

УДК 621.431

Сагин С.В., Семенов А.В.
НУ «ОМА»

ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ МАСЛА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ РЕЖИМОВ СМАЗЫВАНИЯ ЦИЛИНДРОВОЙ ГРУППЫ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Введение. Эксплуатация судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) невозможна без использования рабочих жидкостей, одной из которых является смазочное масло. Судовые ДВС характеризуются наличием большого числа трибосопряжений, работоспособность которых происходит при различных условиях смазывания и обеспечивается моторными маслами с различными эксплуатационными свойствами. Для современных судовых дизелей основными узлами смазывания являются цилиндропоршневая группа (ЦПГ) и подшипники движения (рамовые, мотылевые, крейцкопфные). Подачу моторного масла к этим элементам осуществляется с помощью лубрикаторной (цилиндровой) и циркуляционной систем смазывания. Даже кратковременное отклонение от заданного режима смазывания как в одной, так и в другой системе, может привести к опасным аварийным ситуациям и повреждениям либо ЦПГ, либо колленчатого вала и его подшипников. Это, в свою очередь, вынуждает ограничивать электроснабжение судна (в случае возникновения такой ситуации со вспомогательным дизель-генератором), либо полностью выводить судно из ходового режима (в случае отказа в работе главного двигателя).

Постановка проблемы. Работа моторного масла в судовых дизелях сопровождается изменением его физико-химического состояния, в том числе деформацией. Для смазочного материала, находящегося в зоне контакта, характерны основные признаки деформации: наличие приложенной извне механической силы и изменение формы, которое заключается в смещении частиц тела (в данном случае молекул) относительно друг друга. Подобные изменения в организации строения мономолекулярных слоев проявляют свои свойства в области микронных прослоек масла, разделяющих контактирующие поверхности и обеспечивающих граничный режим смазывания (предотвращая таким образом сухое трение и адгезионный контакт). При этом происходящее изменение характеристик смазочного материала, являющегося составным компонентом триады трения металл – смазочный слой – металл, не учитывается ни в практике эксплуатации

судовых ДВС, ни в большинстве научных исследований, посвященных трибологическим явлениям в тепловых двигателях.

Целью исследования является определение диапазона стратификации вязкости моторного масла, возникающей в условиях граничного и гидродинамического смазывания цилиндропоршневой группы судовых малооборотных дизелей, а также разработка модели зоны трения поршневое кольцо – цилиндровая втулка с учетом разницы диаметрального зазора в сопряжениях поршень – втулка и кольцо – втулка.

Изложение материала исследования. Поступательное движение поршня в цилиндре дизеля не только обеспечивает полезную работу, но и способствует механическим нагрузкам на ЦПП и кривошипно-шатунный механизм.

В случае рассматриваемой пары поршневое кольцо – втулка цилиндра в качестве механической силы на молекулы масла действует нормальная сила, прижимающая поршень к стенке цилиндра, а в случае пары вал – вкладыш подшипника – радиальная сила кривошипно-шатунного механизма. Как в том, так и в другом случае, приложенная нагрузка вызывает появление внутренних сил, противодействующих внешним усилиям, которые равны, но противоположны им по направлению. Силу и напряжение можно разделить на нормальные (давление) и касательные (напряжение сдвига). Для пары трения поршневое кольцо – цилиндровая втулка деструктирующее действие на масляный слой оказывает именно напряжение сдвига, способствующее срыву молекул масла с контактирующих поверхностей.

Реологические характеристики смазочного материала, находящегося в трибосопряжении поршневое кольцо – цилиндровая втулка, наиболее характеризует напряжение сдвига, которое может быть определено как

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

где F – действующая сила кН;

S – площадь контакта, м².

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 η – динамическая вязкость, Па·с;

$\frac{du}{dx}$ – градиент скорости [1].

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

$$\tau = \eta \cdot \gamma', \quad (3)$$

где γ' – скорость сдвига, с^{-1} .

Скорость сдвига γ' представляет собой градиент скорости поперек зазора и математически выражается в виде дифференциала:

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

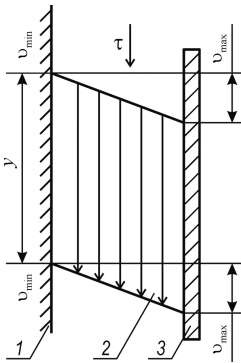


Рис. 1. Модель течения жидкости между соосными плоскостями:

- 1 – неподвижная плоскость;
- 2 – жидкость;
- 3 – движущаяся плоскость

Таким образом, скорость сдвига в паре поршневое кольцо – цилиндрическая втулка можно рассчитать, зная линейную скорость перемещения поршня и геометрические размеры поршневого кольца.

Напряжение сдвига и скорость сдвига могут быть проиллюстрированы моделью параллельных плоскостей (рис. 1), аналогичной процессам трения в паре поршневое кольцо – цилиндрическая втулка.

Напряжение сдвига τ вызывает характерную картину поперечного 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, $v_{\min} = 0$.

Еще одной характеристикой такой дисперсной системы как моторное масло является вязкость, значение которой может быть рассчитано по уравнению Эйнштейна, выведенного им на основании учета гидродинамического сопротивления течению, которое оказывают частицы дисперсной фазы:

$$\eta = \eta_0(1 + \alpha\chi),$$

где η – вязкость дисперсной системы;

η_0 – вязкость дисперсионной среды;

α – коэффициент, учитывающий форму частиц дисперсной фазы (для сферических частиц $\alpha=2,5$);

χ – объемная доля дисперсной фазы.

Уравнение Эйнштейна не учитывает многих особенностей дисперсных систем и поэтому справедливо лишь при соблюдении целого ряда условий.

