

Сагин Сергей Викторович<sup>1</sup>, Столярик Тимур Александрович<sup>2</sup>  
НУ «Одесская морская академия», Одесса, Украина  
saginsergii@gmail.com<sup>1</sup>, tymir@gmail.com<sup>2</sup>

## Динамика судовых дизелей при использовании моторных масел с различными структурными характеристиками

Sagin Sergii<sup>1</sup>, Stoliaryk Tymur<sup>2</sup>  
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine  
saginsergii@gmail.com<sup>1</sup>, tymir@gmail.com<sup>2</sup>

### Dynamics of marine diesel engines using lube oils with different structural characteristics

*Аннотация – Рассмотрено влияние структурных характеристик моторного масла на динамику судового дизеля. Указано, что граничные смазочные слои моторного масла, разделяющие контактные поверхности судовых дизелей, приобретают свойства жидких кристаллов. За основные структурные характеристики таких слоев приняты степень упорядоченности молекул и толщина. Экспериментально подтверждено, что при их увеличении в случае изменения нагрузки снижается заброс частоты вращения дизеля и время его выхода на установившийся режим работы.*

*Abstract – The influence of the structural characteristics of engine oil on the dynamics of a marine diesel engine is considered. It is indicated that the boundary lubricating layers of engine oil separating the contact surfaces of marine diesel engines acquire the properties of liquid crystals. The degree of molecular ordering and thickness are taken as the main structural characteristics of such layers. It has been experimentally confirmed that with their increase in cases of load change, the overshoot of the diesel engine speed and the time of its reaching the steady-state operating mode are reduced.*

DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119

Дизели являются самыми распространенными тепловыми двигателями, использующимися на морском и речном транспорте, и обеспечивают как движение судна, так и работу судового вспомогательного оборудования [1, 2]. Одной из систем, которые поддерживают функционирование судового дизеля, является масляная система. В ее задачи входит создание и поддержание тонкого смазочного слоя, разделяющего поверхности трения и предотвращающего их непосредственные контакты. Смазочные слои, находящиеся в микронной близости от металлической поверхности, приобретают свойства жидких кристаллов. Такие слои имеют ярко выраженную границу, в пределах которой возникает ориентационная упорядоченность молекул, способствующая возникновению дополнительного расклинивающего давления между контактными поверхностями. В качестве параметров, качественно и количественно характеризующих структуру граничных смазочных слоев, принимают степень ориентационной упорядоченности молекул граничного слоя  $S$  и толщину слоя  $d_S$  [3, 4].

Судовые дизели работают на самых разнообразных режимах – от холостого хода до максимально допустимой нагрузки, а также на режимах временной перегрузки. При этом самыми ответственными с точки зрения динамической и тепловой нагрузки являются режимы пуска и изменения отбора мощности [5]. В этих условиях скачкообразно изменяются силы, действующие на кривошипно-шатунный механизм, что приводит к увеличению контактных взаимодействий в парах трения вал – вкладыш и поршневые кольца – втулка цилиндра [6]. Кроме того, при этом изменяются динамические характеристики работы дизеля, в частности заброс частоты вращения и время выхода на новый установившийся режим [7].

Задачей исследования являлось определение влияния структурных характеристик моторных масел, применяемых в системах смазывания судовых двигателей внутреннего сгорания, на динамику работы дизеля.

Определение структурных характеристик граничных смазочных слоев возможно с помощью оптических методов (например, двойного лучепреломления, дихроизма поглощения примесных молекул, эллипсометрии). Одним из основных методов получения информации об особенностях ориентационной упорядоченности органических жидкостей в тонких слоях является анализ зависимости формы их спектров поглощения от толщины [8]. Отличие от нуля ориентационного параметра порядка  $S$  в диапазоне толщины граничного смазочного слоя  $d_S$  приводит к анизотропии оптических

характеристик, в частности коэффициента преломления света, проходящего через изотропную (объемную) фазу и граничный смазочный слой. Это дает возможность экспериментально получить зависимость интенсивности света от толщины смазочного слоя и далее аналитически определить значения параметра порядка  $S$  и толщины граничного смазочного слоя  $d_s$  [9]. Схема оптической установки, позволяющей определить характеристики граничного слоя, показана на рис. 1.

