

УДК 621.892

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.102>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ПРИСАДОК ДЛЯ МОТОРНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОЦЕССОВ ИХ ОБРАБОТКИ И СЕДИМЕНТАЦИИ

А.П. Перекрестов

Астраханский Государственный Технический Университет, г. Астрахань, Россия

А. Саламех

Каспийский институт морского и речного транспорта, г. Астрахань, Россия

Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0949-4652>

В.А. Чанчиков

Астраханский Государственный Технический Университет, г. Астрахань, Россия

И.Н. Гужвенко

Астраханский Государственный Технический Университет, г. Астрахань, Россия

А.Я. Абубакаров

Астраханский Государственный Технический Университет, г. Астрахань, Россия

Аннотация. В статье приводятся исследования зависимости седиментационной стойкости твердой составляющей присадки противоизносного действия для судовых дизельных тронковых двигателей внутреннего сгорания от технологических условий ее изготовления. В качестве твердой составляющей выбран модификатор трения – диселенид молибдена, обладающий оптимальными противоизносными свойствами. Рассматривается процесс седиментации данного вещества, стабилизированного в объеме раствора присадки ненасыщенными кислотами, при различном времени ротационного перемешивания и влиянии последующей обработки приготовленного раствора ультразвуком. Исследуется масса твердой составляющей раствора как выпавшей безвозвратно в осадок за различные периоды времени хранения растворов присадки, подвергшихся ротационному перемешиванию и дополнительной ультразвуковой обработке. Установлено рекомендуемое время хранения рассмотренной противоизносной присадки с 10% содержанием диселенида молибдена.

Ключевые слова: противоизносная присадка, диселенид молибдена, судовой дизельный двигатель, изнашивание, трибологические поверхности, твердая составляющая, седиментация, ротационное перемешивание, ультразвуковая обработка, цилиндропоршневая группа.

Введение

Комплексные присадки для судовых моторных масел, использующихся 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 маслоъемные кольца, а также тронковые поверхности поршней, взаимодействующие с зеркальными поверхностями рабочих цилиндрических втулок. Эти взаимодействующие поверхности («втулка-поршень» или «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 прихода данных поверхностей трения в предельное состояние. Нарушение микрогеометрии рабочих профилей поверхностей деталей ЦПГ, совершающих возвратно-поступательное высо-

кочастотное движение, влечет за собой ухудшение экологических параметров двигателя и рост ряда 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 делятся 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 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 своем 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, а также минеральные серпентиниты, требуется частичная разборка ДВС, что в зависимости от его размеров и конструктивно-технологической сложности исполнения влечет за собой значительные издержки эксплуатации судового дизельного двигателя. Кроме того, на ранней стадии исследования, в 60–70-х годах 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 статических деталей тронковых ЦПГ (220–300°C).

Поэтому для надежной транспортировки таких перспективных твердых основ слоистых модификаторов трения как MoSe_2 (диселенид молибдена) необходимо данные основы оптимально стабилизировать в объеме смазочного масла, использующегося в ДВС. Улучшить распределение твердой основы противоизносной присадки в смазочном моторном масле позволяет введение в состав присадки жидкой стабилизирующей составляющей, замедляющей агломерацию частиц твердой основы на молекулярном уровне и увеличивающей время фактической необратимой седиментации таких частиц в картерную систему смазки.

Количество частиц твердой основы противоизносной присадки, выпавших в осадок или массовая доля твердой основы, безвозвратно отделившейся от жидкого раствора присадки, зависит, прежде всего, от времени ее хранения до использования в объеме смазочного масла. В данной работе проведены исследования зависимости выпадения в осадок твердой составляющей противоизносной присадки на основе диселенида молибдена MoSe_2 в случае хранения присадки в исходном состоянии. Основным выходным показателем экспериментального исследования являлось количество (масса) выпавшей в осадок твердой основы присадки – диселенида молибдена.

1. Постановка задачи исследования

В ходе данного экспериментального исследования основной задачей являлось построение теоретической зависимости выпадения в осадок массы твердой основы противоизносной присадки в зависимости от времени ее хранения. В качестве твердой основы выступает диселенид молибдена MoSe_2 , смешанный в массовом соотношении 10% с раствором стабилизирующих ненасыщенных жирных кислот – олеиновой и стеариновой, смешанных между собой в растворе в пропорции 1/2. Таким образом, противоизносная присадка по своему составу соответствует патентной формуле [9], в которой раскрывается состав противоизносной присадки для судового смазочного масла на основе тугоплавкого диселенида молибдена.

2. Ход исследования

Для решения первой задачи исследования изготавливался раствор диселенида молибдена в объеме жирных ненасыщенных кислот – олеиновой и стеариновой. Соотношение (массовое) основных компонентов раствора приведено в таблице 1. Общий объем жидких компонентов раствора (ненасыщенных кислот) составлял $989,5 \pm 0,05 \text{ см}^3$. В указанный раствор, тщательно перемешанный до однородного состояния и цвета, в течение 10 минут добавлялось до $100 \pm 0,01 \text{ г}$ диселенида молибдена.

