются в течение всего цикла вращательного движения подвижного образца. При этом неподвижный образец жестко закреплен в держателе.

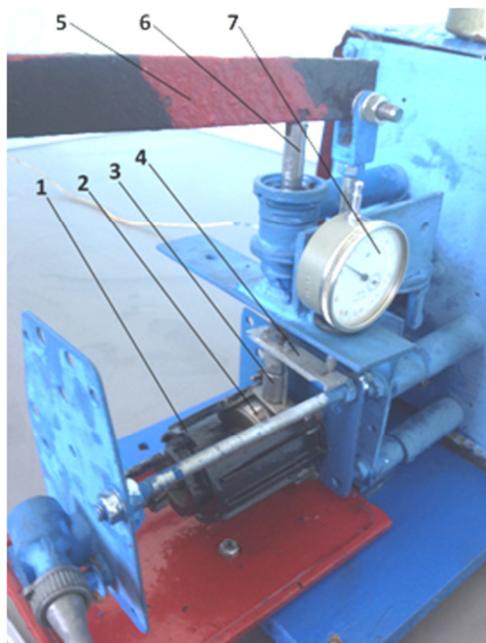


Рис. 2. Общий вид испытательной камеры: 1 – корпус испытательной камеры; 2 – подвижный образец; 3 – неподвижный образец в держателе; 4 – измерительная пластина для индикатора износа неподвижного образца; 5 – силовая балка; 6 – вертикальный шток держателя неподвижного образца; 7 – индикатор часового типа

Fig. 2. General view of the test chamber:
1 - test chamber body; 2 - movable sample; 3 - stationary sample in the holder; 4 - a measuring plate for a wear indicator of a stationary sample; 5 - power beam; 6 - vertical rod of the holder of a stationary sample; 7 - dial indicator

Силовая балка 5 с грузом (рис. 2) создает на направляющем штоке 6 нормальную силу $N = 147,15 \pm 5,9$ Н. На штоке 6 закреплен держатель неподвижного образца. Также на направляю-

щем штоке 6 закреплена измерительная пластина 4 для оттяжки измерительного стержня индикатора часового типа ИЧ-1. Данный индикатор 9 (рис. 1) измеряет линейный износ неподвижного образца с точностью до 0,001 мм. Индикатор закреплен на направляющем устройстве 8 (рис. 1). Направляющий шток неподвижного образца может перемещаться в двух направлениях: вертикально в направляющей 8 (рис. 1) для нагрузки неподвижного образца при его истирании; горизонтально, вдоль направляющей 10 для смены дорожки изнашивания образцов между циклами испытаний. При этом держатель неподвижного образца вместе со штоком и направляющей штока перемещается горизонтальным винтом вдоль корпуса 1 (рис. 1) в направляющем устройстве 10.

Частота вращения приводного вала с подвижным образцом составляет $n = 230 \pm 10$ об/мин. Вращение от углового редуктора 6 (рис. 1) счетчика пути трения передается гибким валом на механический барабанный одометр 3, расположенный на корпусе 1 двигателя установки.

Испытуемый смазочный материал подается до начала испытаний в испытательную камеру 7 диаметром 55 мм. Несколько оборотов до начала испытания выполняется при вращении вала вхолостую без нагружения силовой балки 4 (рис. 1). С помощью перечисленных мер достигается надежное нанесение смазочного материала на поверхность подвижного образца.

Методика проведения трибологических испытаний

Исследуемые смазочные материалы испытывают в течение 10 этапов, представляющих собой безостановочное истирание образцов в смазочной ванне с различной величиной пути трения (табл. 1) до достижения наработки в 12 000 м.

Таблица 1

Table 1

Характеристика этапов испытаний

Characteristics of the test stages

№ i-го этапа	Путь трения s_i за этап, м	Продолжительность этапа испытания		
		часов	минут	секунд
1.1	200	3	4	5
1.2	500	0	13	19
2	1 000	0	26	38
3	2 000	0	53	16
4	3 500	1	33	12
5	5 000	2	13	08
6	7 500	3	19	43
7	9 000	3	59	39
8	10 000	4	26	17
9	11 000	4	52	55
10	12 000	5	19	32
Итого	52 500	27	17	39

Неподвижный образец в виде шарика диаметром 8 мм жестко закрепляется в держателе на вертикальном штоке и стягивается винтовым способом между бронзовым корпусом держателя и запорной алюминиевой пластиной. На приводной вал устанавливается подвижный образец – кольцо подшипника внешним диаметром 52 мм и шириной 15 мм. Подвижный образец фиксируется осевой шайбой и концевой гайкой на приводном валу без возможности осевого люфта. На передний конец приводного вала устанавливается шлицевой переходник, приводящий в действие угловой редуктор счетчика пути трения. Испытание смазочного материала состоит из цикла прохождения подвижным образцом в этой смазочной среде различного пути трения. Преодоление пути трения на 10 этапах в пределах одного цикла производится для подвижного образца безостановочным вращением. После окончания цикла испытания приводной вал останавливается и снимается с вала, как и неподвижный вал со своей державки. До начала эксперимента испытательная камера заполняется смазочным материалом объемом не менее 25 см³.