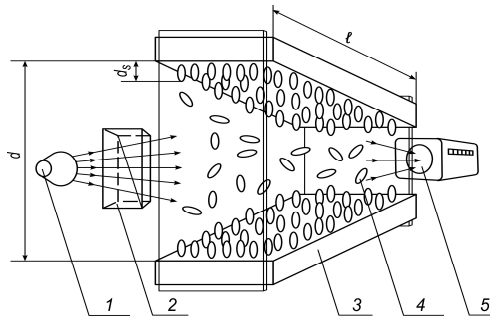


Рис. 1. Схема установки для исследования структурных характеристик моторных масел: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – боковые поверхности световода; 4 – моторное масло; 5 – фотоэлектрическое устройство

Источник 1 обеспечивал подачу пучка монохроматического света через поляризатор 2 и световод 3 (заполненный исследуемым моторным маслом 4) к фотоэлектрическому устройству 5, с помощью которого фиксировалась интенсивность света. Боковые поверхности световода выполнялись из стали ШХ-15 и отполировывались по высокому классу точности. Ширина световода  $d$  изменялась в пределах 8 ... 30 мкм с помощью микрометрического устройства и контролировалась с помощью микроскопа. Боковые поверхности световода закрывались плоскими стеклянными пластинами, что устраняло менисковые эффекты в оптической системе. Перед экспериментом эти пластины последовательно промывались в горячей хромовой кислоте, дистиллированной воде и высушивались. Металлические поверхности световода для исключения искажения получаемой информации предварительно очищались парами эфира и пылью активированного угля [3, 4].

Исследования проводились для судовых моторных масел Shell Rimula X15 и Castrol TPL 123, которые использовались в системе циркуляционного смазывания судового дизеля CatC18. Оба сорта моторных масел рекомендуются фирмой Caterpillar для эксплуатации дизелей CatC18. Основные характеристики моторных масел приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Основные характеристики моторных масел, используемых при проведении эксперимента

Параметр, размерность	Характеристика масла	
	Shell Rimula X15	Castrol TPL 123
Класс SAE	30	30
Плотность при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	916	920
Кинематическая вязкость при 40 °С, сСт	119	116
Кинематическая вязкость при 100 °С, сСт	11,5 ... 12,5	11,0 ... 12,0
Температура вспышки, °С	214	210
Температура застывания, °С	-14	-12
Щелочное число, мгКОН/г	13,0 ... 15,0	11,5 ... 13,0

В результате оптических исследований для каждого сорта моторного масла были определены структурные характеристики – параметр порядка  $S$  и толщина граничного смазочного слоя  $d_s$  (табл. 2).

Таблица 2  
Структурные характеристики моторных масел

Марка масла	Параметр порядка, $S$	Толщина слоя, $d_s$ , мкм
Shell Rimula X15	0,56 ... 0,58	14,3 ... 14,7
Castrol TPL 123	0,63 ... 0,64	16,4 ... 16,6

Результаты, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что моторное масло Castrol TPL 123 характеризуется большей упорядоченностью молекул в граничном смазочном слое и толщиной граничного слоя по сравнению с моторным маслом Shell Rimula X15.

Параллельно с оптическими исследованиями по определению характеристик граничных смазочных слоев, проводились эксперименты на судовых дизелях CatC18, эксплуатация которых выполнялась с использованием моторных масел Shell Rimula X15 и Castrol TPL 123.

В состав судовой энергетической установки входило два названных дизеля, каждый из которых был оборудован автономной смазочной системой, что позволяло использовать в них различные моторные масла (для одного – Shell Rimula X15, для второго – Castrol TPL 123). Дизели перед началом эксперимента имели соразмерный период эксплуатации, одинаковый техническое состояние основных контактных узлов (коленчатого вала, вкладышей подшипников, топливной аппаратуры), эксплуатировались на одинаковых нагрузках (с несогласованностью не более  $\pm 2,5\%$ ) и одинаковом сорте топлива. В системе охлаждения дизелей поддерживались одинаковые температурные режимы. Это позволяло сделать вывод об их идентичности друг другу как перед началом эксперимента, так и во время его проведения.

В качестве характеристик, по которым оценивалась динамика работы дизелей при использовании моторных масел с различными структурными характеристиками (степенью упорядоченности молекул и толщиной граничного слоя), принимались заброс частоты вращения и время выхода дизеля на новый установившийся режим работы при изменении нагрузки. Измерения частоты вращения  $\omega$  выполнялось с помощью электронного тахометра (установленного на блоке управления дизелем), который дополнительно соединялся с портативным осциллографом. Измерения выполнялись для пускового режима (как наиболее динамично нагруженного) и для различных режимов изменения нагрузки [10]. Зависимости  $\omega=f(\tau)$ , где  $\tau$  – время работы дизеля, с, для пускового режима дизелей CatC18 приведено на рис. 2.