Таблица 1

**Массовые и объемные составляющие приготавливаемого раствора
противоизносной присадки**

Наименование компонента	Химическая формула	Массовая доля, %	Масса, г	Объем, см^3	Плотность, кг/м^3
Диселенид молибдена	MoSe_2	10	$100 \pm 0,01$	14,33	698 ± 1
Стеариновая кислота	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	30	$300,05 \pm 0,01$	$319,2 \pm 0,05$	940 ± 1
Олеиновая кислота	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ $(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}-$ $\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COO}$	60	$600,08 \pm 0,03$	$670,4 \pm 0,05$	895 ± 1
Итого		100	$1000,13 \pm 0,05$	$1003,5 \pm 0,05$	995 ± 1

Первичный раствор двух кислот без твердого включения перемешивался за указанное выше время в смесительной камере роторно-пульсационной машины РПУ-0,8-55А-2,2 мощностью приводного двигателя 2,2 кВт [10] при частоте вращения ротора мешалки в пределах 2900 ± 50 об/мин. Ввиду практически одинаковой вязкости олеиновой и стеариновой кислот за указанное время было достигнуто получение однородного жидкого раствора кислот светло-желтого цвета. Плотность раствора составляла $910 \pm 1 \text{ кг/м}^3$ по ареометру АОН-1 (ГОСТ 18481-81), что соответствует теоретической средней плотности между двумя указанными ненасыщенными кислотами. Плотность каждого жидкого компонента первичного раствора, указанная в таблице 1 до смешивания в объеме РПУ-0,8-55А-2,2, измерялась отдельно с помощью аналогичного погружного стеклянного ареометра при помещении объема отдельной ненасыщенной кислоты в стеклянный мерный цилиндр 250 см^3 (Н2 кл. ГОСТ 1770-74). Кроме того, были выполнены ареометрические исследования раствора с 10% массового содержания диселенида молибдена, результирующая плотность такого раствора записана в таблице 1 как итоговая. Незамедлительно без остановки приводного двигателя ротора мешалки, после окончания первичного смешивания раствора кислот в смесительной установке РПУ в ее загрузочный бункер (рисунок 1) добавлялся диселенид молибдена массой $100 \pm 0,01 \text{ г}$. Указанная масса твердой составляющей противоизносной присадки контролировалась до смешивания с раствором кислот взвешиванием на лаборатор-

ных весах A&D HL-100 с точностью до 0,01 г. При взвешивании в качестве тары использовался мерный стакан 400 см³ (из стекла ТС по ГОСТ 25336-82).

После загрузки диселенида молибдена в приемный бункер 3 (рисунок 1) установки РПУ-0,8-55А-2,2 в течении 150 минут приготавливались 5 проб растворов с шагом времени перемешивания в 30 минут.

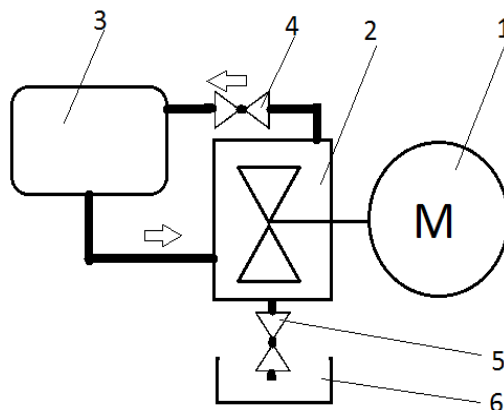


Рис. 1. Схема роторно-рульсационной установки (РПУ) для приготовления раствора и отбора проб растворов (стрелками обозначен путь циркуляции при открытом перепускном кране): 1 – приводной электродвигатель, 2 – смесительная камера с роторной мешалкой, 3 – загрузочный (приемный) бункер, 4 – перепускной кран, 5 – сливной (отборный) кран, 6 – пробоотборник

При перемешивании твердой составляющей присадки в объеме раствора пере-
пускной кран 4 (рисунок 1) между смесительной камерой 2 и бункером 3 в момент
загрузки незамедлительно перекрывался. Таким образом, по завершению 30, 60, 90,
120 и 150 минут перемешивания комплексного раствора противоизносной присадки в
пробоотборник 6 (рисунок 1) путем открытия сливного крана 5 собиралась проба при-
садки в объеме $10 \pm 0,1$ см³. В качестве пробоотборника выступали: стеклянная про-
бирка П-1-10-0,1ХС ГОСТ 1770-74 с печатной градуировкой и стеклянный стакан
ГОСТ 25336-82 объемом 400 см³. Пробирки использовались для сбора пробы для
незамедлительного хранения пяти образцов растворов, стеклянные стаканы для отбо-
ра пяти проб растворов для последующей обработки их ультразвуком частотой 43 кГц
в погружной ванне. Обработка ультразвуком растворов велась в течении последую-
щих 10 ч. Таким образом, создавалось 10 проб растворов, первые пять из которых
были получены ротационным перемешиванием с все возрастающим временем обра-
ботки, а другие пять – аналогичным способом обработки, но дополнительно обраба-
тывались ультразвуком.

Обработка ультразвуком механически перемешанных растворов осуществлялась с
целью проверки влияния подобного вида обработки на седиментационную массу
твердой составляющей противоизносной присадки. Предполагалась, что ультразвуко-
вое колебание механически перемешанного раствора создаст дополнительные усло-
вия для замедления процессов безвозвратной седиментации твердого слоистого мо-
дификатора трения – диселенида молибдена в объеме перемешанных кислот.

