

УДК 621.426

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПАР  
ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ  
ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

**С.В. Сагин**  
доцент

*Национальный университет «Одесская морская академия»*

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы влияния органических покрытий (эпиламов) на работу прецизионной пары плунжер-штука топливного насоса высокого давления судового дизеля. Приведена технология эпиламирования металлических покрытий. Указаны особенности ее применения в условиях эксплуатации морского судна. Экспериментально подтвержден эффект ориентации молекул в граничном слое топливе при нанесении на поверхности органических пленок (эпиламов). Приведены результаты, подтверждающие 2,3-3,6 разовое снижение износа в паре плунжер-штука топливного насоса высокого давления при нанесении на эти поверхности органических покрытий.

**Ключевые слова:** судовой дизель, топливный насос высокого давления, топливо, граничный слой, ориентация молекул, органические покрытия, износ.

УДК 621.426

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ПРЕЦИЗІЙНИХ ПАР  
ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ  
ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ОРГАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ**

**С.В. Сагин**  
доцент

*Національний університет «Одеська морська академія»*

**Анотація.** Розглянути питання впливу органічних покриттів (епіламів) на роботу прецизійної пари плунжер-штука паливного насоса високого тиску судового дизеля. Наведена технологія нанесення епіламів на металеві покриття. Вказані особливості її застосування в умовах експлуатації морського судна. Експериментально підтверджено ефект орієнтації молекул в граничному шарі паливі при нанесенні на поверхні органічних плівок (епіламів). Наведено результати, що підтверджують 2,3-3,6 разове зниження зносу в парі плунжер-штука паливного насоса високого тиску при нанесенні на ці поверхні органічних покриттів.

**Ключові слова:** судновий дизель, паливний насос високого тиску, паливо, граничний шар, орієнтація молекул, органічні покриття, знос.

© Сагин С.В., 2018

UDC 621.426

**IMPROVING THE RELIABILITY OF PRECISION PAIRS  
OF FUEL EQUIPMENT OF SHIP DIESEL ENGINES  
THROUGH THE USE OF ORGANIC COATINGS**

**S. Sagin**  
assistant professor

*NU «Odessa Maritime Academy»*

***Abstract.** The problems of the influence of organic coatings (epilams) on the work of a precision pair of plunger-bushing of a high-pressure fuel pump of a marine diesel engine are considered. The technology of metal coating epilamination is given. The features of its use in the operating conditions of the ship. The effect of orientation of molecules in the boundary layer of the fuel when applied to the surface of organic films (epilams) has been experimentally confirmed. The results confirming the 2.3-3.6 one-time reduction of wear in a pair of plunger-bushing of a high-pressure fuel pump when applying organic coatings on these surfaces are given.*

***Keywords:** marine diesel, high pressure fuel pump, fuel, boundary layer, molecular orientation, organic coatings, wear.*

**Постановка проблеми в общем виде.** Топливная аппаратура высокого давления судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) обеспечивает не только впрыск топлива в цилиндр дизеля в необходимом объеме и в требуемый момент времени, но и характеризует надежность его работы. Повышенные износы прецизионной пары плунжер-втулка топливного насоса высокого давления (ТНВД) способствуют уменьшению цикловой подачи топлива (из-за повышенных протечек в этом сопряжении) и повышенным механическим нагрузкам (ввиду возможного попадания механических примесей, находящихся в топливе, в увеличившийся зазор названной пары трения). В связи с этим, важное значение приобретают теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых способствуют повышению надежности топливной аппаратуры высокого давления ДВС.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В ряде работ, посвященных вопросам исследования поведения углеводородных жидкостей вблизи металлических поверхностей, было определено наличие особой жидкокристаллической структуры, при которой молекулы жидкости обладают ориентационной упорядоченностью и характеризуются квазикристаллическими свойствами [1; 2]. Для ДВС узлами, где наиболее отчетливо могут проявляться такие свойства, в первую очередь, являются пара трения плунжер-втулка ТНВД, в которой обеспечивается минимальный зазор между контактирующими поверхностями [3].