Результаты, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о том, что увеличение структурной упорядоченности граничного смазочного слоя способствует уменьшению заброса частоты вращения  $\Delta\omega$  при пуске дизеля и снижению времени  $\tau$  выхода дизеля на установившийся режим работы.

Аналогичные исследования выполнялись при изменении нагрузки на дизеля [11, 12]. Технология проведения эксперимента состояла в следующем. Дизель работал на установившемся режиме, соответствующем 50 % нагрузки. За счет переключения групп потребителей выполнялось ступенчатое увеличение нагрузки на

дизель и контроль необходимых показателей. На новом режиме дизель эксплуатировался в течении 20 ... 30 мин, после чего выполнялось ступенчатое снижение нагрузки с аналогичным контролем показателей его работы. Далее цикл исследований повторялся для другого изменения нагрузки. Значения заброса частоты вращения  $\Delta\omega$  и времени выхода на установившийся режим  $\tau$  при разных условиях проведения эксперимента приведены в табл. 3.

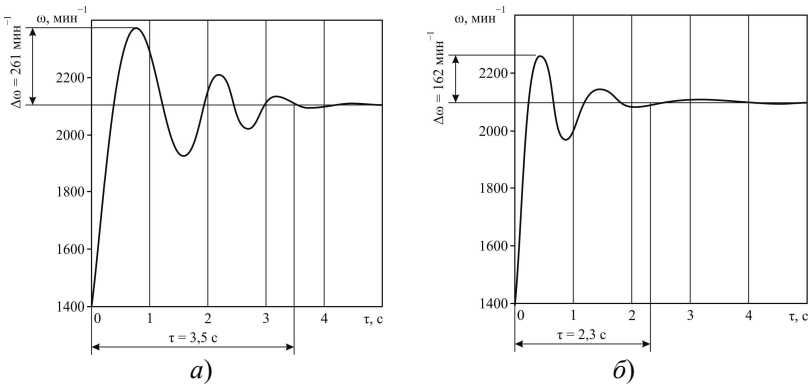


Рис. 2. Изменение частоты вращения судового дизеля CatC18 при пусковом режиме: а – использование моторного масла Shell Rimula X15; б – использование моторного масла Castrol TPL 123

Таблица 3

Результаты эксперимента

Марка моторного масла	Заброс частоты вращения, $\Delta\omega$ , мин <sup>-1</sup>				Время выхода на установившийся режим, $\tau$ , с			
	увеличение нагрузки на 20 %	уменьшение нагрузки на 20 %	увеличение нагрузки на 30 %	уменьшение нагрузки на 30 %	увеличение нагрузки на 20 %	уменьшение нагрузки на 20 %	увеличение нагрузки на 30 %	уменьшение нагрузки на 30 %
Shell Rimula X15	147	142	164	162	2,6	2,7	2,8	2,8
Castrol TPL 123	128	127	136	132	1,8	1,7	1,9	1,8

Номограммы, отображающие изменение динамических характеристик дизеля CatC18 при его эксплуатации на различных моторных маслах, приведены на рис. 3.

Все эксперименты, проведенные в судовых условиях, были согласованы с техническим департаментом судоходной компании [13], выполнялись квалифицированными судовыми механиками [14], не снижали надежность работы судовой энергетической установки [15] и не влияли на безопасность морского судоходства [16].

