

УДК 621.436

**УПРАВЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
МОТОРНЫХ МАСЕЛ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ****Д. В. Мацкевич¹**

Рассмотрены вопросы изменения реологических характеристик моторных масел судовых дизелей. Доказан неньютоновский характер течения судовых моторных масел, находящихся в зазоре пары трения вал–вкладыш подшипника. Рассмотрено влияние поверхностно-активных веществ на реологические характеристики судовых моторных масел. Предложен вариант управления реологическими характеристиками судовых моторных масел за счет интенсификации пополнения масла в масляной системе, а также за счет добавления в масло поверхностно-активных веществ

Ключевые слова: *судовой среднеоборотный дизель, судовое моторное масло, реологические характеристики моторного масла, вязкость моторного масла*

Целью работы являлась определение возможности управления реологическими характеристиками моторных масел, используемых в циркуляционных системах судовых дизелей, а также изучение реологических особенностей моторного масла, находящегося в узком зазоре пары трения вал–вкладыш подшипника.

Неотъемлемой составляющей любой судовой энергетической установки являются среднеоборотные дизели (СОД). На всех без исключения морских судах данные типы тепловых двигателей используются в качестве источника электроэнергии судовой электростанции, на ряде судов СОД, кроме того, выполняют функции главного двигателя, передавая свою мощность на винт. Все это предопределяет пристальное внимание, уделяемое оптимизации работы судовых СОД и их систем. Одной из систем, обеспечивающих надежную эксплуатацию судовых дизелей (как главных, так и вспомогательных) является система смазывания. Данная система поддерживает наличие масляной пленки в таких ответственных парах трения как кулачковая шайба распределительного вала – ролик толкателя, поршневое кольцо – цилиндровая втулка, вкладыш подшипника (рамового или мотылевого) – коленчатый вал.

¹ © Мацкевич Д.В., ассистент Одесской национальной морской академии.

Исследования проводились для моторного масла MLC30 фирмы Castrol, имеющего следующие основные характеристики:

- ✓ плотность – 897 кг/м³;
- ✓ кинематическая вязкость при 40° С – 107 сСт;
- ✓ кинематическая вязкость при 100° С – 11,5 сСт;
- ✓ общее щелочное число – 12 мгКОН/г;
- ✓ класс SAE – 30

и используемого в циркуляционной системе судового дизеля S6A2 фирмы Mitsubishi (рис.1).

