

УДК 621.426

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА СТРАТИФИКАЦИИ ВЯЗКОСТИ  
СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ  
СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

**С.В. Сагин**  
доцент

*НУ «Одесская морская академия»*

**Аннотация.** Рассмотрено явление стратификации вязкости моторного масла, возникающее в условиях граничного и гидродинамического смазывания цилиндропоршневой группы судовых малооборотных дизелей. Приведены аналитические зависимости, позволяющие рассчитывать сдвиговые нагрузки (напряжение и скорость сдвига), которые возникают в сопряжениях цилиндропоршневой группы судовых малооборотных дизелей. Разработана модель зоны трения поршневое кольцо – цилиндрическая втулка с учетом разницы диаметрального зазора в сопряжениях поршень – втулка и кольцо – втулка. Предложена методика построения реологических кривых судового моторного масла, в частности кривых вязкости в координатах кинематическая вязкость – скорость сдвига. Экспериментально подтверждено явление стратификации моторного масла для сопряжения поршневое кольцо – цилиндрическая втулка судового малооборотного дизеля. Показано, что значение вязкости граничного смазочного слоя моторного масла лежит в пределах 0,89-1,09 объемной вязкости и определяется скоростью сдвига масляного слоя. Указано, при отсутствии сдвиговых нагрузок, а также при начальном движении контактируемых поверхностей, вязкость граничного смазочного слоя на 8-9 % превышает объемную вязкость масла.

**Ключевые слова:** цилиндропоршневая группа судового дизеля, гидродинамическое смазывание, граничное смазывание, объемная вязкость, вязкость граничного слоя, стратификация вязкости.

УДК 621.426

**ВИЗНАЧЕННЯ ДІАПАЗОНУ СТРАТИФІКАЦІЇ В'ЯЗКОСТІ  
МАСЛИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ В ТРИБОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ  
СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ**

**С.В. Сагін**  
доцент

*НУ «Одеська морська академія»*

---

© Сагин С.В., 2019

**Анотація.** Розглянуто явище стратифікації в'язкості моторного мастила, що виникає в умовах граничного і гідродинамічного змащування циліндропоршневої групи судових мало-обертових дизелів. Наведено аналітичні залежності, що дозволяють розрахувати зсувні навантаження (напругу і швидкість зсуву), які виникають в сполученнях циліндропоршневої групи судових мало-обертових дизелів. Розроблено модель зони тертя поршневі кільця – циліндрова втулка з урахуванням різниці діаметрального зазору в сполученнях поршень – втулка і кільце – втулка. Запропоновано методику побудови реологічних кривих судового моторного мастила, зокрема кривих в'язкості в координатах кінематична в'язкість – швидкість зсуву. Експериментально підтверджено явище стратифікації моторного мастила для сполучення поршневі кільця – циліндрова втулка судового мало-обертового дизеля. Показано, що значення в'язкості граничного мастильного шару моторного мастила лежить в межах 0,89-1,09 об'ємної в'язкості і визначається швидкістю зсуву масляного шару. Зазначено, що при відсутності зсувних навантажень, а також при початковому русі контактуючих поверхонь, в'язкість граничного мастильного шару на 8-9 % перевищує об'ємну в'язкість мастила.

**Ключові слова:** циліндропоршнева група судового дизеля, гідродинамічне мащення, граничне мащення, об'ємна в'язкість, в'язкість граничного шару, стратифікація в'язкості

UDC 621.426

**DETERMINATION OF THE VISCOSITY STRATIFICATION RANGE  
OF THE LUBRICANT IN TRIBOLOGICAL SYSTEMS  
OF SHIP DIESEL ENGINES**

**Sagin S.**  
assistant professor

NU «Odessa Maritime Academy»