При смене испытуемого смазочного материала оба истираемых образца также заменяются на новые. Испытательная камера после смены смазочного материала очищается ацетоном или авиационным бензином. Очистке подвергаются все загрязненные детали и поверхности в испытательной камере. При запуске электродвигателя начинается вращение подвижного образца и нагружается неподвижный, входящий с ним в пару трения. По окончании отсчета финального пути трения, равного для подвижного образца 12 000 м по одометру, он освобождается от нагрузки со стороны неподвижного образца поднятием балки нагружения вверх с одновременной остановкой электродвигателя.

Методика обработки результатов трибологических испытаний

В проводимых испытаниях для каждого из этапов определяется величина h_i линейного износа неподвижного образца. Этот показатель отсчитывается по истечении пройденного пути трения s_i подвижным образцом на каждом этапе испытаний путем измерения глубины, мм, истертой поверхности подвижного образца:

$$H_i = D_n - h_i,$$

где $D_n = 8$ – номинальный диаметр образца, мм; h_i – высота образца без истертой части, мм.

Высота H_i измеряется при позиционировании образца поверхностью, подвергшейся изнашиванию, на базовой поверхности поверочной плиты. Измерительным инструментом является индикатор часового типа с точностью 0,001 мм, закрепленный на опорном штативе.

Индикатор часового типа на испытательной установке на каждом этапе прохождения пути трения служит контрольным инструментом для отсчета относительной величины h_i изнашивания во время проведения испытаний.

Расчет основных и начальных давлений изнашивания на каждом этапе исследования и для каждого испытуемого смазочного материала проводится по нижеследующему алгоритму.

Определяется средний диаметр, мм, пятна износа неподвижного образца:

$$d_i = ((D_n - (D_n^2 - 2h_i)^{0,5}), \quad (1)$$

где $D_n = 8$ – диаметр неподвижного шарообразного образца, мм; h_i – глубина износа неподвижного образца, мм.

Далее определяется безразмерное значение интенсивности изнашивания:

$$I_i = h_i \cdot 10^{-3} / s_i, \quad (2)$$

где h_i – глубина износа неподвижного шарообразного образца, мм; s_i – путь трения i -го этапа испытания, м.

Определяется величина давления, Па, соответствующая интенсивности изнашивания I_i :

$$P_i = 0,785N / d_i 10^{-3}, \quad (3)$$

где N – величина нормальной силы, вертикально действующей на неподвижный образец, Н; d_i – диаметр пятна износа неподвижного образца, мм, вычисленный по (1).

Полученное безразмерное значение интенсивности изнашивания I_i для каждого из i -х этапов исследования вычисляется по выражению [15]

$$I_i = a_i + b_i \ln P_i, \quad (4)$$

где a_i и b_i – коэффициенты логарифмической функции нарастания давления изнашивания для неподвижного образца P_i .

Из формулы (4) для каждого испытуемого смазочного материала возможно найти значение безразмерных коэффициентов a_i и b_i логарифмической функции $I_i = f(P_i)$ по следующим выражениям:

$$a_i = (A \cdot B - C \cdot D) / (N \cdot B - E);$$

$$b_i = (N \cdot A \cdot C - A \cdot D) / (N \cdot B - E),$$

где $N = 10$ – число i -х этапов исследования в пределах противоизносного испытания одного варианта смазочного материала; $A = \sum I_i$ – сумма величин изнашивания за все i -е этапы испытаний; $B = \sum (\ln P_i)^2$ – сумма квадратных логарифмов давления изнашивания за все i -е этапы испытания; $C = \sum (I_i \cdot \ln P_i)$ – сумма произведений изнашивания на логарифмы давления изнашивания за все i -е этапы испытания; $D = \sum \ln P_i$ – сумма логарифмов давления изнашивания за все i -е этапы испытания;

$E = (\sum \ln P_i)^2$ – квадратная сумма логарифмов давления изнашивания за все i -е этапы испытания.

Заключительным этапом обработки результатов исследования является нахождение с помощью значений коэффициентов a и b безразмерного «нулевого» давления изнашивания, при котором износ практически равен нулю:

$$P_0 = e^{-(a/b)}$$

С учетом характера нарастания интенсивности изнашивания по (2) в зависимости от давления

изнашивания по (3), предельной величины давления P_i и величины «нулевого» давления P_0 возможно охарактеризовать рейтинг смазочной способности масел и присадок.