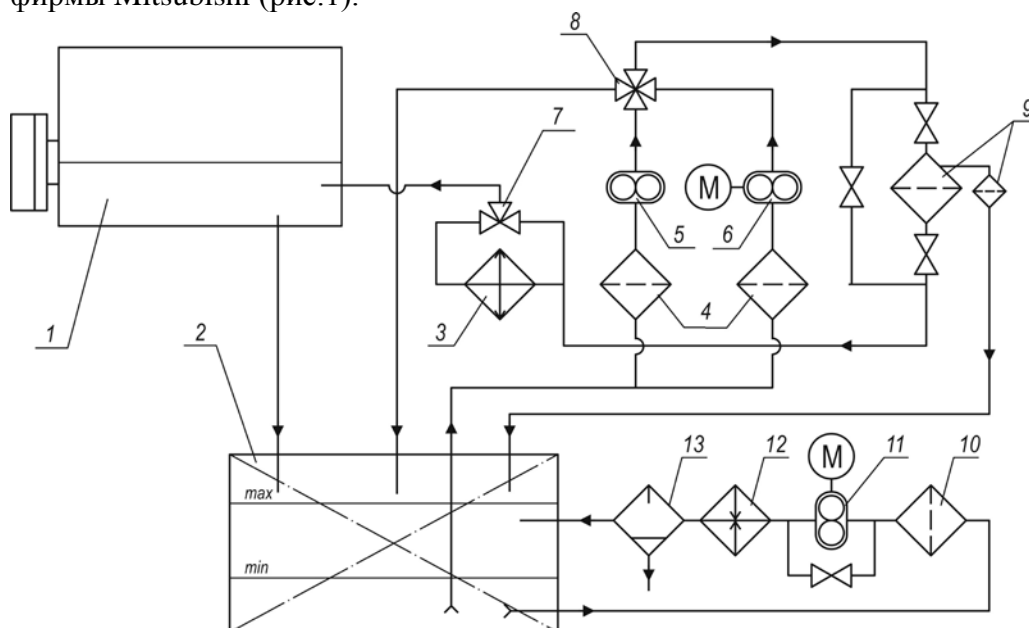


Рис. 1. Система смазки судового дизеля S6A2 фирмы Mitsubishi:

- 1 – дизель; 2 – сточно-циркуляционная цистерна; 3 – охладитель; 4 – магнитный фильтр; 5 – навешенный масляный насос; 6 – электроприводной масляный насос; 7 – перепускной клапан охладителя; 8 – перепускной клапан насоса; 9 – самоочищающийся фильтр; 10 – фильтр; 11 – насос сепаратора; 12 – подогреватель; 13 – сепаратор

Подачу масла к узлам трения дизеля 1 обеспечивают два масляных насоса 5 и 6, один из которых является навешенным. Масло к насосам поступает из сточно-циркуляционной цистерны 2 через магнитный фильтр 4. В зависимости от положения перепускного клапана 8 масло может либо возвращаться в систему, либо направляться к дизелю (через самоочищающийся фильтр 9 и охладитель 3). Температура масла, поступающего к дизелю, регулируется путем изменения положения перепускного клапана 7. Дизель снабжен автономной системой сепарации масла, состоящей из сепаратора 13, подогревателя 12 и насоса 11. Масло в систему сепарации поступает через фильтр 10.

Как известно [1], основными режимами трения и связанного с ним смазывания являются гидродинамический и граничный. Работа трибосопряжений распределительного вала происходит в режиме граничного трения. Данный режим также характерен для цилиндрической группы судовых СОД. Не смотря на стремление обеспечить гидродинамический режим смазки при работе подшипников скольжения судовых дизелей, процесс смазывания этих узлов происходит в условиях граничного трения. Это обуславливается рядом причин, основная из которых – минимизация зазора в паре трения вал-вкладыш для обеспечения ее устойчивой работы. Кроме того, в процессе эксплуатации на поверхностях названной пары происходят образование окислов и отложение нагаров, что также способствует к уменьшению зазора и переходу из гидродинамического в режим смешанного и граничного трения.

При эксплуатации моторного масла в дизеле происходит изменение его физических и химических свойств. Кроме того, при этом меняются и его реологические характеристики, и в первую очередь вязкость.

Большинство дисперсных систем имеет аномальный характер вязкости, т.е. они не подчиняются закону Ньютона для так называемых истинно-вязких (ньютоновских) жидкостей. Вязкость таких систем является функцией напряжения, сдвига. Основной причиной аномальной вязкости является пространственная структура, возникающая при взаимодействии частиц дисперсной фазы между собой. По своим реологическим свойствам структурированные системы занимают промежуточное положение между жидкостями и твердыми телами и обладают свойствами жидких кристаллов. К подобным системам можно отнести структурированные тонкие слои смазочного материала, находящегося в узком зазоре металлических пар трения втулка-поршень и особенно вал-вкладыш. Наличие пространственной структуры придает этим системам своеобразные механические свойства: упругость, прочность, пластическую вязкость.

Неоднократно отмечалось, что характеристики тонких смазочных слоев, образующихся в условиях граничного трения, зависят не только от структурного состояния масла, но и от действия твердой подложки, вблизи которой они находятся.