**Abstract.** Stratification phenomenon of viscosity of engine oil was observed, it occurs in a boundary and hydrodynamic lubrication of piston group of marine low diesel engines. Analytical dependences were submitted which allow to calculate the shear load (straining and shear rate) which appears in the interfaces of the cylinder group marine low-speed diesels. A model of zone of friction piston ring was worked out – cylinder sleeve taking into account the difference of diametrical clearance – bushing and ring - sleeve. The method of construction of the rheological curves marine engine oils was proposed, particularly the curves of viscosity in the coordinates of kinematic viscosity – shear rate. Experimentally confirmed phenomenon of stratification of engine oil for the piston ring coupling – cylinder bush marine low-speed diesel. It is shown that the value of viscosity of the boundary

*lubricant of engine oil is in the range of 0,89-1,09 of volume viscosity and determines the share rate of the oil layer. It is also pointed, that with the absence of shear forces and with the initial movement of the contacting surfaces, the viscosity boundary lubricant layer exceeds volume viscosity of lubricating oil by 8-9 % more.*

**Keywords:** *marine diesel cylinder group, hydrodynamic lubrication, boundary lubrication, volume viscosity, the viscosity of the boundary layer, viscosity stratification*

**Постановка проблемы в общем виде.** Двигатели внутреннего сгорания морских судов (дизели) являются самым распространенным типом энергетических установок. Сегодня дизели используются на всех без исключения типах судов, включая как парусные, так и суда с ядерной установкой. При этом по своему назначению они могут быть главными (в случае если их мощность передается на гребной винт) и вспомогательными (когда их мощность используется электрическим генератором). Функционирование судовых дизелей обеспечивается различными системами, одной из которых является система смазывания. Главным компонентом данной системы считается моторное масло, выполняющее функции как смазывания, так и охлаждения деталей, которые оно разделяет. Нарушение, или недопустимое отклонение эксплуатационных характеристик моторных масел может привести к возникновению аварийных ситуаций в работе судового дизеля вплоть до обесточивания (в случае отказа в работе вспомогательных двигателей) и остановки судна (в случае отказа главного двигателя).

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для судовых дизелей одним из ответственных узлов является цилиндропоршневая группа, подача моторного масла к которой осуществляется отдельной системой. Работа моторного масла в судовых дизелях сопровождается изменением его реологических характеристик, в первую очередь вязкостью [1]. Вязкость нефтепродуктов является важнейшей характеристикой как топлива, так и масла, применяемых в судовых дизелях [2; 3]. Поддержание вязкости в требуемых пределах является одним из условий обеспечения надежной работы судовых дизелей [4].

**Постановка задачи.** Изменение вязкости моторного масла может происходить по разным причинам, главные из которых – попадание в масло нерастворимых примесей (что способствует повышению вязкости) и попадание в масло топлива (что приводит к снижению вязкости). При этом, как первое, так и второе характерно для циркуляционных масляных систем, обеспечивающих смазывание как цилиндропоршневой группы, как и подшипников коленчатого вала. Поэтому вязкость масла для этих систем контролируется через различные промежутки времени в процессе эксплуатации дизеля. В случае, если вязкость масла изменится в большую или меньшую сторону на 20-25 % от вязкости свежего масла, рекомендуется производить его смену. Для лубрикаторных систем смазывания

использующихся в судовых малооборотных дизелях и обеспечивающих подачу масла на зеркало цилиндровой втулки, вязкость масла проконтролировать невозможно, а кроме того считается, что изменение данного параметра при выполнении маслом своего функционального назначения не происходит. При этом в предыдущих работах было установлено, что при возникновении сдвиговых усилий в масляном слое, разделяющем поверхности, возникает явление стратификации вязкости [5; 6]. Поэтому целью исследований являлось определение диапазона изменения вязкости моторного масла в процессе смазывания цилиндропоршневой группы судовых малооборотных дизелей.