Среди характеристик топлив, традиционно отмечается лишь их способность к самовоспламенению и сгоранию в цилиндре дизеля, при этом редко уделяется внимание еще одной их характеристике – смазочной способности, которую, как правило, рассматривают лишь в контексте с моторными маслами. Причем именно смазочная способность топлива обеспечивает качественную и надежную работу ТНВД, которые в свою очередь являются одними из ответственных узлов дизеля. Смазочная способность топлива не проявляется в «объемных зонах» топливной системы таких как трубопроводы, фильтра, сепараторы (за исключением, может быть, винтовых и шестеренчатых топливных насосов). Однако для элементов топливной аппаратуры высокого давления, где зазор между контактируемыми поверхностями определяется несколькими микрометрами, понятие «смазочная способность топлива» является более чем актуальным, а изучению этого свойства был посвящен ряд исследований [4; 5]. Однако, при этом не рассматривались вопросы повышения надежности работы топливной аппаратуры высокого давления за счет минимизации энергетических потерь в прецизионных парах ТНВД.

**Постановка задачи.** Учитывая изложенное, задачей выполненных исследований являлось определение влияния органических покрытий на механические потери, возникающие в паре трения плунжер-втулка ТНВД, а также в разработке технологии нанесения органических покрытий на прецизионные поверхности ТНВД.

**Изложение основного материала исследования.** Известно, что главной причиной выхода из строя судовых ДВС является не их поломка, а износ подвижных сопряжений и рабочих органов под влиянием сил трения. Износ же приводит к таким нежелательным последствиям, как нарушение нормального режима смазки, потеря кинематической точности механизмов, разгерметизация рабочего пространства дизелей, в результате чего понижается мощность и производительность, снижается эффективность работы дизеля, увеличивается расход топлива и масла, увеличивается время обслуживания, уменьшается время наработки на отказ.

Процесс изнашивания элементов топливной аппаратуры высокого давления необходимо рассматривать как комплекс взаимосвязанных факторов, влияющих на износ деталей контактирующих пар [6; 7]. Основными факторами, входящие в этот комплекс, являются:

1) конструктивные:

- обоснование выбора материала для деталей прецизионных пар и вида термической обработки;
- обоснование статического качества поверхности;
- выбор точности изготовления;
- выбор формы деталей, исходя из жесткости их элементов;

2) технологические:

- разброс действительных значений размеров, качество поверхности, взаимное расположение в пределах технических условий и допусков на изготовление;
- уменьшение жесткости элементов деталей в зависимости от разброса действительных значений размеров;
- скрытые дефекты в результате нарушения технологии изготовления (прижоги, микротрещины и т.д.);
- характер и величина деформации рабочих поверхностей в процессе сборки;
- величина изменения статистического качества поверхности;
- скрытые дефекты сборки;

3) эксплуатационные:

- перераспределение деформаций в результате хранения деталей;
- характер и величина деформаций рабочих поверхностей в зависимости от цикловых нагрузок и температур в процессе работы в различных климатических условиях;
- нарушение правил технического обслуживания;
- степень загрязнения воздуха и топлива абразивными частицами естественного происхождения.

Указанные выше факторы определяют интенсивность изнашивания и характер процессов трения и создают определенные виды износа ТНВД.

Однако, одного выбора материалов для узлов трения топливной аппаратуры является недостаточным для обеспечения максимальных антифрикционных характеристик трибологической системы плунжер-топливо-втулка ТНВД. Важную роль имеет технология обработки данных поверхностей.

Для образования однородного ориентирования молекул топлива в смазочных слоях большую роль играет обработка поверхности узла трения. С целью усиления ориентирующего действия трибосопряжения плунжер-втулка на находящиеся в нем молекулы топлива используют следующие виды обработки узлов трения:

- 1) химические методы подготовки поверхности;
- 2) механические методы подготовки поверхности;
- 3) нанесение на поверхности узла трения неорганических покрытий;
- 4) методы модификации поверхностей трения под воздействием различных физических полей;
- 5) нанесение на поверхности узла трения органических пленок.

Для условий эксплуатации морского судна последний метод является наиболее подходящим, поскольку требует минимальное количество трудозатрат и практически не зависит от использования дополнительного оборудования.