Условия проведения трибологических испытаний

Противоизносные испытания проводили для трех составов смазочных сред при начальных условиях, указанных в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Условия проведения трибологических испытаний Conditions for conducting tribological tests

Параметр	Значение параметра
Вид смазочного материала	1. Масло МС-20 по ГОСТ 21743-76 (селективной очистки); 2. То же по п. 1 + присадка противоизносная неперемешанная; 3. То же по п. 1 + присадка противоизносная, перемешанная в течение 30 мин при 2900 ± 50 об/мин
Нормальная нагрузка на неподвижный образец N , Н	$147,15 \pm 5,9$
Частота вращения приводного вала с подвижным образцом n , об/мин	230 ± 10
Объем смазочной ванны V , см ³	25
Диаметр неподвижного шарообразного образца D_n , мм	7,938
Диаметр подвижного образца d_n , мм	52
Схема контакта образцов	«шар – цилиндр»
Время этапов испытаний T_i	10 этапов с наработками
Путь трения на этапах испытаний s_i	10 этапов с наработками
Наибольший крутящий момент на приводном валу M , Н·м	$33,24 \pm 0,6$
Наибольшая мощность приводного электродвигателя P , Вт	800

Базой сравнения для противоизносных испытаний выбрано масло МС-20 (ГОСТ 21743-76) селективной очистки, которое характеризуется отсутствием присадок, что позволяет повысить точность оценки проведенных трибологических испытаний в отсутствии других функциональных сред, повышающих смазочную способность базового масла.

Испытания масла МС-20 кинематической вязко-

стью 20–22 мм²/с проводили в течение 10 этапов по наработкам пути трения (см. табл. 1). К базовому смазочному маслу на двух других циклах противоизносного испытания добавлялась присадка [13] в пределах 1,0 масс. %. Составляющие противоизносной присадки [13] приведены в табл. 3 с указанием функционального назначения каждого ее компонента и его относительной плотности.

Таблица 3

Table 3

Состав противоизносной присадки на основе диселенида молибдена Composition of antiwear additive based on molybdenum diselenide

Составляющая в присадке	Функциональное назначение	Химическая формула	Массовая доля в составе присадки, %	Плотность, кг/м ³
Олеиновая кислота	Стабилизатор – деагулянт твердой фазы	$C_{18}H_{34}O_2$ $CH_3(CH_2)_7CH-CH(CH_2)_7COO$	60	895
Стеариновая кислота	Стабилизатор для высоких температур действия присадки (свыше 120 °С)	$C_{18}H_{36}O_2$ $CH_3(CH_2)_{16}COOH$	30	940
Диселенид молибдена	Твердая фаза – слоистый модификатор трения	$MoSe_2$	10	698

Различие во втором и в третьем циклах испытаний заключалось в наличии 30-минутной операции по перемешиванию данной присадки на ротационно-пульсационном аппарате РПА-0,8-55А при частоте вращения ротора $2\,900 \pm 50$ об/мин и напоре циркулирующей жидкости в пределах 0,8 м.

Указанная дифференциация процессов перемешивания присадки перед внесением в объем масла давала возможность выпасть в осадок и не быть внесенной определенной массе твердой фазы – диселенида молибдена. Таким образом, условия по возможному снижению трибологической эффективности слоистого модификатора трения задава-

лись заранее [13], тем самым моделировались условия применения противоизносной присадки после длительного хранения.

Получение и обработка результатов трибологических испытаний

Результаты противоизносных испытаний отражены в табл. 4 как качественные показатели изнашивания неподвижного образца. Указанные на рис. 3 изображения отпечатков пятна износа дают возможность оценить примерную топографию поверхности после проведенного последнего этапа испытания с наработкой пути трения $s = 12\,000$ м.