Образование вблизи твердой поверхности (особенно металлической) структурированных жидкокристаллических слоев с анизометричной формой молекул приводит к заметному отличию физических свойств тонких прослоек жидкости от их свойств в «объемной» фазе [2]. Так, наличие этих слоев в углеводородных смазочных жидкостях в достаточно тонкой прослойке за счет ее частичного структурирования проявляется в оптической анизотропии последней [3]. Кроме того, для таких слоев вязкость в граничном слое отличается от вязкости «объемной» жидкости. Заметная структурная неоднородность граничных смазочных слоев, определяющая неньюто-

новский характер вязкого течения, значительным образом влияет на диссипативные свойства смазочного материала, особенно в трибоузлах, работающих в режиме граничного и смешанного трения [4].

В [5] указывалось, что вязкость предельных углеводородных жидкостей в тонком граничном слое отличается от вязкости в объеме. Там же была предложена методика измерения вязкости квазикристаллических слоев моторных масел с помощью ротационного вискозиметра. Использование данной методики позволило смоделировать процессы, происходящие в паре трения вал – вкладыш судового дизеля S6A2, в частности скорость сдвига и толщину смазочного слоя. В результате проведенных исследований была установлена зависимость вязкости от скорости сдвига (рис. 2), которая подтвердила «неньютоновский» характер поведения смазочного материала в узком зазоре пары трения (вал–вкладыш подшипника). Кроме того, полученные результаты подтвердили утверждение, высказанное в [4], о том, что прилегающие к металлической поверхности триады трения граничные масляные слои более вязкие и обладают ориентационной упорядоченностью молекул.

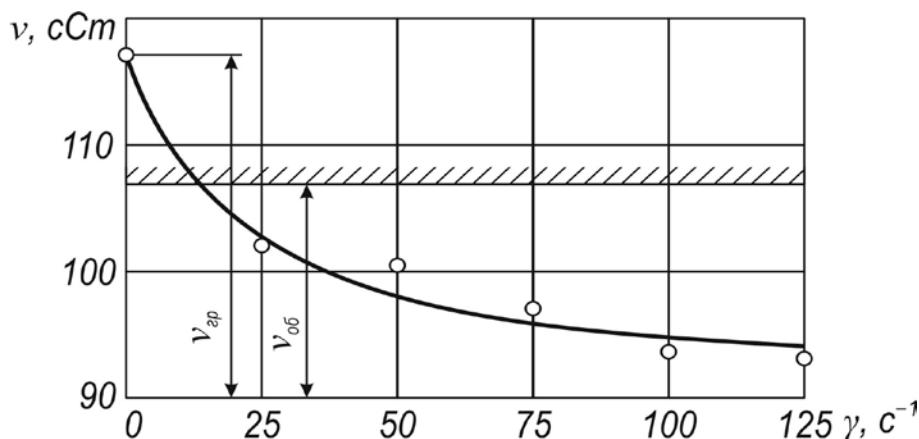


Рис. 2. Зависимость вязкости моторного масла MLC30 фирмы Castrol от скорости сдвига при толщине масляного слоя 20 мкм

Эксплуатация моторного масла в дизеля происходит длительный период времени, в течение которого его реологические характеристики постоянно изменяются. Задача их восстановления, и особенно управления ими, является актуальной и способствует повышению надежности работы комплекса дизель – моторное масло – масляная система.

Для определения динамики изменения вязкости в процессе эксплуатации моторного масла ее измерение производилось с различным временным интервалом. При этом измерялась как «объемная», так и «пристенная»

вязкость отобранных проб. В обоих случаях увеличение вязкости носило экспоненциальный характер и представлено на рис.3.