В настоящее время используют два способа нанесения органических пленок на поверхности трения: собственно обработку поверхности специальными реагентами и применение объемных добавок [8]. В первом случае на чистые поверхности узла трения наносят тонкие пленки вещества, молекулы которого адсорбируются своими полярными группами к металлу. Углеродородные части молекул располагаются перпендикулярно поверхности и создают гомеотропную ориентацию [9]. Объемные добавки, такие как жирные кислоты, действуют точно так же, но их необходимо вводить непосредственно в топливо. В этом случае ориентация определяется плотностью адсорбированных на поверхности молекул и может быть как гомеотропной, так и планарной. Это объясняется межмолекулярным взаимодействием между молекулами органических покрытий. Когда плотность покрытия велика, концевые группы сильнее взаимодействуют между собой, что и приводит к их гомеотропной ориентации. При небольшой плотности слабодействующие концевые группы располагаются параллельно металлическим поверхностям [10].

Заметим, что действие органических пленок на поверхностях трения до некоторой степени избирательно: определенные покрытия эффективно действуют только на определенные поверхности.

Технологий процесса управления структурированием молекул в пристенных слоях топлива за счет использования органических пленок осуществлялась на примере топлива IFO380 и поверхностей прецизионных пар, выполненных из стали ШХ15. В качестве органического покрытия была взята перфторкислота  $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7\text{COOH}$ , представляющая высокомолекулярное фтористое соединение и относящаяся к классу эпиламов.

Метод эпиламирания, примененный для пары плунжер-втулка, не получил широкого распространения в элементах судовых технических средств. Это, в том числе, связано с консервативностью судовой энергетики как науки и стремлением судового экипажа избежать дополнительных рисков, возникающих при внедрении инновационных идей. Особенно это касается таких ответственных узлов, как топливная аппаратура.

Одним из важнейших преимуществ эпиламирания является то, что оно не меняет структуру обрабатываемой твердой поверхности, а лишь модифицирует ее, придавая поверхности антифрикционные, антиадгезионные, защитные и другие полезные свойства. Практически неизменными остаются и геометрические размеры обрабатываемых деталей – толщина защитного слоя составляет примерно 0,01-0,015 мкм.

Эпиламы представляют собой многокомпонентные системы, включающие фторорганические поверхностно-активные вещества в раз-

личных растворителях и регулирующие добавки. Ограничение использование эпиламов в судовой техники также связано с относительно низкими температурами, до величин которых происходит эффективное использование их свойств.

В ряде источников [4] эти значения ограничивались величинами 100-120 °С, однако подобные данные относятся к первому поколению данных препаратов. Для современных эпиламов (полизам, амидофен, амидоамин, трибофол, эфрен и др.) максимальные температуры их эксплуатации достигают 600-700 °С. Таким образом, данные модификаторы поверхности вполне обоснованно могут использоваться для таких узлов трения, как прецизионная пара плунжер-втулка ТНВД, работающей в диапазоне температур до 150°С.

Эпиламирование позволяет существенно повысить износостойкость сопряженных деталей и, как следствие, улучшить динамику работы машин, станков, промышленных роботов, различного технологического оборудования, а также режущего и другого инструмента.

При нанесении эпиламов на поверхность твердого тела образуется тонкий слой специальным образом ориентированных молекул, позволяющий модифицировать поверхность материалов с целью придания ей антифрикционных, антиадгезионных, антикоррозионных и некоторых других специфических свойств:

- резко уменьшается поверхностная энергия материала (примерно в 1000-10000 раз; для металлов: с 3000-5000 мН/м до 2-4 мН/м), что ведет к существенному снижению коэффициента трения и как следствие этого – к повышению износостойкости сопряженных деталей (коэффициент трения снижается до 10 раз);
- предотвращается растекание смазочного материала (для пары плунжер-втулка ТНВД эти функции выполняет топливо) по поверхности;
- вследствие своей высокой проникающей способности эпилам заполняет все поры и микротрещины, дегасирует их; микропоры и микротрещины лишаются возможности концентрировать напряжения и перестают быть потенциальными центрами разрушения;
- поверхность защищается от воздействия влаги и агрессивных веществ.

Технология нанесения эпилама на поверхности плунжера и втулки, заключалась в следующем.