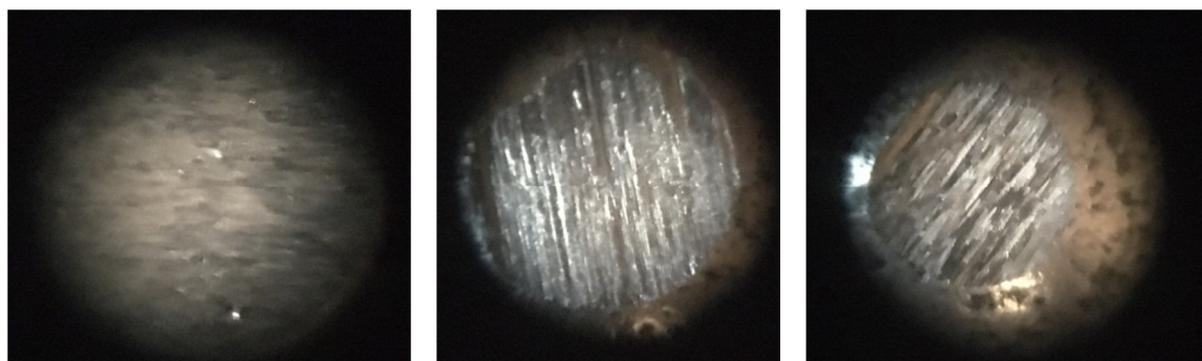
Таблица 4

Table 4

Качественная характеристика смазочных материалов по итогу испытаний

Qualitative characteristics of lubricants according to the test results

Вариант смазочного материала	Диаметр отпечатка износа, мм	Характеристика топографической картины поверхности
Масло МС-20 по ГОСТ 21743-76 (селективной очистки)	3,25	Имеются следы усталостного износа без значительных продольных полос микрорезания, поверхность характеризуется наличием незначительных по площади следов усталостных вырываний металла, имеется след прижига металла ближе к одному краю отпечатка в форме полумесяца до 18–20 % общей площади отпечатка износа
Масло МС-20 + присадка противоизносная неперемешанная	2,5	Наличие продольных полос микрорезания шириной 0,01–0,05 мм, имеются вкрапления слоистого модификатора трения, сосредоточенные ближе к краям отпечатка, площадь осаждения модификатора – до 30 % общей площади отпечатка, следы пластических деформаций сдвигом и заедания материала отсутствуют, края отпечатка ровные, закругления краев незначительные
Масло МС-20 + присадка противоизносная, перемешанная в течение 30 мин при $2\,900 \pm 50$ об/мин	1,95	Наличие продольных полос микрорезания шириной 0,05–0,07 мм, имеются вкрапления слоистого модификатора трения, сосредоточенные по всей площади отпечатка, площадь осаждения модификатора – до 40 % общей площади отпечатка, следы пластических деформаций сдвигом и заедания материала отсутствуют, края отпечатка ровные, без закруглений



а

б

в

Рис. 3. Изображения отпечатков пятна износа на поверхности трения (увеличение $\times 10$):

а – масло МС-20; б – масло МС-20 с добавлением присадки без перемешивания;

в – масло МС-20 с добавлением перемешанной присадки

Fig. 3. Images of imprints of wear spots on the friction surface (magnification $\times 10$): а - MS-20 oil; б - MS-20 oil with the addition of an additive without stirring; в - MS-20 oil with the addition of a mixed additive

На рис. 4 приведены количественные показатели износа h_i неподвижного образца и соответствующие показатели диаметра пятна износа поверхности в функции $d_i = f(h_i)$. Следует отметить, что показатели d_i рассчитаны по (1). Действительный диаметр пятна износа сферического образца в каждом этапе и цикле этапов, замеренный с точностью 0,01 мм, дает расхождения с показателем, рассчитанным по (1), не более чем на 0,015 %.

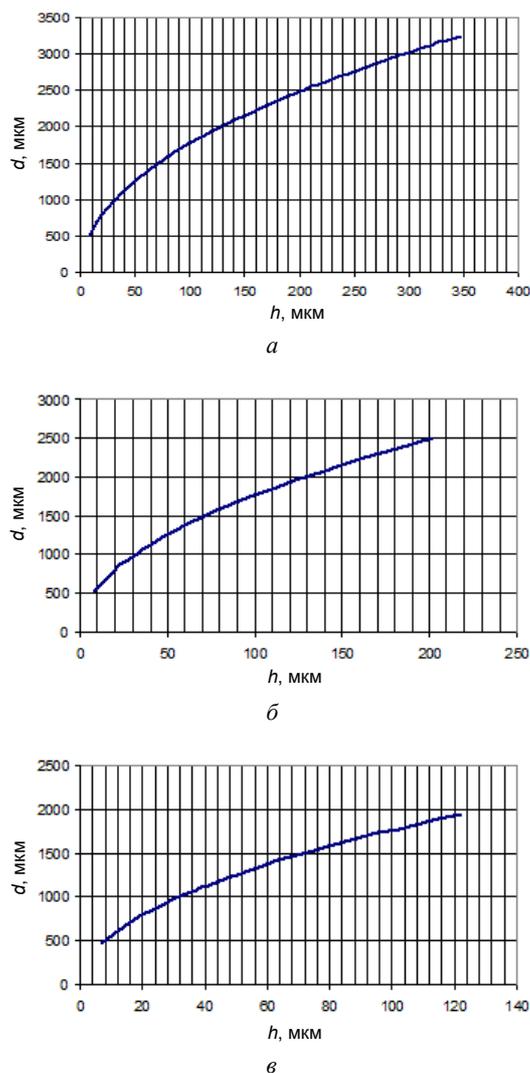


Рис. 4. Зависимость диаметра пятна износа d_i от величины износа h_i неподвижного образца на этапах испытания для разных смазочных композиций: а – масло МС-20; б – масло МС-20 с добавлением присадки без перемешивания; в – масло МС-20 с добавлением перемешанной присадки

Fig. 4. Dependence of the diameter of the wear scar d_i on the amount of wear h_i of the stationary sample at the test stages for different lubricant compositions: а - MS-20 oil; б - MS-20 oil with the addition of an additive without stirring; в - MS-20 oil with the addition of a mixed additive

На рис. 5 представлены рассчитанные по (2), (3) показатели интенсивности изнашивания I_i и давления P_i в функции $I_i = f(P_i)$.