При последующем хранении 10 полученных экспериментальных растворов со-
блюдались следующие временные сроки, приведенные в таблице 2.

Предельное время хранения раствора присадки выбиралось исходя из наиболь-
ших возможных сроков похода морского судна без захода в порты с целью пополне-
ния судовых запасов (в том числе и горюче-смазочных материалов). При определении
временных точек проверки безвозвратно отделившейся массы твердой составляющей
противоизносной присадки выбиралась линейная двукратная временная зависимость.

Таблица 2

Сроки хранения растворов противоизносной присадки и проверки массы отделившейся твердой составляющей раствора диселенида молибдена

№ п/п	Срок хранения	
	В часах	В неполных сутках
1	1	1
2	2	
3	4	
4	8	
5	16	
6	32	2
7	64	3
8	128	6
9	256	11
10	512	22

Замер массы твердой основы противоизносной присадки в каждой из контрольных точек времени хранения раствора №1-10 по таблице 2 выполнялся по следующей схеме. Пробоотборные пробирки П-1-10-0,1ХС (ГОСТ 1770-74) под №1 в, каждую из которых изначально сливались первые 5 образцов растворов противоизносной присадки из РПУ (или другие 5 образцов после прохождения 10-часового процесса дополнительной обработки ультразвука) отправлялись на первый срок хранения (1 ч). Объем заливаемого раствора в каждую пробирку составлял $10 \pm 0,1 \text{ см}^3$. Для корректировки объема заполнения использовался микрошприц МШ-10 (по ТУ 5Е2.833.106) с точностью отбора раствора не менее 10 мкл. После прохождения первого срока хранения из пробирки №1 в течение $2 \text{ мин} \pm 10 \text{ сек}$ по схеме, приведенной на рисунке 2, ее содержимое гравитационным способом в исчерпывающем объеме (достижение отрыва менее 1 капли раствора за 5 мин нахождения сливаемой пробирки в вертикально перевернутом виде) сливалось в следующую пробирку – № 2 по таблице 2, которая подвергалась следующему временному сроку хранения в 2 раза превышающему предыдущий.

По окончании каждого из сроков хранения вплоть до достижения суммарного срока – 512 ч с каждой из 10 пробирок выполнялись аналогичные действия. Из пробирки №10 по окончании 512 ч хранения раствора содержимое сливалось в аналогичную пробирку для контрольного взвешивания.

До использования пробирок в процессе хранения растворов они взвешивались как пустая тара. При измерении массы твердого отделившегося безвозвратно осадка диселенида молибдена MoSe_2 использовалось следующее расчетное выражение:

$$m_{\text{ТВ.ОС}} = m_{\text{ИЗМ}} - m_0 \quad (1)$$

где $m_{\text{ТВ.ОС}}$ – масса твердого осадка, безвозвратно отделившегося от раствора, сливавшегося между двумя пробирками, г;

$m_{\text{ИЗМ}}$ – масса, полученная при измерении после освобождения пробирки от раствора (пустая пробирка + твердый отделившийся осадок), г;

m_0 – масса тары (пустой пробирки), г.

Для эксперимента взвешивалось 110 одинаковых пробирок П-1-10-0,1ХС номинальным объемом измерения 10 см^3 , включая 10 заключительных контрольных. Таким образом, каждый из 10 приготовленных растворов противоизносной присадки последовательно переливался гравитационным способом по схеме, приведенной на

рисунке 2 между 10 пробирками для хранения и 1 контрольной пробиркой в конце эксперимента. Контрольная пробирка служила для оценки цветовой составляющей раствора после прохождения всех временных контрольных точек его хранения в течение 512 ч.

Взвешивание всех 10 промежуточных пробирок для хранения раствора на каждом из временных этапов эксперимента выполнялось с помощью лабораторных весов А&D HL-100 с точностью измерения 0,01 г. Взвешивалась опорожненная пробирка на шагах эксперимента №1-10 и наполненная контрольная пробирка после 512 ч хранения раствора.

При расчете массы твердой составляющей выпавшей в осадок использовалось расчетное выражение (1). При расчете теоретической массы твердой составляющей противоизносной присадки, не подвергшейся седиментационным процессам, за полный срок хранения 512 ч выполнялись следующие действия.

Предварительно, до начала цикла проводимых исследований, были проведены вспомогательные замеры плотности раствора противоизносной присадки при различной массовой доле содержания твердой ее основы – диселенида молибдена MoSe_2 . Ряд растворов с массовым содержанием указанного слоистого модификатора трения в диапазоне от 0 до 10%, были приготовлены на машине трения РПУ-0,8-55А-2,2 и был проведен замер плотности данных растворов. Кривая зависимости плотности от содержания твердой составляющей раствора приведена на рисунке 3.