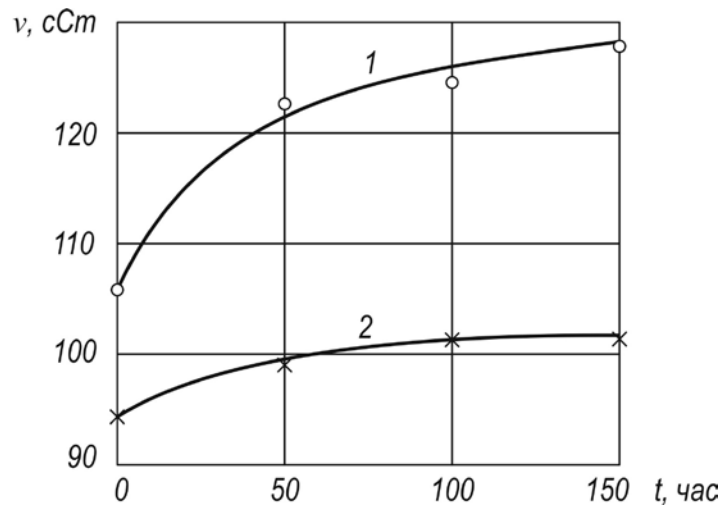


Рис. 3. Изменение вязкости моторного масла MLC30 фирмы Castrol в процессе эксплуатации:

1 – «объемная» вязкость; 2 – «пристенная» вязкость при скорости сдвига 125 с^{-1}

Как следует из рис.2, увеличение скорости сдвига (частоты вращения коленчатого вала дизеля) приводит к снижению вязкости моторного масла. В этом проявляется отрицательное свойство «неньютоновского» характера поведения смазочного материала в зоне трения (вязкость граничного смазочного слоя зависит от скорости сдвига). Поддержание заданного уровня вязкости возможно осуществить различными способами. Для судовых условий наиболее оптимальными являются использование оптимального долива масла в систему [6] и применение поверхностно-активных веществ [7].

Для подтверждения высказанных предположений был произведен следующий эксперимент. Испытаниям были подвержены три дизеля S6A2 фирмы Mitsubishi, входящих в состав вспомогательной судовой энергетической установки. Каждый дизель имел свою автономную систему смазки, что позволяло производить исследования его работы с различным смазочным материалом. Техническое состояние всех дизелей было идентичным, кроме того, условия эксплуатации позволяли произвести одновременную замену всего масла, находящегося в их смазочной системе.

Первый дизель являлся «контрольным» и после замены масла в его системе других технических мероприятий с ним не проводилось и согласно требованиям завода-изготовителя эго эксплуатация производилась в тече-

нии 150 часов работы без промежуточного пополнения масла в системе. За это период эксплуатации уровень масла в картере дизеля не снижался ниже предельно допустимого.

Масляная система второго дизеля пополнялась свежим маслом через каждые 10 часов работы до верхнего рекомендуемого уровня в картере дизеля. Данный период пополнения был определен в качестве оптимального при проведении предыдущих экспериментов по изучению реологических характеристик данного смазочного материала.

Масляная система третьего дизеля первоначально заполнялась маслом с поверхностно-активной присадкой, содержащей в своем составе соли меди. Кроме того, через каждые 10 часов работы пополнение масляной системы данного дизеля производилось маслом с такой же концентрацией поверхностно-активной присадки, как и в общем объеме системы.

Для максимальной корректности проводимого эксперимента все три дизеля находились в эксплуатации практически одинаковое количество времени, при этом отклонение в величине нагрузки на дизели не превышало 7%. Учитывая энергоемкость дизелей, а также объем масляной системы и длительность эксперимента, полученные результаты адекватно отражали процессы изменения реологических характеристик моторного масла.

Из объема масляной системы дизелей производился отбор проб через различные промежутки времени. Главный параметр, который подлежал измерению, была вязкость моторного масла. При этом, ее измерение в судовых условиях производилось с помощью штатной судовой экспресс-лаборатории Viscomar фирмы UNITOR. Таким образом измерялась «объемная» вязкость. Измерение «пристенной» вязкости выполнялось на экспериментальной установке [5] в научной лаборатории.

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1 и на рис. 4.

Анализируя приведенные результаты можно сделать следующие выводы.

В процессе эксплуатации судового дизеля вязкость моторного масла, обеспечивающего его работы, повышается. Для циркуляционной системы смазывания это, прежде всего, обуславливается попаданием в него топлива и частиц несгоревших углеводородов, а также его постепенным окислением.

Увеличение периодичности пополнения масляной системы свежим маслом, а также введение в масло поверхностно-активных компонентов замедляет процесс повышения его вязкости.