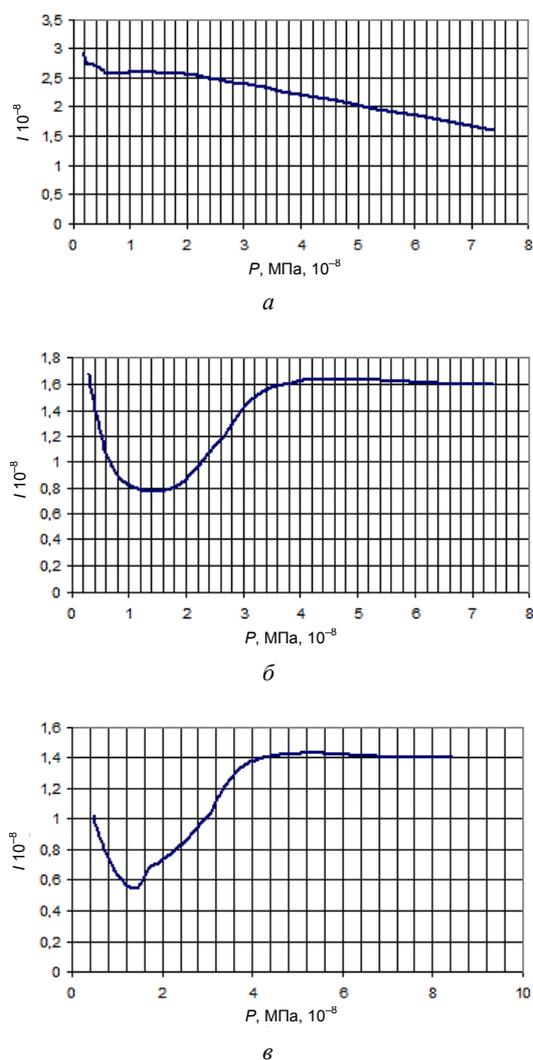


Рис. 5. Зависимость интенсивности изнашивания I_i от контактного давления образцов P_i на этапах испытания для разных смазочных композиций: а – масло МС-20; б – масло МС-20 с добавлением присадки без перемешивания; в – масло МС-20 с добавлением перемешанной присадки

Fig. 5. Dependence of the wear rate I_i on the contact pressure of the samples P_i at the test stages for different lubricant compositions: а - MS-20 oil; б - MS-20 oil with the addition of an additive without stirring; в - MS-20 oil with the addition of a mixed additive

На рис. 6 приведена зависимость величины износа h_i неподвижного образца от величины наработки пути трения s_i на этапах испытания для трех составов смазочных материалов: первый вариант – смазочное масло МС-20, второй и третий – МС-20 с присадкой без предварительного перемешивания и перемешанной перед внесением в объем масла.

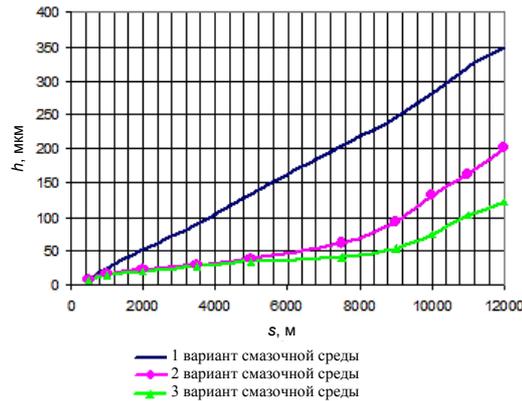


Рис. 6. Зависимость величины износа сферического образца h_i от величины пути трения s_i , пройденного подвижным образцом

Fig. 6. Dependence of the amount of wear of a spherical specimen h_i on the magnitude of the friction path s_i traversed by a moving specimen

В табл. 5 даны рассчитанные показатели давления P_0 , при котором теоретически изнашивание отсутствует.

Таблица 5

Table 5

Результаты расчета давления P_0

Results of calculating pressure P_0

Расчетный параметр	Представленный вариант смазочной среды		
	Масло МС-20	Масло МС-20 с противозносной присадкой	
		в отсутствие перемешивания	при перемешивании
a_i	$7,55 \cdot 10^{-08}$	$1,35 \cdot 10^{-08}$	$-2,77 \cdot 10^{-08}$
b_i	$-3,38 \cdot 10^{-07}$	$-2,26 \cdot 10^{-07}$	$-2,38 \cdot 10^{-07}$
P_0	1,251	1,062	0,89

Представленные качественные и численные показатели результатов противозносных испытаний дают возможность оценить различия в трибологической эффективности присадки [13] в составе масла МС-20 относительно самой базы сравнения и относительную эффективность мер по перемешиванию объема присадки перед применением в смазочном масле.