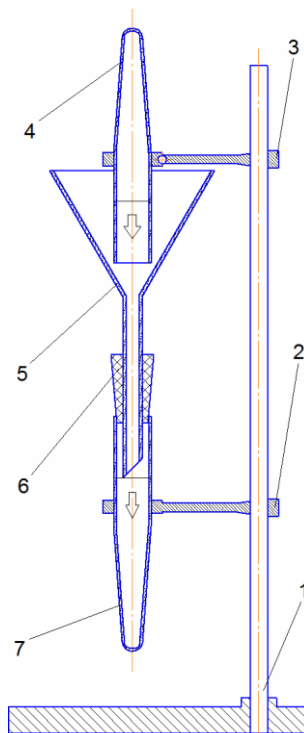


Рис. 2. Схема лабораторной установки для переливания гравитационным способом раствора противоизносной присадки между пробирками (стрелками указано направление движения раствора при переливании): 1 – штатив, 2 – продольно скользящий зажим пробирки, 3 – продольно скользящий шарнирный зажим пробирки, 4 – опорожняемая пробирка, 5 – коническая лабораторная воронка ГОСТ 25336-82, 6 – герметичная резиновая пробка, 7 – наполняемая пробирка

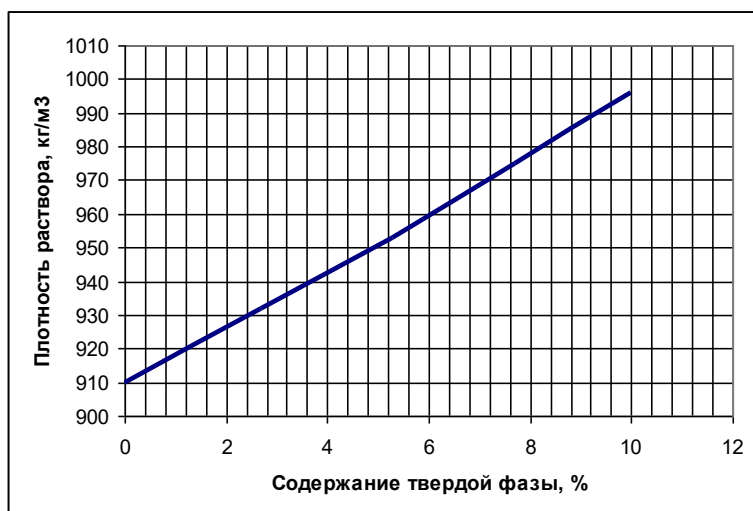


Рис. 3. Эталонная кривая зависимости плотности раствора противоизносной присадки от массового содержания диселенида молибдена

При оценке массы твердой не выпавшей в осадок составляющей раствора проводились действия по расчету плотности каждого из 10 растворов, участвовавших в основном исследовании, получаемых на выходе из проботборного крана установки РПУ. Расчет плотности выполнялся по известному физическому выражению при использовании массы приготовленных растворов:

$$\rho_{p-pa} = (m_{изм} - m_0) \cdot 10^3 / V_{p-pa} \quad (2)$$

где ρ_{p-pa} — плотность раствора изготовленной противоизносной присадки, кг/м³;
 $m_{изм.}$ и m_0 — соответственно массы фактического измерения (масса проботборной пробирки П-1-10-0,1ХС + масса раствора присадки) и пустой пробирки без раствора, г;
 V_{p-pa} — фактический замеренный объем раствора в проботборной пробирке, л.

Объем раствора замерялся с точностью до 0,1 мл, масса фактического измерения имела точность до 0,01 г.

По результатам нахождения плотности до начала хранения растворов противоизносной присадки, возможно используя график на рисунке 3 определить примерное массовое содержание диселенида молибдена $MoSe_2$ в приготовленном растворе. Массовое содержание данного слоистого модификатора трения характеризует, в свою очередь, его теоретическую массу в приготовленном растворе. Соответственно при вычитании из начальной массы твердой составляющей раствора, фактически измеренную массу $MoSe_2$ в последней из партии из 10 пробирок для каждого образца раствора, возможно было найти теоретическую массу не выпавшей в осадок части твердой составляющей раствора:

$$m_{HC} = m_{теор} - m_{OC} \quad (3)$$

где m_{HC} и m_{OC} — соответственно теоретическая не выпавшая в осадок и фактическая безвозвратно осажденная масса твердой составляющей раствора противоизносной присадки, г;
 $m_{теор.}$ — теоретическая масса содержания твердой составляющей присадки в приготовленном к хранению растворе, г.

Таким образом, по истечению суммарного времени хранения для каждого раствора в объеме 512 ч определялись следующие результаты исследования:

- фактическая масса безвозвратно отделившейся (выпавшей в необратимый осадок) твердой составляющей раствора противоизносной присадки;
- теоретическая масса не выпавшей в осадок (продолжающей присутствовать в взвешенном состоянии в растворе) твердой составляющей;
- конечный цветовой оттенок раствора в контрольной пробирке.

3. Результаты исследования

Основные результаты исследования представлены на рисунках 4-6, а также в таблицах 3–4.

В таблице 3 представлены расчетные данные и результаты исследования по вычислениям (2) и (3). Это рассчитанная по (2) плотность 10 образцов приготовленных растворов противоизносной присадки [9], соответствующая ей теоретическая масса твердой составляющей раствора – диселенида молибдена, определенная по кривой на рисунке 3.