**Изложение основного материала исследования.** Для смазочного материала, находящегося в зоне контакта цилиндропоршневой группы, характерны основные признаки деформации: наличие приложенной извне механической силы и изменение формы, которое заключается в смещении частиц тела (в данном случае молекул масла) относительно друг друга. В случае рассмотрения пары поршневое кольцо – втулка цилиндра в качестве механической силы на молекулы масла действует нормальная сила, прижимающая поршень к стенке цилиндра. При этом, приложенная нагрузка вызывает появление внутренних сил, противодействующих внешним усилиям, которые равны, но противоположны им по направлению. В смазочном слое возникает напряжение  $P$ , равное отношению силы  $F$  к единице площади  $S$

$$P = \frac{F}{S}.$$

Силу и напряжение можно разделить на нормальные (давление) и касательные (напряжение сдвига). Для пары трения поршневое кольцо – цилиндровая втулка деструктирующее действие на масляный слой, способствующее срыву молекул масла с контактирующих поверхностей, оказывает именно напряжение сдвига, определяемое как

$$\tau = \frac{F}{S}. \quad (1)$$

Закон Ньютона для так называемых истинно-вязких (ньютоновских) жидкостей связывает внешнее напряжение и скорость перемещения отдельных слоев

$$P = \frac{F}{S} = \eta \frac{du}{dx}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость;

$\frac{du}{dx}$  – градиент скорости.

С учетом (1) выражение (2) можно записать как

$$\tau = \eta \cdot \gamma',$$

где  $\gamma'$  – скорость сдвига [7].

Напряжение сдвига и скорость сдвига могут быть проиллюстрированы моделью параллельных плоскостей (рис. 1), аналогичной процессам трения в паре поршневое кольцо – цилиндровая втулка. Напряжение сдвига  $\tau$  вызывает характерную картину послойного распределения скоростей в слое жидкости. Максимальная скорость течения  $v_{\max}$  наблюдается у границы раздела жидкости с движущейся плоскостью.

По мере удаления от подвижной плоскости скорость течения снижается и на расстоянии  $y$  от нее, на границе с неподвижной плоскостью,  $v_{\min} = 0$ . Скорость сдвига  $\gamma'$  представляет собой градиент скорости поперек зазора и математически выражается в виде дифференциала

$$\gamma' = \frac{dv}{dy}, \quad \frac{m/c}{m} = c^{-1}. \quad (4)$$

Большинство технических жидкостей (в том числе и моторное масло) относятся к дисперсным системам и имеют аномальный характер вязкости, т.е. они не подчиняются закону Ньютона. Такие системы жидкости называются неньютоновскими. Их вязкость является функцией напряжения, сдвига. К подобным системам можно отнести структурированные тонкие слои смазочного материала, находящегося в узком зазо-

ре пары трения втулка цилиндра – поршневое кольцо. Наличие пространственной структуры придает этим системам своеобразные механические свойства: упругость, прочность, пластическую вязкость.

Основными режимами трения и связанного с ним смазывания, происходящими в судовых дизелях, являются гидродинамический и граничный. Несмотря на стремление обеспечить гидродинамический режим смазки в трибосопряжении поршневое кольцо – цилиндровая втулка судового дизеля, процесс смазывания этого узла происходит в условиях граничного трения. Это обуславливается рядом причин, основная из которых – минимизация зазора в паре трения поршневое кольцо – цилиндровая втулка для обеспечения герметичности камеры сгорания и максимального преобразования энергии расширяющихся в цилиндре газов в полезную работу. Кроме того, в процессе эксплуатации на поверхностях названной пары происходят образование окислов и отложение нагаров, что также способствует уменьшению зазора и переходу из гидродинамического в режим смешанного и граничного трения.

Представление о режимах смазывания цилиндровой группы можно проиллюстрировать на примере модели, показанной на рис. 2.

Гидродинамический режим смазывания наблюдается в тех местах, где смазочный материал разделяет поверхности поршня и втулки. В паре трения поршневое кольцо – цилиндровая втулка режим трения и смазывания меняется на граничный.