Выводы

1. Рассмотренные в настоящей работе машина трения и программа противозносных испытаний позволяют получить достаточно объемные результаты при минимизации трудоемкости выполнения экспериментальной программы и сопутствующих затрат времени испытания. Безостановочный вариант работы машины на протяжении пути трения $s = 12\ 000$ м в сочетании с возможностью оперативного отсчета величины линейного износа неподвижного образца по индикаторной головке с точностью 0,001 мм дает возможность снизить временные затраты на проведение испытания пример-

но в 5 раз, наработку пути трения – в 4,3 раза, трудоемкость по замене и установке образцов – в 10 раз, по сравнению со схожей программой испытания [15].

2. Противозносная присадка [13] с диселенидом молибдена способствует значительному повышению смазочной способности базовой среды (масло МС-20) и снижению износа поверхностей трения. Величина износа h неподвижного образца по результатам испытаний снижается на 66–85 % при введении присадки в базовое масло, учитывая предварительную обработку смазочных материалов. Диаметр пятна износа на неподвижном образце уменьшается на 28–67 %, чем наглядно доказываются эффективность предварительной обработки смазочных композиций с использованием роторно-пульсационной установки.

3. Изнашивание неподвижного образца при последовательно возрастающем пути трения для всех трех составов смазочных материалов увеличивается по разным закономерностям: базовое масло МС-20 без функциональных присадок имеет тенденцию к практически линейной зависимости изна-

Shapchikov V. A., Guzhvenko I. N., Ryumchikina N. V., Ryumchikina M. S., Kozalev O. P. Experimental studying tribological characteristics of lubricating oils with layered friction modifiers and their application in marine technology

носа h от наработки пути трения, варианты данного масла с добавлением противоизносной присадки изнашиваются при зависимости $h = f(s)$, близкой к логарифмической. При этом тангенс линии наклона усредненной прямой для данных трех характеристик $h = f(s)$, представленных на рис. 6, различается в 1,73–2,85 раза соответственно: для варианта смазочной среды без присадки против варианта масла с перемешанной присадкой, а также варианта с отсутствием предварительного перемешивания объема присадки. Это свидетельствует об эффективности подготовительных мер для противоизносной присадки, увеличивающих долю модификатора трения MoSe₂ в поверхностном плакирующем микронеровности слое смазочной среды.

4. Диапазон контактных давлений по результатам 10 пройденных этапов пути трения с финальной наработкой 12 000 м для всех трех смазочных сред находится на уровне 10⁸ МПа, однако в пределах данного численного разряда для отдельных случаев различается: $D_p = 41,06$ для бесприсадочного масла МС-20; $D_p = 24,63$ для сочетания МС-20 и перемешанной присадки; $D_p = 17,22$ для сочетания базового масла и перемешанной присадки. Это свидетельствует о существенных различиях в начальном и конечном износе неподвижного образца и максимальном его значении для масла без присадок. Перемешивание присадки дает возможность не только снизить наибольшую величину контактного давления на сферическом образце, но и снизить возможность повышения интенсивности изнашивания при возрастающей наработке пути трения. Соотношения максимальной величины интенсивности изнашивания I по достижении наработки $s = 12\ 000$ м для базового масла и вариантов сочетания его с противоизносной присадкой в перемешанном и перемешанном состоянии составляют 2,84 и 1,73 соответственно.

5. Численные значения контактных давлений образцов при наработке пути трения $s = 500$ м примерно одинаковы для базового смазочного масла и его варианта с перемешанной присадкой, однако для сочетания МС-20 и предварительно перемешанной присадки различаются примерно в 1,14 раза, это дает основания считать, что слоистый модификатор трения, взвешенный в объеме смазочной среды, попадает в граничную смазочную пленку на более раннем этапе, чем для варианта смазочной среды без перемешивания объема присадки.

6. Интенсивность изнашивания, в зависимости от давления в контакте образцов, непрерывно возрастает только для бесприсадочного масла, а для других материалов имеет тенденцию к временному снижению в течение различных наработок пути трения: для масла с перемешанной присадкой на пути трения $s = 1\ 000$ – $5\ 000$ м, при предварительном перемешивании данный диапазон наработки возрастает и составляет $s = 1\ 000$ – $7\ 500$ м. Указанное различие возможно объяснить как наличием собственно присадки с активными частицами слоистого модификатора трения, так и лучшими возможностями его осаждения на поверхность трения при взвешенном состоянии большинства активных частиц MoSe₂ в объеме смазочной среды.

7. Давление P_0 , при котором износ поверхности трения неподвижного образца теоретически должен исчезнуть при выполнении логарифмической закономерности изменения величины изнашивания в зависимости от пройденного пути трения, не имеет серьезных различий по величине для всех трех представленных составов смазочных сред, поэтому решающего значения в оценке их смазочной способности не имеет.

8. Топографические картины отпечатков износа дают возможность качественно охарактеризовать состояние поверхности трения после прохождения финальной наработки пути трения $s = 12\ 000$ м. По данным изображениям можно судить о наличии на поверхности трения защитного слоя из частиц MoSe₂ для смазочных сред с добавлением присадки [13], большая площадь осаждения частиц слоистого модификатора выявлена для смазочной среды с предварительным перемешиванием противоизносной присадки.