Более наглядно процесс изменения вязкости проиллюстрирован на рис. 5, где показаны статические характеристики вязкости в начальный и конечный момент работы для рассмотренных выше условий работы дизеля и его масляной системы.

Таблица 1

Изменение вязкости моторного масла в процессе эксплуатации

| Характеристика масляной системы | Время эксплуатации, часы | | | |
|--|--------------------------|-------|-----|-----|
| | 0 | 50 | 100 | 150 |
| Вязкость масла в объеме | | | | |
| Работа масляной системы в штатном режиме | 107 | 122 | 125 | 128 |
| Пополнение масляной системы через 10 часов работы | 107 | 113 | 116 | 118 |
| Пополнение масляной системы через 10 часов работы и добавка поверхностно-активной присадки | 107 | 110,5 | 112 | 113 |
| Вязкость масла в граничном слое | | | | |
| Работа масляной системы в штатном режиме | 117 | 125 | 128 | 131 |
| Пополнение масляной системы через 10 часов работы | 117 | 121 | 122 | 123 |
| Пополнение масляной системы через 10 часов работы и добавка поверхностно-активной присадки | 126 | 126 | 127 | 128 |

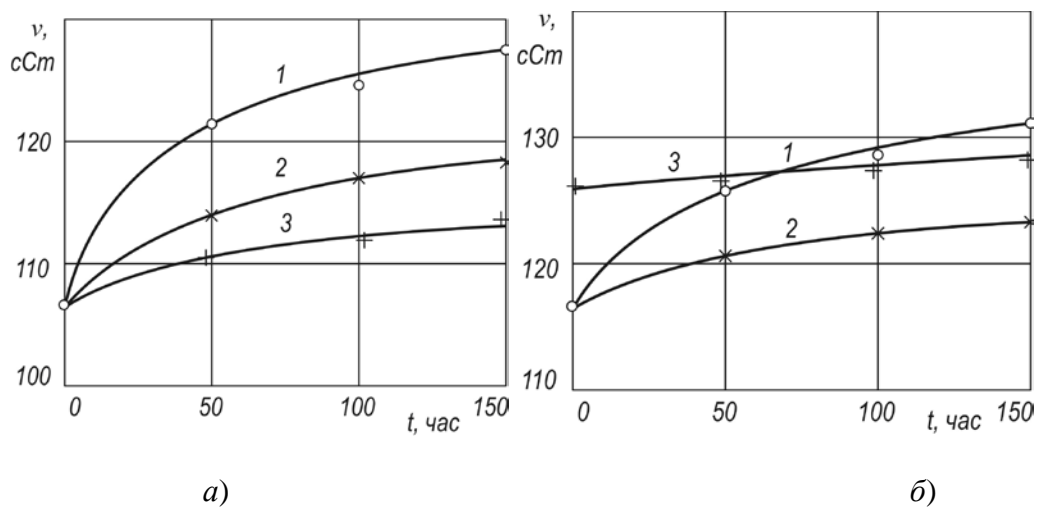


Рис. 4. Изменение вязкости масла в процессе эксплуатации

a) «объемная» вязкость; *б)* «пристенная» вязкость:

1 – работа масляной системы в штатном режиме; 2 – пополнение масляной системы через 10 часов работы; 3 – пополнение масляной системы через 10 часов работы и добавка поверхностно-активной присадки