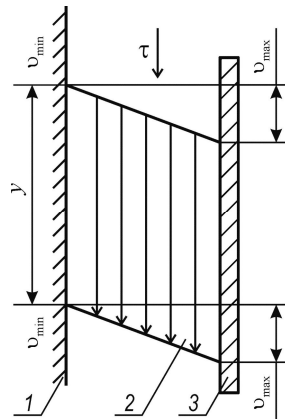


Рис. 1. Модель течения жидкости между параллельными плоскостями:  
1 – неподвижная плоскость; 2 – жидкость; 3 – движущаяся плоскость

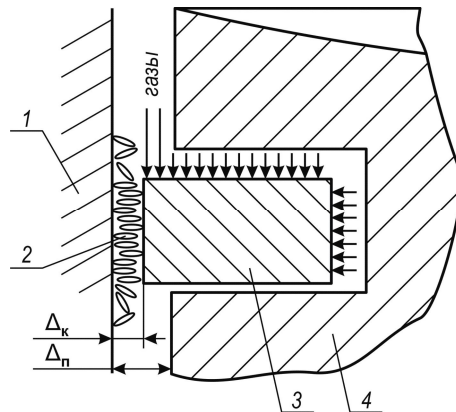


Рис. 2. Модель трибологической системы цилиндровая втулка –  
смазочный материал – поршневое кольцо:  
1 – втулка цилиндра; 2 – смазочный материал; 3 – кольцо; 4 – поршень

Это связано с тепловым расширением кольца (благодаря наличию «кольцевого» замка), а также с выполнением кольцом компрессионного действия, когда на верхнюю и внутреннюю часть кольца действуют газы, а наружная поверхность кольца прижимается к поверхности цилиндровой втулки. При этом зазоры в парах трения поршень – втулка  $\Delta_p$  и кольцо – втулка  $\Delta_k$  имеют разное значение и соответствуют разным режимам смазывания.

Характеристики смазочного матеріала, входящего в трибологическую систему поршневое кольцо – смазочный слой – втулка цилиндра, как правило, описываются с точки зрения гидродинамической теории смазки. При этом учитываются только «объемные» свойства смазочного материала, и не рассматриваются аномалия этих свойств (в частности вязкости), происходящая в тонких граничных слоях и обуславливающаяся их жидкокристаллической структурой.

С целью подтверждения этого высказывания выполнялось моделирование процессов трения, происходящих при смазывании цилиндропоршневой группы судового дизеля 12K98ME-C Mk7 MAN Diesel&Turbo, обладающего номинальной мощностью 54120 кВт при частоте вращения 97 об/мин.

Масло, находящееся в зазоре пары трения поршневое кольцо – втулка цилиндра, подвергается напряжению сдвига. Скорость сдвига  $\gamma'$ , согласно (4) может быть рассчитана как

$$\gamma' = \frac{v_m}{h_k}, \quad (5)$$

где  $v_m$  – средняя скорость поршня, которая, в свою очередь, определяется как

$$v_m = \frac{Sn}{30}, \quad (6)$$

где  $S$  – ход поршня, м;

$n$  – частота вращения коленчатого вала, об/мин;

$h_k$  – высота поршневого кольца, м.

Диапазон эксплуатационных режимов рассматриваемого дизеля определяется частотами вращения от минимально устойчивой  $n_{\min}$  до максимально допустимой номинальной  $n_{\max}=1,03n_{\text{ном}}$  и лежит в интервале 53-100 об/мин. Тогда, с учетом геометрических размеров поршневого кольца дизеля  $h_k=0,025$  м, а также согласно (5) и (6), скорость сдвига в зазоре пары трения поршневое кольцо – втулка цилиндра составит  $\gamma'=188-355 \text{ с}^{-1}$ .