9. Преобладающим видом изнашивания поверхности трения неподвижного образца для всех трех вариантов смазочных сред является усталостное, однако для случаев сочетания масла МС-20 с противоизносной присадкой со слоистым модификатором трения механизм изнашивания значительно смягчается по контактным давлениям и не имеет тенденции к возникновению микроскопических «осповидных» дефектов на поверхности, при которых металл вырывается с поверхности на малую глубину при минимальной площади единичного повреждения. Данные дефекты могут во множественном числе существенно снижать несущую способность металлической поверхности при любой ее твердости.

Список источников

1. Путинцев С. В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета, испытаний. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 288 с.
2. Воронков Б. Д. Подшипники сухого трения. Л.: Машиностроение, 1968. 140 с.
3. Кулиев А. М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. Л.: Химия, 1985. 312 с.
4. Долгополов К. Н., Любимов Д. Н., Пономаренко А. Г., Чигаренко Г. Г., Бойко М. В. Структура смазочных слоев, формирующихся при трении в присутствии присадок минеральных модификаторов трения // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 5. С. 516–521.

5. Марченко Е. А. О механизме изнашивания диселенида молибдена // Трение и износ. 2000. Т. 21. № 4. С. 438–443.
6. Лобова Т. А., Марченко Е. А. Взаимодействие поверхностей трения со смазочными материалами типа 2Н-MoS₂ // Трение и износ. 2008. Т. 29. № 4. С. 391–398.
7. Лобова Т. А., Марченко Е. А. Использование диселенидов тугоплавких металлов для обеспечения стабильности работы узлов трения // Вестн. науч.-техн. развития. 2009. № 5 (21). С. 16–21.
8. Ващенко А. В., Казарезов В. В., Таловина И. В., Костенко В. В. Серпентиниты в триботехнике // Аналитические идеи, методы, технологии. 2002. № 1. С. 43–50.
9. Перекрестов А. П., Саламех А., Чанчиков В. А., Гужвенко И. Н., Абу Bakarов 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., Перекрестов А. П., Чанчиков В. А., Прямухина Н. В., Павлов А. В. Повышение износостойкости узлов и деталей судовых ДВС путем модифицирования смазочных материалов // Мор. интеллектуал. технологии. 2019. № 4. Т. 2. С. 59–68.
11. Гужвенко И. Н., Чанчиков В. А., Прямухина Н. В., Стринжа Е. А. Исследование эффективности использования слоистого модификатора трения в цилиндропоршневой группе судового дизельного двигателя // Мор. интеллектуал. технологии. 2018. № 3. Т. 1. С. 135–142.
12. Гужвенко И. Н., Чанчиков В. А., Прямухина Н. В., Равин А. А. Моделирование изнашивания в цилиндропоршневой группе ДВС с применением слоистого модификатора трения // Мор. интеллектуал. технологии. 2017. № 4. Т. 1. С. 134–140.
13. Пат. 2570643 Рос. Федерация, МПК С10М 169/04, С10М 125/22. Противоизносная присадка / Перекрестов А. П., Дроздов Ю. Н., Чанчиков В. А., Гужвенко И. Н., Свекольников С. А., заявл. 22.07.2014; опублик. 10.12.2015, Бюл. № 34.
14. 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.
15. ГОСТ Р 51860-2002. Обеспечение износостойкости изделий – оценка противоизносных свойств смазочных материалов методом «шар – цилиндр». М.: Госстандарт России, 2002. 9 с.