Для исследования процессов адсорбции органических пленок на поверхности, прецизионной пары были приготовлены образцы из стали ШХ15 в виде пластин 80×15 мм, рабочая поверхность которых доводилась до состояния «оптически» полированной поверхности. Первоначально поверхности визуально обследовались и в случае необходимости очищались от посторонних примесей. Далее проводилось их обезжиривание в озонобезопасном хладагенте 116 (C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) путем объемного погруже-

ния с последующим высушиванием. После этого проводилось непосредственно эпиламирование.

С интервалом 30 секунд образцы извлекались из раствора и после сушки на воздухе измерялась толщина нанесенной органической пленки на эллипсометрической установке [6], позволяющей с помощью анализа углов отражения свет от чистой поверхности и от поверхности с нанесенным покрытием определить толщину слоя эпилама. Результаты этих измерений приведены на рис. 1.

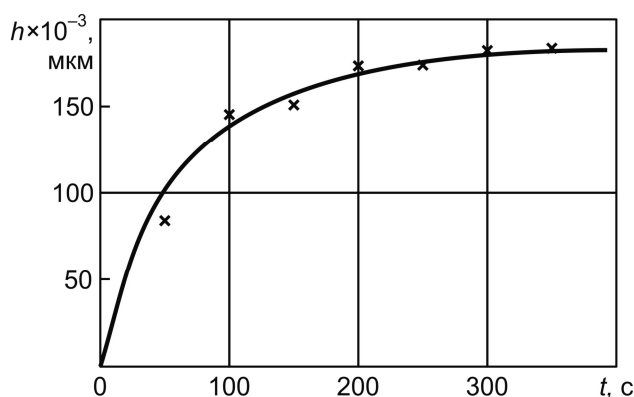


Рис. 1. Зависимость толщины органической пленки  $h$ , образованной на поверхности на стали ШХ15, от времени выдержки образца стали в растворе

Как видно из рис. 1, после 180 с выдержки в растворе толщина адсорбционной органической пленки на подложке стабилизируется и составляет  $h = 0,18 \pm 0,05$  мкм.

Эпиламирование поверхностей способствует образованию на них более прочных граничных смазочных слоев топлива, характеризующихся как повышенной степенью упорядоченности молекул, так и толщиной  $d_s$ , значение которой также определялось с помощью эллипсометрии и приведено на рис. 2 как функция  $d_s = f(h)$ .

Проведенные в научной лаборатории исследования показали, что в пристенных слоях топлива IFO380 удается реализовать создание ориентационно упорядоченного слоя как с гомеотропной, так и с планарной структурой молекул.

Механика взаимодействия эпиламов с поверхностью твердого тела выглядит следующим образом: при эпиламировании формируется слой ориентированных молекул, радикально меняющих энергетические воздействия поверхности твердого тела.

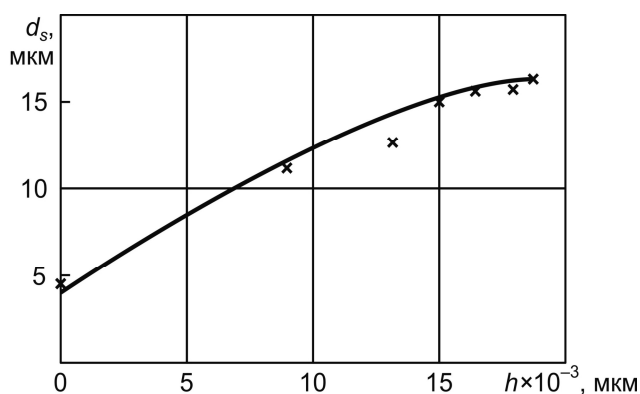


Рис. 2. Зависимость толщины граничного ориентационно-упорядоченного слоя топлива от толщины адсорбционной пленки эпилама

Молекулы, закрепляемые за счет сил хемосорбции, образуют структуры Ленгмюра в виде спиралей с нормально направленными к поверхности материала осями. При покрытии металлических поверхностей (за исключением чистого титана) спиралевидные молекулы в состоянии захватывать электроны в тех местах поверхности, где особо высока электронная плотность, и тем самым «высаживаться» на поверхность. Места с повышенной электронной плотностью образуются на тех участках металлической поверхности, где имеются нарушения кристаллической решетки. Молекулы эпилама вступают во взаимодействие с этими электронами, образуя совместную электронную структуру, что обуславливает особо высокое сцепление эпилама с поверхностью субстрата. Постоянно действуют и другие (более слабые) силы сцепления, например, в виде Вандер-Ваальсовских сил и т.п.