Таблица 3

Результаты исследования начальной плотности приготавливаемых растворов и расчета массовых показателей MoSe_2

Вид обработки раствора	Начальная плотность, кг/м ³	Начальная масса MoSe_2 , г	Конечная (не выпавшая в осадок) масса MoSe_2 , г	Осадок (после 512 ч хранения) MoSe_2 , г
Перемешивание				
150 мин	996	1	0,54	0,46
120 мин	995	0,99	0,45	0,54
90 мин	994	0,98	0,28	0,7
60 мин	993	0,97	0,17	0,8
30 мин	992	0,96	0,05	0,91
Ультразвук	Начальная плотность, кг/м ³	Начальная масса MoSe_2 , г	Конечная (не выпавшая в осадок) масса MoSe_2 , г	Осадок MoSe_2 , г
150 мин	995	0,99	0,58	0,41
120 мин	994	0,98	0,49	0,49
90 мин	993	0,97	0,36	0,61
60 мин	992	0,96	0,26	0,7
30 мин	991	0,95	0,09	0,86

Также в таблице 3 приведены конечная масса твердой составляющей раствора после 512 ч его хранения и масса диселенида молибдена, оставшаяся в растворе присадки после данного срока его выдержки в осаждаемом состоянии, рассчитанная по (3). На рисунке 4 приведены кривые зависимости параметра плотности полученных после приготовления растворов от времени их приготовления (для случая ротационного механического перемешивания и для случая дополнительной ультразвуковой обработки).

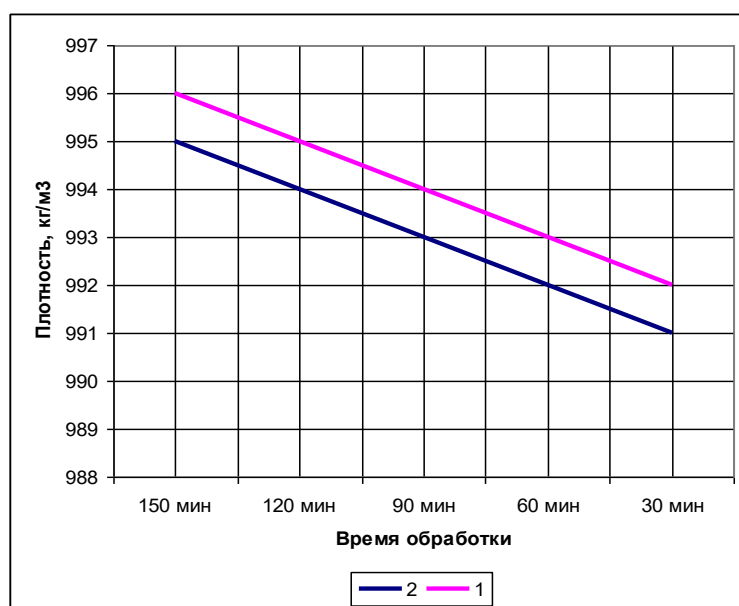


Рис. 4. Графическая зависимость параметра плотности приготовленных растворов при различном времени их начального механического перемешивания: 1 – обработка ротационным перемешиванием, 2 – дополнительная обработка ультразвуком.

В таблице 4 приведены результаты измерения остаточной массы твердой составляющей раствора на каждой временной точке его хранения.

Таблица 4

**Распределение выпавшей в осадок массы твердой составляющей
приготовленных растворов, г**

№ этапа и время хранения при виде обработки раствора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Итого
Перемешивание	1 ч	2 ч	4 ч	8 ч	16 ч	32 ч	64 ч	128 ч	256 ч	512 ч	
150 мин	0,06	0,05	0,05	0,08	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,01	0,46
120 мин	0,06	0,06	0,06	0,09	0,05	0,06	0,04	0,06	0,05	0,01	0,54
90 мин	0,1	0,07	0,07	0,1	0,06	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,7
60 мин	0,12	0,08	0,07	0,11	0,06	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,8
30 мин	0,13	0,1	0,11	0,11	0,06	0,08	0,1	0,08	0,08	0,06	0,91
Ультразвук	1 ч	2 ч	4 ч	8 ч	16 ч	32 ч	64 ч	128 ч	256 ч	512 ч	
150 мин	0,05	0,06	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,03	0,04	0,01	0,41
120 мин	0,06	0,07	0,05	0,05	0,04	0,08	0,05	0,03	0,05	0,01	0,49
90 мин	0,07	0,08	0,06	0,09	0,05	0,09	0,06	0,04	0,05	0,02	0,61
60 мин	0,08	0,09	0,08	0,1	0,06	0,09	0,07	0,04	0,05	0,04	0,7
30 мин	0,09	0,13	0,11	0,1	0,06	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,86

Эта масса равна разнице измеренной суммарной массы пробирки с твердым остатком раствора после его гравитационного слива и массы собственно пробоотборной пробирки как тары по (1). Результаты измерений данного массового показателя приводятся для всех 10 образцов растворов как в случае механического перемешивания, так и в случае дополняющей его ультразвуковой обработки. На рисунках 5 и 6 приводится графический вид данных показателей для каждой временной точки хранения.