References

1. Putintsev S. V. *Mekhanicheskie poteri v porshnevnykh dvigateliakh: spetsial'nye glavy konstruirovaniia, rascheta, ispytaniia* [Mechanical losses in piston engines: special chapters of design, calculation, testing]. Moscow, Izd-vo MG TU im. N. E. Bauman, 2011. 288 p.
2. Voronkov B. D. *Podshipniki sukhogo treniia* [Dry friction bearings]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1968. 140 p.
3. Kuliev A. M. *Khimiia i tekhnologiia prisadok k maslam i toplivam* [Chemistry and technology of additives to oils and fuels]. Leningrad, Khimiia Publ., 1985. 312 p.
4. Dolgoplov K. N., Liubimov D. N., Ponomarenko A. G., Chigareno G. G., Boiko M. V. Структура смазочных слоев, формирующихся при трении в присутствии присадок минеральных модификаторов трения [Structure of lubricating layers formed during friction in presence of additives of mineral friction modifiers]. *Trenie i iznos*, 2009, vol. 30, no. 5, pp. 516–521.
5. Marchenko E. A. О механизме изнашивания диселенида молибдена [On wearing mechanism of molybdenum diselenide]. *Trenie i iznos*, 2000, vol. 21, no. 4, pp. 438–443.
6. Lobova T. A., Marchenko E. A. Взаимодействие поверхностей трения со смазочными материалами типа 2Н-MoS₂ [Interaction of friction surfaces with lubricants like 2H-MoS₂]. *Trenie i iznos*, 2008, vol. 29, no. 4, pp. 391–398.
7. Lobova T. A., Marchenko E. A. Использование диселенидов тугоплавких металлов для обеспечения стабильности работы узлов трения [Using diselenides of refractory metals to ensure stability of friction units]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiia*, 2009, no. 5 (21), pp. 16–21.
8. Vashchenok A. V., Kazarevov V. V., Talovina I. V., Kostenko V. V. Serpentinity v tribotekhnike [Serpentinities in tribotechnics]. *Analiticheskie idei, metody, tekhnologii*, 2002, no. 1, pp. 43–50.
9. Perekrestov A. P., Salamekh A., Chanchikov V. A., Guzhvenko I. N., Abubakarov A. Ia. Исследование эксплуатационных свойств противоизносных присадок для моторных смазочных масел в зависимости от процессов их обработки и седиментации [Investigating performance properties of antiwear additives for motor lubricating oils depending on their processing and sedimentation]. *Nauchnye problemy vodnoy transporta*, 2020, no. 64, pp. 102–112.
10. Guzhvenko I. N., Perekrestov A. P., Chanchikov V. A., Priamukhina N. V., Pavlov A. V. Повышение износостойкости узлов и деталей судовых ДВС путем модифицирования смазочных материалов [Improving wear resistance of units and parts of ship internal combustion engines by modifying lubricants]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2019, no. 4, vol. 2, pp. 59–68.
11. Guzhvenko I. N., Chanchikov V. A., Priamukhina N. V., Strinza E. A. Исследование эффективности использования слоистого модификатора трения в цилиндропоршневой группе судового дизельного двигателя [Investigating efficiency of layered friction modifier in cylinder-piston group of marine diesel engine]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2018, no. 3, vol. 1, pp. 135–142.
12. Guzhvenko I. N., Chanchikov V. A., Priamukhina N. V., Ravin A. A. Моделирование изнашивания в цилиндропоршневой группе ДВС с применением слоистого модификатора трения [Modeling wear in cylinder-piston group of internal combustion engine using layered friction modifier]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2017, no. 4, vol. 1, pp. 134–140.
13. Perekrestov A. P., Dроздов Ю. Н., Чанчиков В. А., Guzhvenko I. N., Svekol'nikov S. A. *Protivoiznosnaia prisadka* [Antiwear additive]. Patent RF; 10.12.2015.
14. Perekrestov A. P., Chanchikov V. A., Guzhvenko I. N., Svekol'nikov S. A., Arstanaliev E. U., Abishev M. N., Medetov Sh. M. Разработка машины трения для ускоренных противоизносных сравнительных испытаний смазочных материалов [Developing friction machine for accelerated anti-

wear comparative testing of lubricants]. *Vestnik Atyrauskogo instituta nefii i gaza*, 2016, no. 1 (37), pp. 96-99.

15. GOST R 51860-2002. *Obespechenie iznosostoikosti izdelii – otsenka protivoznosnykh svoystv smazochnykh ma-*

terialov metodom «shar – tsilindr» [GOST R 51860-2002. Ensuring wear resistance of products - assessment of anti-wear 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 28.12.2021

The article was submitted 04.10.2021; approved after reviewing 28.10.2021; accepted for publication 28.12.2021

Информация об авторах / Information about the authors

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

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

Нина Владимировна Прямухина – кандидат биологических наук; доцент кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; Астраханский государственный технический университет; Астрахань, ул. Татищева, 16; ninafishwom@mail.ru

Мария Сергеевна Прямухина – преподаватель факультета среднего профессионального образования; Астраханский государственный технический университет; Астрахань, ул. Татищева, 16; pryamuhina.masha@mail.ru

Олег Петрович Ковалев – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой технологии продуктов питания и товароведения; Дмитровский рыбохозяйственный технологический институт, филиал Астраханского государственного технического университета; Московская область, пос. Рыбное, 36; kovalev47@mail.ru

Vasily A. Chanchikov – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Shipbuilding and Marine Engineering Complexes; Astrakhan State Technical University; 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; Astrakhan, Tatishcheva St., 16; ivan.3124@yandex.ru

Nina V. Pryamukhina – Candidate of Biology; Assistant Professor of the Department of Heat Power Engineering and Refrigerating Machines; Astrakhan State Technical University; Astrakhan, Tatishcheva St., 16; ninafishwom@mail.ru

Mariya S. Pryamukhina – Lecturer of the Faculty of Secondary Vocational Education; Astrakhan State Technical University; Astrakhan, Tatishcheva St., 16; pryamuhina.masha@mail.ru

Oleg P. Kovalev – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Technology of Food Products and Commodity Science; Dmitrov Fisheries Technological Institute, branch Astrakhan State Technical University; Moscow region, Rybnoye, 36; kovalev47@mail.ru