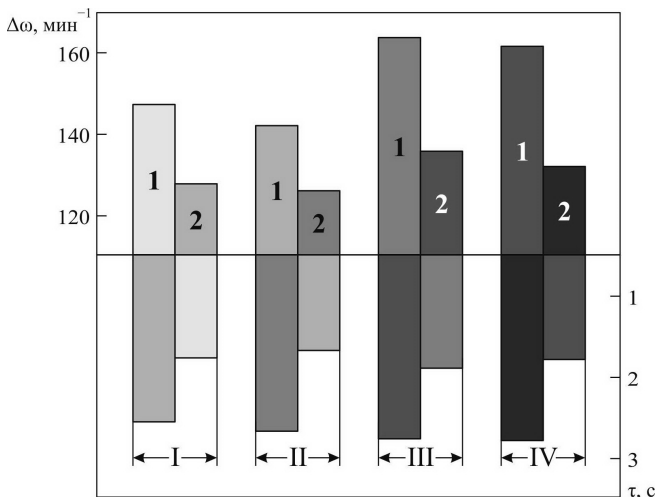


Рис. 3. Заброс частоты вращения,  $\Delta\omega$ , об/мин, и время выхода на установившийся режим,  $\tau$ , с, судового дизеля CatC18: 1 – использование моторного масла Shell Rimula X15; 2 – использование моторного масла Castrol TPL 123; I – увеличение нагрузки на 20 %; II – уменьшение нагрузки на 20 %; III – увеличение нагрузки на 30 %; IV – уменьшение нагрузки на 30 %

Проведенные исследования позволяют сделать следующие *выводы*.

Микронные слои судовых моторных масел приобретают свойства жидких кристаллов и характеризуются упорядоченной структурой молекул. Качественным показателем этой структуры является степень упорядоченности молекул, количественным – толщина упорядоченного (граничного) смазочного слоя.

Определение структурных характеристик судовых моторных масел (степени упорядоченности молекул граничного слоя и его толщины) возможно с помощью оптического метода дихроизма поглощения.

Для моторных масел Shell Rimula X15 и Castrol TPL 123 (использующихся в масляной системе судового дизеля CatC18 фирмы Caterpillar) толщина упорядоченного (граничного) смазочного слоя составляет 14,3 ... 14,7 мкм и 16,4 ... 16,6 мкм соответственно. Степень упорядоченности молекул в граничном слое для моторного масла Shell Rimula X15 находится в диапазоне 0,56 ... 0,58, для моторного масла Castrol TPL 123 – в диапазоне 0,63 ... 0,64.

Моторное масло Castrol TPL 123, имеющее большую структурную упорядоченность молекул в граничном слое по сравнению с маслом Shell Rimula X15, обеспечивает протекание переходных процессов судового дизеля CatC18 с меньшим забросом частоты вращения и меньшим временем выхода на новый установившийся режим работы. Это обусловлено тем, что с увеличением структурных характеристик граничных слоев моторных масел возрастают их упруго демпфирующие свойства и повышается динамическая устойчивость коленчатого вала дизеля.

Предложенная технология определения структурных характеристик моторных масел может быть использована для любых типов и сортов масла (минеральных либо синтетических, высокой и низкой вязкости, используемых как в системах циркуляционного, так и цилиндрического смазывания).

Предложенный метод оценки динамических характеристик судовых дизелей (по забросу частоты вращения и времени выхода на установившийся режим работы в случае изменения нагрузки) может использоваться для любых типов двигателей внутреннего сгорания (мало-, средне- и высокооборотных; а также выполняющих функции как главных, так и вспомогательных двигателей).

#### ЛИТЕРАТУРА REFERENCE

1. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 17 – 34.

2. Kuropyatnyk O. A. The use of bypass exhaust gases to ensure the environmental performance of marine diesel engines // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 217 – 228.

3. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных



жидкостей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. – С. 74 – 83.

4. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вып. 22. – С. 66 – 74.

5. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67 – 71.

6. Zablotsky Yu. V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353 – 362.

7. Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб, 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С.109 – 118.

8. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. морсу. ун-ту: зб. наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 – 100.

9. Заблоцкий Ю.В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – Одесса: НУ ОМА. – С. 83 – 92.

10. Горб С.И. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 26. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 – 26.

11. Зверьков Д.О., Сагин С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Судові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 20 – 25.

12. Заблоцкий Ю.В., Куропятник А.А. Повышение топливной экономичности и экологических параметров работы судовых дизелей при использовании присадок к топливу // Austria-science. – 2017. – № 2. – С. 83 – 88.

13. Горб С.И., Горб А.С. Программное обеспечение для управления активами на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2018. – Вып. 24. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 34 – 48.

14. Горб С.И., Каменева А.В. Модель базы данных для модуля идентификации пользователей в системе технического менеджменты судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вып. 22. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 33 – 38.

15. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – С. 72 – 80.

16. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132 – 142.