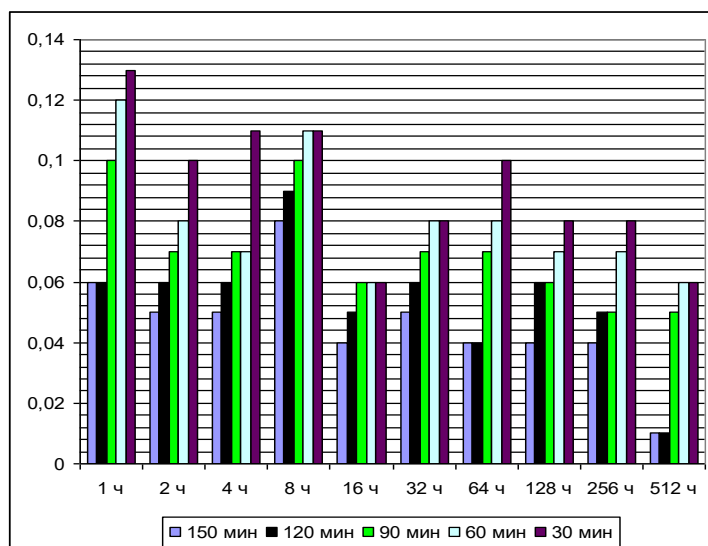


Рис. 5. Графическая зависимость распределения массы, г выпавшей в осадок твердой составляющей раствора противоизносной присадки при ротационном механическом перемешивании

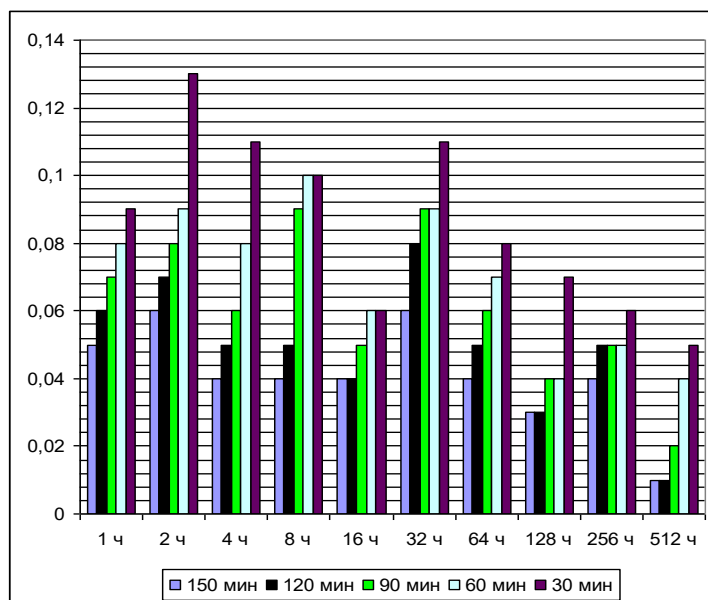


Рис. 6. Графическая зависимость распределения массы, г выпавшей в осадок твердой составляющей раствора противоизносной присадки при дополнительной ультразвуковой обработке.

Выводы по результатам исследования

1. Твердая составляющая раствора противоизносной присадки по [9] имеет ярко выраженный гравитационный механизм выпадения в осадок. Показатель массы твердого слоистого модификатора трения, представленного диселенидом молибдена MoSe_2 , и неизбежно выпадающая в осадок при хранении, стремится к уменьшению при увеличении времени ротационного перемешивания, а дополнительная ультразвуковая обработка оказывает благоприятное действие на замедление седиментационных процессов твердой составляющей.

2. При оценке эффективности обработки увеличением времени ротационного механического перемешивания раствора выявляется замедление процессов седиментации твердой составляющей в 1,98 раз при сравнении общей осадочной массы для 150 и 30 минут перемешивания и, в среднем в 1,19 раз между отдельными временными этапами обработки. Для растворов присадки, подверженных дополнительной ультразвуковой обработке, замедление седиментации твердой составляющей увеличивается в 2,10 раз для сравнения наибольших временных шагов изначального механического перемешивания и, в среднем, 1,21 раз между отдельными временными этапами механической обработки.

3. Седиментационные процессы для твердой составляющей раствора противоизносной присадки замедляются в, среднем, в 1,14 раз при сравнении временных интервалов механической обработки для ротационного перемешивания и дополнительной ультразвуковой обработки.

4. Долевая составляющая общей массы твердой составляющей, выпавшей в осадок для случаев механического перемешивания и ультразвуковой обработки существенно различается по времени хранения приготовленных растворов противоизносной присадки. Так, для механического перемешивания раствора до 50–60% массы диселенида молибдена выпадает в осадок уже после 16 часов хранения растворов. При этом увеличение времени перемешивания в 3–5 раз по сравнению с минимальным 30 минутным интервалом ротационной обработки вызывает ускорение осаждения массы твердой составляющей раствора. Для дополнительной ультразвуковой обработки, напротив, увеличение времени начального механического перемешивания замедляет седиментационные процессы между точками хранения, а 50–60% массы диселенида молибдена безвозвратно выпадает в осадок между 16 и 32 часами хранения.

5. Плотность приготовленных растворов практически не изменяется на момент извлечения их из ротационной установки по сравнению с начальной плотностью раствора противоизносной присадки с массовым содержанием 10% диселенида молибдена. Максимальное расхождение показателя плотности согласно графикам на рисунке 4 составляет $4\text{--}5 \text{ кг/м}^3$ и несколько зависит от времени начальной механической обработки раствора. Также ультразвуковая обработка несколько снижает плотность раствора.

6. Ультразвуковая обработка позволяет увеличить количество не выпадающей в осадок твердой составляющей раствора противоизносной присадки по сравнению с исключительно механической обработкой ротационным способом. Так, в случае ротационного перемешивания расхождение между долей теоретической массы диселенида молибдена, оставшимся в растворе составляет 4,8–54% в зависимости от временного интервала начального перемешивания, а тот же показатель для дополнительной ультразвуковой подготовки составляет 9,0–58,5%.