Моделирование подобных процессов трения в лабораторных условиях выполнялось с помощью экспериментальной установки, основу которой составлял ротационный вискозиметр [5; 8]. При этом для различной скорости сдвига возможно было определить вязкость смазочного материала в граничном смазочном слое  $v_{\text{гр}}$ . Ее величина определялись при толщине смазочного слоя 15 мкм, величина которого соответствовала эксплуатационному зазору в паре трения поршневое кольцо – цилиндровая втулка. Значение объемной вязкости  $v_{\text{об}}$  определялось с помощью капиллярного вискозиметра фирмы Unitor. Эксперименты, как по определению объемной вязкости  $v_{\text{об}}$ , так и вязкость в граничном смазочном слое  $v_{\text{гр}}$ , проводились при температуре смазочного материала 40 °С.



Лабораторные исследования проводились для различных моторных масел фирмы Shell, имеющих равновесные значения основных характеристик (табл. 1).

Таблица 1

*Основные характеристики моторных масел,  
использующихся при проведении эксперимента*

| Характеристика                                                | Параметры<br>смазочного материала |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|
|                                                               | № 1                               | № 2       |
| Индекс SAE                                                    | 50                                | 50        |
| Вязкость кинематическая, сСт:<br>при 40°C,<br>при 100°C       | 217<br>19,5                       | 221<br>20 |
| Общее щелочное число<br>(Total Base Number – TBN),<br>мгКОН/г | 70                                | 70        |
| Вязкость при 15 °C,                                           | 940                               | 940       |
| Температура вспышки, °C,                                      | 215                               | 207       |

Результаты измерений приведены в табл. 2. При этом в ней для скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , соответствующей эксплуатационным режимам и эксплуатационной частоты вращения вала дизеля 12K98ME-C Mk7 MAN Diesel&Turbo, приведены значения объемной вязкости  $\nu_{об}$  и вязкости граничного смазочного слоя  $\nu_{гр}$ , полученных в лабораторных условиях

По результатам табл. 2 построены зависимости  $\nu = f(\dot{\gamma})$ , показанные на рис. 3. Отметим, что зависимости имеют идентичный характер и отличаются лишь интенсивностью снижения вязкости при увеличении скорости сдвига.

Таблица 2

*Результаты реологических испытаний судовых масел*

| Тип смазочного<br>материала и его характеристика |                                               | Скорость сдвига, $\dot{\gamma}$ , с <sup>-1</sup> |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                  |                                               | 0                                                 | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| №1                                               | Объемная вязкость,<br>$\nu_{об}$ , сСт        | 222                                               |     |     |     |     |     |     |     |
|                                                  | Вязкость граничного<br>слоя, $\nu_{гр}$ , сСт | 242                                               | 233 | 225 | 221 | 207 | 205 | 203 | 197 |
| № 2                                              | Объемная вязкость,                            | 217                                               |     |     |     |     |     |     |     |

|                                                   |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $v_{об}, \text{сСт}$                              |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Вязкость граничного слоя,<br>$v_{гр}, \text{сСт}$ | 228 | 218 | 213 | 206 | 203 | 201 | 198 | 194 |

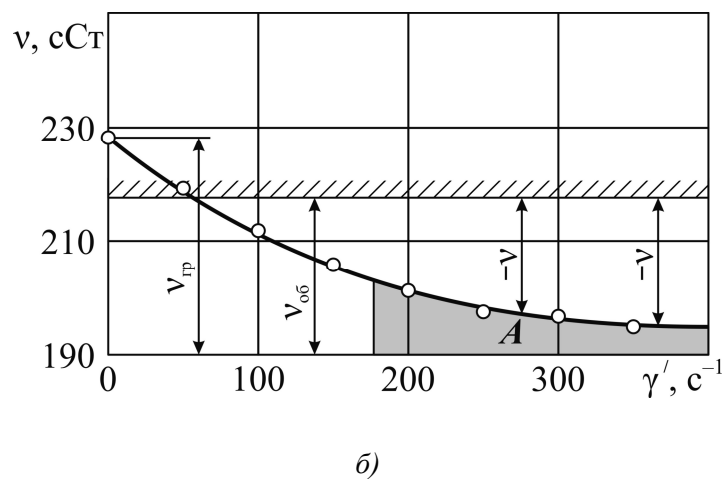
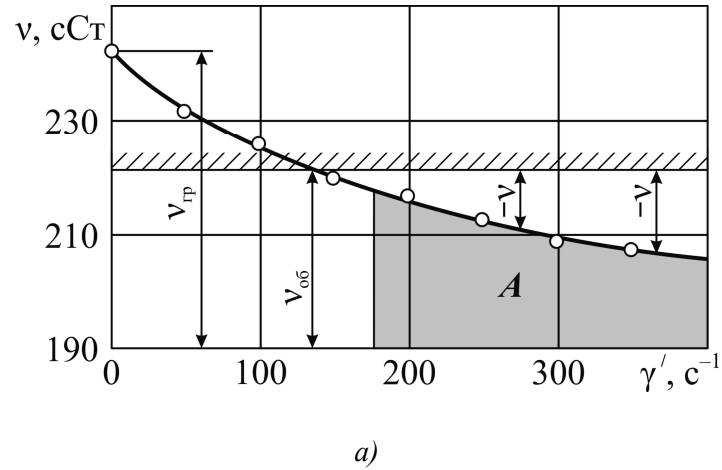