*Анотація – Розглянутий вплив структурних характеристик моторного мастила на динаміку суднового дизеля. Зазначено, що мікронні шари суднових моторних мастил, що поділяють контактні поверхні суднових дизелів, набувають властивості рідких кристалів і характеризуються впорядкованою структурою молекул. Якісним показником цієї структури є ступінь впорядкованості молекул, кількісним – товщина впорядкованого (граничного) мастильного шару. Запропоновано визначення структурних характеристик суднових моторних мастил (ступеня впорядкованості молекул граничного шару та його товщини) виконувати за допомогою оптичного методу дихроїзму поглинання. Наведено схему експериментальної установки, що дозволяє виконувати подібні дослідження. Експериментально встановлено, що для моторних мастил Shell Rimula X15 і Castrol TPL 123 (які використовуються в системі мащення суднового дизеля CatC18 фірми Caterpillar) товщина впорядкованого (граничного) мастильного шару становить 14,3 ...14,7 мкм та 16,4...16,6 мкм відповідно. Ступінь впорядкованості молекул в граничному шарі для моторного мастила Shell Rimula X15 знаходиться в діапазоні 0,56 ... 0,58, для моторного мастила Castrol TPL 123 – в діапазоні 0,63 ... 0,64. Наведені результати досліджень динаміки суднового дизеля CatC18 фірми Caterpillar, що виконані на режимі пуску, а також під час різного збільшення та зниження навантаження. Як показники, за якими виконувалася оцінка динаміки роботи дизеля, приймалися закид частоти обертання та час виходу на новий сталий режим. В результаті експериментів підтверджено, що моторне мастило Castrol TPL 123, що має більшу структурну впорядкованість молекул в граничному шарі в порівнянні з мастилом Shell Rimula X15, забезпечує перебіг перехідних процесів суднового дизеля CatC18 фірми*

*Caterpillar з меншим закидом частоти обертання і меншим часом виходу на новий сталій режим роботи. Запропонована технологія визначення структурних характеристик моторних мастил може бути використана для будь-яких типів і сортів мастила (мінерального або синтетичного, високої і низької в'язкості, таких, що використовують в системах циркуляційного, або циліндрового мащення). Запропонований метод оцінки динамічних характеристик суднових дизелів (по закиду частоти обертання та часу виходу на сталій режим роботи у разі зміни навантаження) може використовуватися для будь-яких типів двигунів внутрішнього згорання (мало-, середньо- і високооберткових; а також таких, що виконують функції головних або допоміжних двигунів).*

*Annotation – The influence of the structural characteristics of engine lube oil on the dynamics of a marine diesel engine is considered. It is indicated that micron layers of marine engine lube oils separating the contact surfaces of marine diesel engines acquire the properties of liquid crystals and are characterized by an ordered molecular structure. The qualitative indicator of this structure is the degree of ordering of the molecules, and the quantitative indicator is the thickness of the ordered (boundary) lubricating layer. It is proposed to determine the structural characteristics of marine engine lube oils (the degree of ordering of the molecules of the boundary layer and its thickness) using the optical method of absorption dichroism. A diagram of an experimental setup is presented that allows such studies to be carried out. It has been experimentally established that for Shell Rimula X15 and Castrol TPL 123 engine lube oils (used in the oil system of the Caterpillar CatC18 marine diesel engine), the thickness of the ordered (boundary) lubricating layer is 14.3 ... 14.7 microns and 16.4 ... 16.6 microns, respectively. The degree of ordering of molecules in the boundary layer for Shell Rimula X15 engine lube oil is in the range of 0.56 ... 0.58, for Castrol TPL 123 engine lube oil – in the range of 0.63 ... 0.64. The results of studies of the dynamics of the CatC18 marine diesel engine by Caterpillar, carried out in the starting mode, as well as at various increases and decreases in load, are presented. As indicators, which were used to assess the dynamics of the diesel engine, the overshoot of the rotational speed and the time to reach a new steady state mode were taken. Experiments have confirmed that Castrol TPL 123 engine lube oil, which has a higher molecular structure in the boundary layer compared to Shell Rimula X15 lube oil, ensures the transient processes of the Caterpillar CatC18 marine diesel engine with less overspeed and less time to reach a new state work. The proposed*

*technology for determining the structural characteristics of engine lube oils can be used for any type and grade of oil (mineral or synthetic, high and low viscosity, used both in circulating and cylinder lubrication systems). The proposed method for assessing the dynamic characteristics of marine diesel engines (by overshoot of the speed and the time to reach a steady state of operation in the event of a change in load) can be used for any types of internal combustion engines (low-, medium- and high-speed; as well as performing the functions of both main and auxiliary engines).*