7. Цветовой оттенок между растворами присадки на момент их приготовления не отличался существенно и соответствовал насыщенному черному цвету. Это свидетельствует о поглощении значительной доли твердой составляющей – диселенида молибдена. Однако после 32–64 ч хранения растворов проявилась начала проявляться осветленная фаза, примерно на половине столба раствора жидкости, находившегося в пробирке. При хранении 512 ч значительная часть раствора (более 3/4 столба жидко-

сти в пробирке) значительно осветлилась, но не достигла исходного светло-желтого цвета, который соответствует смешанному раствору стеариновой и олеиновой насыщенных кислот в их массовом соотношении согласно [9]. Цвет раствора после 512 ч хранения соответствовал светло-серому, что говорит о расслоении основной гидрофазы раствора от большей части твердой составляющей, укрупнении в размерах ранее измельченных частиц диселенида молибдена и ускорении седиментационных процессов в растворе присадки.

8. Замедление и снижение доли седиментационных процессов, относящихся в растворе противоизносной присадки к твердой составляющей для ультразвуковой обработки возможно объяснить более интенсивным и эффективным измельчением пластичных частиц диселенида молибдена MoSe_2 под действием ультразвука средних частот.

9. Замедление седиментационных процессов для твердой составляющей при хранении присадки при возрастающем времени ротационной обработки перемешиванием раствора возможно объяснить более тщательным измельчением частиц диселенида молибдена, совершающих значительно большее число вращательных движений относительно оси ротора смесительной установки РПУ и закручивающихся движений вокруг своей собственной молекулярной оси.

10. Выбранные режимы ротационной обработки растворов противоизносной присадки с помощью установки РПУ-0,8-55А-2,2, такие, как частота вращения смесительного ротора, отсутствие циркуляции в напорном контуре установки и время начальной обработки измельчением – вполне удовлетворяют требованиям к сохранению противоизносной присадки в состоянии полной готовности к применению в картерных системах смазки судовых тронковых двигателей. Однако рекомендованное время ротационного перемешивания раствора присадки по [9] должно составлять не менее 90–150 минут, а единовременная разовая загрузка компонентов раствора не должна превышать 1 кг массы. Несоблюдение этих показателей может отразиться на снижении времени сохраняемости присадки.

11. Рекомендуемое время хранения рассмотренной противоизносной присадки с 10% содержанием диселенида молибдена составляет 16–32 ч, после чего раствор необходимо вторично перемешивать. Однако даже после 12–22 суток судового автономного похода большая часть твердой составляющей раствора присадки (особенно в случае дополнительной ультразвуковой обработки) успешно остается во взвешенном состоянии и способно транспортироваться к смазываемым поверхностям трения судового двигателя, повышая эффективность защиты трибологических поверхностей.

Список литературы:

1. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета, испытаний / С.В. Путинцев // М.: МГТУ им. Н. Баумана, 2011. – 288 с.
2. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения / Б.Д. Воронков // Л.: Машиностроение, 1968. – 140 с.
3. Кулиев А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам / А.М. Кулиев // Л.: Химия, 1985. – 312 с.
4. Долгополов К.Н. Структура смазочных слоев, формирующихся при трении в присутствии присадок минеральных модификаторов трения / К.Н. Долгополов, Д.Н. Любимов, А.Г. Пономаренко, Г.Г. Чигаренко, М.В. Бойко // Трение и износ. – 2009. – Т. 30. – №5. – С. 516–521.
5. Марченко Е.А. О механизме изнашивания диселенида молибдена / Е.А. Марченко // Трение и износ. – 2000. – Т. 21. – №4. – С. 438–443.
6. Лобова Т.А. Взаимодействие поверхностей трения со смазочными материалами типа 2H-MoS_2 / Т.А. Лобова, Е.А. Марченко // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – №4. – С. 391–398.
7. Марченко Е.А. Использование диселенидов тугоплавких металлов для обеспечения стабильности работы узлов трения / Е.А. Марченко, Т.А. Лобова // Вестник научно-технического развития. – 2009. – № 5(21). – С. 16–21.

8. Ващенко А.В. Серпентиниты в триботехнике / А.В. Ващенко, В.В. Казарезов, И.В. Таловина, В.В. Костенко // Аналитические идеи, методы, технологии. – 2002. – №1. – С. 43–50.
9. Пат. 2570643 Российская Федерация, МПК C10M 169/04, C10M 125/22 / Противоизносная присадка. А.П. Перекрестов, Ю.Н. Дроздов, В.А. Чанчиков, И.Н. Гужвенко, С.А. Свекольников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «АГТУ» – заявл. 22.07.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34. – 5 с.
10. Гужвенко И.Н. Исследование влияния дисперсности слоистых модификаторов трения на противоизносные свойства смазочных материалов / И.Н. Гужвенко, В.А. Чанчиков, А.П. Перекрестов, С.А. Свекольников, О.В. Бурмистрова // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18. – №1(2). – С. 187–192.