Рис. 3. Кривые вязкости моторного масла  
(в граничном слое,  $v_{гр}$  и в большом объеме  $v_{об}$ ) от скорости сдвига  $\gamma'$   
при толщине масляного слоя 15 мкм:  
а) масло № 1; б) масло № 2;  
А – область эксплуатационных режимов работы дизеля

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Установленная в результате проведенных исследований зависимость вязкости  $\nu$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  (рис. 3), подтвердила «неньютоновский» характер течения смазочного материала в узком зазоре пары трения поршневое кольцо – втулка цилиндра.

Увеличение вязкости в граничном слое при отсутствии сдвиговых нагрузок объясняется наличием в нем ориентационной упорядоченности молекул. Снижение вязкости связано с появлением сдвиговых усилий, воздействующих на смазочный слой.

Стратификация вязкости подтверждает жидкокристаллическую структуру граничного слоя в узком зазоре между поршневым кольцом и втулкой цилиндра. В диапазоне скоростей сдвига  $\dot{\gamma} = 0-400 \text{ с}^{-1}$  (соответствующих основным эксплуатационным режимам работы судовых малооборотных дизелей), стратификация вязкости рассмотренных моторных масел составляет (0,89-1,09) значения объемной вязкости  $\nu_{об}$ . Для моторных масел, исследуемых в работе, диапазон значений стратификации вязкости моторного масла показан на рис. 4.

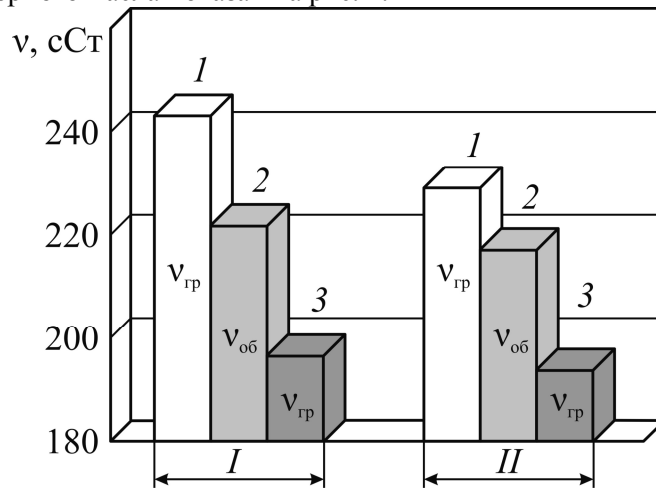


Рис. 4. Диаграмма стратификации вязкости судовых моторных масел в зависимости от скорости сдвига нагрузки дизеля:

*I* – масло № 1; *II* – масло № 2;

*1* – вязкость граничного слоя,  $\nu_{гр}$ ,  
при отсутствии сдвиговых усилий ( $\dot{\gamma}=0 \text{ с}^{-1}$ );