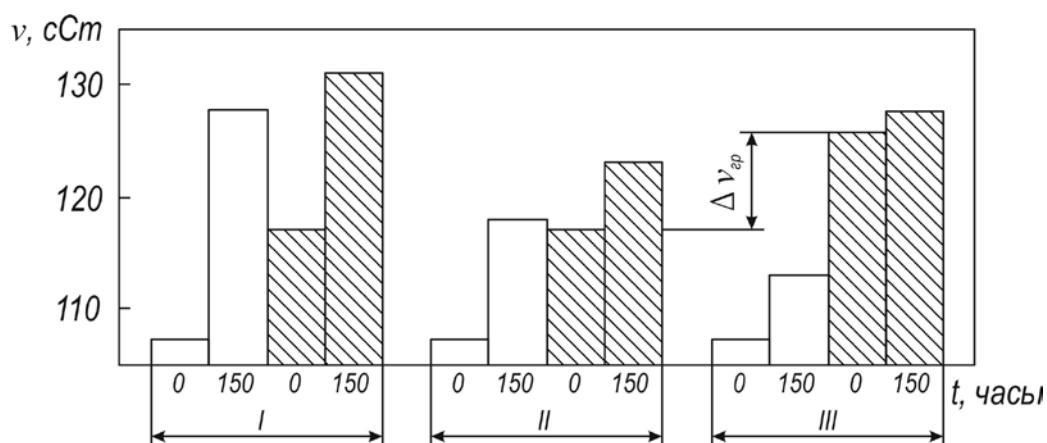


Рис. 5. Изменение вязкости масла в процессе эксплуатации

(чистые – «объемная» вязкость, штрихованные – «пристенная» вязкость):

I – работа масляной системы в штатном режиме; *II* – пополнение масляной системы через 10 часов работы; *III* – пополнение масляной системы через 10 часов работы и добавка поверхностно-активной присадки

Реологические характеристики масла в большом объеме и в граничном смазочном слое отличаются друг от друга. Так, вязкость масла в граничном слое ν_{gr} (т.е. в зазоре вал–вкладыш) имеет большее значение, чем в объеме $\nu_{об}$. Использование поверхностно-активных веществ приводит к увеличению вязкости в граничном смазочном слое. Следует иметь в виду, что в данном случае происходит «приращение» вязкости в граничном слое $\Delta \nu_{gr}$, которое качественно отличается от увеличения объемной вязкости. В данном случае происходит увеличение степени упорядоченности молекул в граничном слое. Это приводит к повышению гидродинамической прочности моторного масла, обеспечивающего граничный режим трения.

Выводы

1. Вязкость моторного масла, находящегося в узком зазоре пары трения вал–вкладыш подшипника и обеспечивающего граничный режим трения, зависит от скорости сдвига, т.е. проявляет «неньютоновский» характер течения.
2. Для моторного масла необходимо различать вязкость в большом объеме («объемную» вязкость) и вязкость в пристенном слое («пристенную» вязкость), которая имеет большее значение, что объясняется возникновением ориентационной упорядоченности молекул в граничном смазочном слое.

3. В процессе эксплуатации масла в циркуляционной системе происходит рост значений как «объемной», так и «пристенной» вязкости, что объясняется окислением масла и попаданием в него несгоревших углеводородов.
4. Путем оптимизации интенсивности пополнения циркуляционной масляной системы, а также за счет использования поверхностно-активных веществ, возможно управлять реологическими характеристиками масла, что приводит к повышению надежности работы судового дизеля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
2. Алтоиз Б.А., Поповский Ю.М. Физика приповерхностных слоев жидкости. – Одесса: Астропринт, 1996. – 152 с.
3. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей//Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – 1 – № 3. – С. 78–88.
4. Алтоиз Б.А., Кириян С.В., Поповский А.Ю. Структурированные приповерхностные слои синтетических и полусинтетических масел на подложке с профилированным микрорельефом // Физика аэродисперсных систем. – Одесса. – 2007. – Вып. 44. – С. 58–66.
5. Алтоиз Б.А., Кириян С.В. Структурированные приповерхностные слои нормальных алканов//Инженерно-физический журнал.–2010.–Том 83, № 3. – С. 608–613.
6. Мацкевич Д.В. Влияние интенсивности долива масла в циркуляционную систему на его эксплуатационные и реологические характеристики//Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – Вып.30. – Одесса: ОНМА. – 2013. – С.172–178.
7. Мацкевич Д.В., Сагин С.В. Влияние медьсодержащих присадок на эксплуатационные свойства моторных масел//Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – 2012. – № 3. – С. 17–25.

Рукопись поступила в редакцию 24.04.2013 г.