Энергетическая эффективность любой трибологической системы оценивается величиной потерь, к которым относятся: потери энергии на трение (определяемые коэффициентом трения) и потери материала в результате разрушения поверхностей трения (определяемые интенсивностью изнашивания).

Частным видом коррозионного износа является окислительный, представляющий собой процесс образования на поверхности деталей пленки окислов вследствие адсорбции кислорода, растворенного в топливе. В процессе трения окисные пленки разрушаются и создают продукты износа, состоящие из окислов металла. Этот вид износа наблюдается обычно в условиях граничного трения (что характерно для топливной аппаратуры), когда происходит местный контакт поверхностей, сопровождающийся пластической деформацией и насыщением поверхностных слоев металла кислородом, растворенным в топливе. По мере возрастания толщины окисных пленок последние становятся хрупкими и



от внутренних напряжений, а также под действием гидравлических ударов струй топлива, происходит их разрушение, при этом обнажаются нижележащие участки поверхности металла и процесс разрушения повторяется. Применение эпиламирования поверхностей трения топливной аппаратуры высокого давления способствует упрочнению окисных пленок и позволяет снизить вероятность их непосредственного контакта.

С целью подтверждения данного высказывания производилось определение износа поверхностей плунжера ТНВД двух однотипных дизелей S6A2 фирмы Mitsubishi, работающих параллельно или каждый самостоятельно в составе судовой электростанции. Равновеликая нагрузка на дизели позволяла корректно идентифицировать процессы, происходящие в узлах трения их топливной аппаратуры высокого давления, а также делать обоснованные выводы. Технические условия эксплуатации одного из дизелей (который принимался за «экспериментальный»), позволяли произвести замену всех плунжерных пар ТНВД, при этом плунжера этого дизеля подвергались эпиламированию.

Оценка износа поверхности плунжера ТНВД выполнялась путем определения площади пятен видимого износа  $S_{in}$ . Для этого в интервале работы дизелей, позволяющим их кратковременный вывод из эксплуатации и равном 220, 410, 640, 830 и 1060 часов, проводился демонтаж плунжеров из двух крайних топливных насосов (обеспечивающих работу 1-го и 6-го цилиндра). После этого в судовой лаборатории с помощью микроскопических исследований выполнялось определение величины  $S_{in}$ . Динамика износа прецизионной пары плунжер-втулка ТНВД показана на рис. 3.

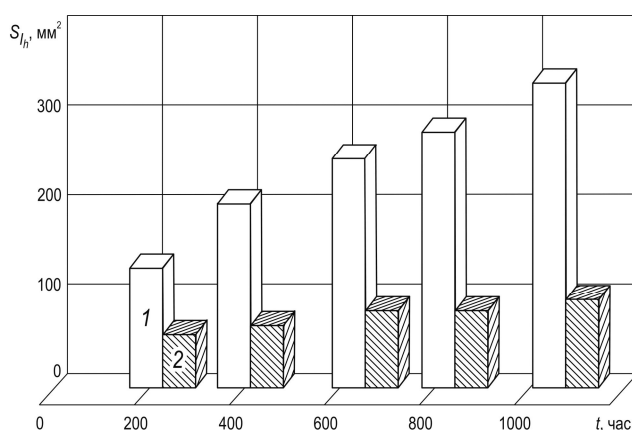


Рис. 3. Изменение износа плунжера ТНВД судового дизеля S6A2 фирмы «Mitsubishi»:

- 1 – обычное состояние плунжера;  
2 – плунжер с эпиламированием поверхности

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Прецизионная пара плунжер-втулка ТНВД является одним из важнейших узлов судового ДВС, обеспечивая не только эффективность, но и надежность его работы. Триботехнические характеристики этой прецизионной пары (в частности обеспечение меньшего линейного износа за установленный промежуток времени) могут быть улучшены путем нанесения на ее поверхность мультимолекулярных слоев органических покрытий. Использование в качестве таких покрытий перфторкислот, относящихся к классу эпиламов, обеспечивает 2,3-3,6 разовое снижение износа в трибосопряжении плунжер-втулка ТНВД.