*2* – вязкость граничного слоя,  $\nu_{гр}$ ,  
при скорости сдвига  $\dot{\gamma}=350 \text{ с}^{-1}$ ;  $\nu_{об}$  – вязкость в большом объеме

При увеличении частоты вращения вала дизеля (а, следовательно и скорости поршня) в масляном слое возникают сдвиговые усилия, способствующие уменьшению его вязкости. Этот факт необходимо учитывать при выборе сорта масла для смазывания цилиндропоршневой груп-

пы, а также при определении браковочных показателей масла, т.к. и в том и в другом случае определяется значение вязкости для большого объема жидкости, а эксплуатация цилиндропоршневой группы происходит при значениях вязкости, характерных для граничного слоя.

Следует отметить, что при отсутствии сдвиговых нагрузок, а также при начальном движении контактируемых поверхностей, вязкость граничного смазочного слоя на 8-9 % превышает объемную вязкость масла. Этот эффект особенно важен для пусковых режимов работы судовых дизелей, когда скорость перемещения поршня еще не позволяет равномерно распределить масляную пленку по поверхности цилиндрической втулки и создать требуемый режим смазывания.

Явление стратификации вязкости, возникающее при обеспечении режима смазывания цилиндропоршневой группы судовых малооборотных дизелей, необходимо учитывать не только при эксплуатации, но и при разработке методики определения параметров судовых энергетических установок [10].

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sagin S.V. Motor Oil Viscosity Stratification in Friction Units of Marine Diesel Motors / S.V. Sagin, O.V. Semenov // *American Journal of Applied Sciences*, 2016. – Vol.13. – Iss. 2. – P. 200-208. DOI: 10.3844/ajassp.2016.200.208.
2. Заблоцкий Ю.В. Исследование эксплуатационных характеристик судовых среднеоборотных дизелей при их работе на различных топливах / Ю.В. Заблоцкий, С.В. Сагин // *Судовые энергетические установки: Научн.-техн. сб.* – 2014. – № 34. – Одесса: ОНМА. – С. 80-86.
3. Поповский А.Ю. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей / А.Ю. Поповский, С.В. Сагин // *Автоматизация судовых технических средств: Науч.-техн. зб.* – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
4. Yeryganov O. Features of the fastest pressure growth point during compression stroke / O. Yeryganov, R. Varbanets // *Diagnostyka*. – 2018. – Vol. 19. – № 2. – P. 71-76. Doi: 10.29354/diag/89729.
5. Кириян С.В. Реология моторных масел с квазжидко-кристаллическими слоями в триаде трения / С.В. Кириян, Б.А. Алтоиз // *Трение и износ*. – 2010. – Т. 31. – № 3. – С. 312-318.
6. Сагин С.В. Оценка вязкости масла при обеспечении режимов смазывания цилиндрической группы судовых дизелей / С.В. Сагин, А.В. Семенов // *Судовые энергетические установки: Научн.-техн. сб.* – 2015. – № 36. – Одесса: НУ ОМА. – С. 104-114.
7. Сагин С.В. Влияние жидкокристаллических свойств граничных смазочных слоев на реологические характеристики мо-

- торных масел / С.В. Сагин // Проблемы техники: Наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 64-71.
8. Алтоиз Б.А. Ротационный вискозиметр для исследования микронных прослоек / Б.А. Алтоиз, С.К. Асланов, А.Ф. Бутенко // Физика аэродисперсных систем. – 2005. – № 42. – С. 53-65.
9. Поповский А.Ю. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств / А.Ю. Поповский, С.В. Сагин // Автоматизация судовых технических средств: Наук.-техн. зб. – 2016. – Вып. 22. – С. 78-88.
10. 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 28.11.2018

**Рецензенти:**

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

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри Суднових допоміжних установок та холодильної техніки Національного університету «Одеська морська академія» **Н.А. Козьмїних**