A STUDY ON OPERATIONAL PROPERTIES OF ANTI-WEAR ADDITIVES FOR MOTOR LUBRICATING OILS DEPENDING ON THEIR PROCESSING AND SEDIMENTATION

Arshavir P. Perekrstov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Salamekh Ali

Caspian Institute of Sea and River Transport, Astrakhan, Russia

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0949-4652>

Vasiliy A. Chanchikov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Ivan N. Guzhvenko

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abdullahi I. Abubakarov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract. The article presents studies on the dependence of sedimentation resistance of the anti-wear additive solid component for marine diesel trunk-type internal combustion engines on the technological conditions of its manufacturing. A friction modifier, molybdenum diselenide, which has optimal anti-wear properties, was selected as a solid component. The authors consider the process of sedimentation of a given substance, stabilized in the volume of an additive solution with unsaturated acids, at different times of rotary stirring, and under the influence of subsequent treatment of the prepared solution with ultrasound. The mass of the solution solid component is studied as irretrievably precipitated over various periods of storage time of the additive solutions, subjected to rotary stirring and additional ultrasonic treatment. The recommended storage time of the considered anti-wear additive with a 10% content of molybdenum diselenide has been established.

Keywords: anti-wear additive, molybdenum diselenide, marine diesel engine, wear, tribological surfaces, solid component, sedimentation, rotary stirring, ultrasonic treatment, cylinder and piston group.

References:

1. Putintsev S.V. Mechanical losses in piston engines: special chapters of design, calculation, testing / S.V. Putintsev // M.: MSTU im. N. Bauman, 2011. – 288 p.
2. Voronkov B.D. Dry friction bearings / B.D. Voronkov // L.: Mechanical engineering, 1968. – 140 p.
3. Kuliev A.M. Chemistry and technology of additives for oils and fuels. – 2nd ed., Rev. – L.: Chemistry, 1985. – 312 p.
4. Dolgoplov K.N. The structure of lubricating layers formed during friction in the presence of additives of mineral friction modifiers / K.N. Dolgoplov, D.N. Lyubimov, A.G. Ponomarenko, G.G. Chigarev, M.V. Boyko // Friction and Wear. – 2009. – Т. 30. – No. 5. – P. 516–521.
5. Marchenko E.A. About the wear mechanism of molybdenum diselenide / E.A. Marchenko // Friction and Wear. – 2000. – Т. 21. – No. 4. – P. 438–443.

6. Lobova, T.A. Interaction of friction surfaces with lubricants of the 2H-MoS₂ type / T.A. Lobova, E.A. Marchenko // *Friction and Wear*. – 2008. – Т. 29. – No. 4. – P. 391–398.
7. Marchenko E.A. The use of diselenides of refractory metals to ensure the stability of the friction units. Marchenko, T.A. Lobova // *Bulletin of scientific and technical development*. – 2009. – No. 5 (21). – P. 16–21.
8. Vashenok A.V. Serpentinities in tribotechnics / A.V. Vaschenok, V.V. Kazarezov, I.V. Talovina, V.V. Kostenko // *Analytical ideas, methods, technologies*. – 2002. – No. 1. – P. 43–50.
9. Pat. 2570643 Russian Federation, MPK S10M 169/04, S10M 125/22 / Antiwear additive. A.P. Perekrstov, Yu.N. Drozdov, V.A. Chanchikov, I.N. Guzhvenko, S.A. Beetroot; applicant and patentee FGBOU VPO «AGTU» – app. 07.22.2014; publ. 10.12.2015, Bul. No. 34. – 5 p.
10. Guzhvenko I.N. Investigation of the influence of the dispersity of layered friction modifiers on antiwear properties of lubricants / I.N. Guzhvenko, V.A. Chanchikov, A.P. Perekrstov, S.A. Bekolnikov, O.V. Burmistrova // *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2016. – Т. 18. – No. 1 (2). – P. 187–192.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Перекрестов Аршавир Петрович, к.т.н., доцент, профессор кафедры «Механика и инженерная графика» Астраханского государственного технического университета (ФГБОУ ВО «АГТУ») 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16 pap1943@rambler.ru

Саламех Али, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники» Астраханского государственного технического университета (ФГБОУ ВО «АГТУ») 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16 a.salameh@mail.ru

Чанчиков Василий Александрович, к.т.н., преподаватель ФСПО Астраханского государственного технического университета (ФГБОУ ВО «АГТУ») 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16 bazelius87@mail.ru

Гужвенко Иван Николаевич, ассистент кафедры «Техника и технологии наземного транспорта» Астраханского государственного технического университета (ФГБОУ ВО «АГТУ») 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16 ivan.3124@yandex.ru

Абубакаров Абдуллахи Ярогиевич, к.п.н., доцент кафедры «Техника и технологии наземного транспорта» Астраханского государственного технического университета (ФГБОУ ВО «АГТУ») 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16 nice.natali92@mail.ru

Arshavir P. Perekrstov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Astrakhan State Technical University 16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056

Ali Salameh, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of "Shipbuilding and energy complexes of marine technologies", Astrakhan State Technical University 16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056

Vasiliy A. Chanchikov, Candidate of Technical Sciences, teacher of the FSPE of the Astrakhan State Technical University 16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056

Ivan N. Guzhvenko, Assistant of the Department of Engineering and Technology of Land Transport, Astrakhan State Technical University 16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056

Abdullahi Y. Abubakarov, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering and Technologies of Land Transport, Astrakhan State Technical University 16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056

Статья поступила в редакцию 28.07.2020 г.