Время адсорбирования на металлической поверхности мультимолекулярного слоя эпилама лежим в пределах 5,5-6 мин., при этом толщина этого слоя составляет  $0,18 \pm 0,05$  мкм.

Нанесение на поверхность плунжера ТНВД органических покрытий способствует образованию граничного слоя топлива большей (в 3,1-3,3 раза по сравнению с поверхностью плунжера без органического покрытия) толщины. Это обеспечивает повышение как гидравлической плотности в данном узле трения, так и надежности работы всего дизеля.

Процесс эпиламинирования таких поверхностей как плунжер ТНВД может быть выполнен как в береговой лаборатории, так и непосредственно в условиях морского судна.

Эпиламинирование относится к категории современных нанотехнологических методов, требует предварительных исследований по определению оптимальных видов органических покрытий и времени их нанесения на прецизионные поверхности. При этом его использовании на речных и морских судах повышает энергетическую эффективность триботехнических систем ДВС и может учитываться при разработке методики определения параметров судовых энергетических установок [11].

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алтоиз Б.А. Модель организации эпитропной жидкокристаллической фазы / Б.А. Алтоиз, В.Н. Бондарев, Е.А. Шатагина, С.В. Кириян // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84. – Вып. 7. – С. 58-61.
2. Поповский А. Ю. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей / А.Ю. Поповский, С.В. Сагин // Автоматизация судовых технических средств: Научн.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. – Одесса: ОНМА. – С. 74-83.

3. *Zablotsky Yu.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines / Yu.V. Zablotsky, S.V. Sagin // Indian Journal of Science and Technology, Published by Indian Society of Education and Environment, May 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI : 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.*
4. *Заблоцкий Ю.В. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей / Ю.В. Заблоцкий, В.Г. Солодовников // Проблемы техники: Наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 46-56.*
5. *Мацкевич Д.В. Определение смазочной способности дизельных топлив / Д.В. Мацкевич, Ю.В. Заблоцкий // Судовые энергетические установки: Научн.-техн. сб. – 2011. – № 28. – Одесса: ОНМА. – С. 145-153.*
6. *Сагин С.В. Теоретический анализ процессов трения, протекающих в подшипниковых узлах судовых дизелей / С.В. Сагин // Проблемы техники: Наук.-виробн. журнал. – 2014. – № 2. – Одесса: ОНМУ. – С. 49-56.*
7. *Заблоцкий Ю.В. Определение механических нагрузок в парах трения топливной аппаратуры судовых дизелей / Ю.В. Заблоцкий // Проблемы техники: Наук.-виробн. журнал. – 2014. – № 2. – Одесса: ОНМУ. – С. 57-64.*
8. *Кириян С.В. Влияние жидкокристаллической присадки на структурные характеристики приповерхностных ориентационно-упорядоченных слоев вазелинового масла / С.В. Кириян, Б.А. Алтоиз, Е.А. Шатагина // Журнал технической физики, 2013. – Т. 86. – Вып. 2. – С. 371-374.*
9. *Алтоиз Б.А. Эпитропно-жидкокристаллический слой гексадекана в реологической модели гетерофазной прослойки / Б.А. Алтоиз, А.Ф. Бутенко, С.В. Кириян // Журнал технической физики, 2018. – Т. 88. – Вып. 1. – С. 5-9. DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45473.2005*
10. *Сагин С.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей / С.В. Сагин, Ю.В. Заблоцкий // Проблемы техники: Наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса: ОНМУ. – С. 68-81.*

11. Golikov V.A. *A simple technique for identifying vessel model parameters* / V.A. Golikov, V.V. Golikov, Ya. Volyanskaya, O. Mazur, O. Onishchenko // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 4th International Scientific Conference SEA-CONF 2018, Published by IOP Publishing Ltd. – 2018. – Vol. 172. – № 012010. – P. 1-8. – Doi:10.1088/1755-1315/172/1/012010.*

*Стаття надійшла до редакції*

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор кафедри Суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія»  
**А.М. Веретенник**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація Одеського національного морського університету»  
**Р.А. Варбанець**