Для нормальных жидкостей вязкость не зависит от приложенного давления при ламинарном режиме течения.

Наряду с нормальными жидкостями имеются аномально-вязкие системы, проявляющие повышенную вязкость при небольших давлениях; это связано с образованием в них своеобразных пространственных структур вследствие взаимодействия частиц дисперсной фазы.

Большинство дисперсных систем имеет аномальный характер вязкости, т.е. они не подчиняются закону Ньютона. Такие системы (а, следовательно, и жидкости их образующие) называются неньютоновскими. Вязкость таких систем является функцией напряжения, сдвига. Основной причиной аномальной вязкости может быть пространственная структура, возникающая при взаимодействии частиц дисперсной фазы между собой. К подобным системам можно отнести структурированные тонкие слои смазочного материала, находящегося в узком зазоре металлических пар трения втулка-поршень и вал-вкладыш. Наличие пространственной структуры придает этим системам своеобразные механические свойства: упругость, прочность, пластическую вязкость [2, 3].

Система поршневое кольцо – цилиндровая втулка судового ДВС относится к стандартной трибологической системе, состоящую из двух металлических деталей, разделенных между собой слоем смазочного материала. Такую систему характеризуют: состав (детали и свойства деталей системы); внутренние связи (связи между деталями системы); внешние связи (вход, выход); функциональные системы (соотношение вход–выход).

Основным компонентом системы поршневое кольцо – цилиндровая втулка на который возможно накладывать управляющее воздействие, является смазочный материал. Его свойства и характеристики определяются не только его собственной структурой, но и зависят от воздействия металлических поверхностей, которые он разделяет [4].

Отличительной характеристикой смазочного материала, входящего в рассматриваемую трибологическую систему, является его способность образовывать структурно упорядоченные граничные смазочные слои, обладающие свойствами жидких кристаллов. При этом происходит отличие некоторых индивидуальных свойств тонких слоев жидкости от аналогичных свойств в большом объеме. Жидкокристаллическое состояние граничного слоя смазочного слоя приводит к анизотропии ряда его свойств, в частности таких как оптическая и диэлектрическая проницаемость, вязкость, прочность.

Компоненты системы поршневое кольцо – смазочный материал – цилиндровая втулка оказывают взаимное влияние. Это взаимодействие будет различным в зависимости от того, находится ли трибологическая система в статическом или динамическом состоянии. В динамическом состоянии внешние воздействия вызывают дополнительные процессы, которые в статическом состоянии отсутствуют, и повышают интенсивность процессов, происходящих в статическом состоянии.

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

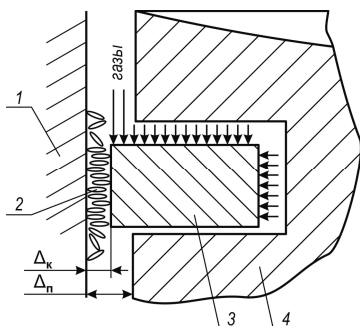


Рис.2. Модель трибологической системы цилиндровой втулки – смазочный материал – поршневое кольцо: 1 – втулка цилиндра; 2 – смазочный материал; 3 – кольцо; 4 – поршень

паре трения поршневое кольцо – цилиндровая втулка режим трения и смазывания меняется на граничный. 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 Δ_p и кольцо – втулка Δ_k имеют разное значение и соответствуют разным режимам смазывания.

Характеристики смазочного материала, 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, происходящая в тонких граничных слоях и обуславливающаяся их жидкокристаллической структурой.

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 [5].

Большинство дисперсных систем (в том числе и моторное масло) имеет аномальный характер вязкости, т.е. они не подчиняются закону Ньютона для так называемых истинно-вязких (ньютоновских)

жидкостей. Вязкость таких систем является функцией напряжения или 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 – поршневое кольцо.

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 [2, 4]. 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. Заметная структурная неоднородность граничных смазочных слоев, определяя неньютоновский характер вязкого течения, значительным образом влияет на диссипативные свойства смазочного материала, особенно в трибоузлах, работающих в режиме граничного и смешанного трения. Одним из параметров, величина которого имеет различное значение для случаев объемной жидкости и граничного слоя, является вязкость.

С целью подтверждения этого высказывания выполнялось моделирование процессов трения, происходящих при смазывании ЦПГ судового дизеля 12K98ME-C7 фирмы DOOSAN-MAN-B&W, установленного в качестве главного двигателя на судне APL Southampton дедвейтом 131360 тонн. Основные характеристики дизеля:

тип дизеля – двухтактный, крейцкопфный;

номинальная мощность – $N_{\text{ном}} = 54120$ кВт;

номинальная частота вращения – $n_{\text{ном}} = 97$ об/мин;

количество цилиндров – 12;

диаметр цилиндра – $D = 0,98$ м;

ход поршня – $S = 2,66$ м;

система смазывания ЦПГ – лубрикаторная (цилиндровая).

Смазывание ЦПГ дизеля обеспечивалось маслом Mobilgard570 фирмы Mobil, основные показатели которого приведены в табл. 1.

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

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

где v_m – средняя скорость поршня, м/с, 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 [6, 7]. 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 моторных масел Mobilgard570 (использующегося при эксплуатации судового дизеля), а также для судового моторного масла М-20Е70, основные характе-

ристики которых приведены в табл. 1. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 1. Основные характеристики моторных масел, использующихся при проведении эксперимента

Параметр, размерность	Марки моторного масла	
	Mobilgard570	M-20E70
Плотность при 15°C, кг/м ³	820	840
Кинематическая вязкость: при 40° С, сСт при 100° С, сСт	229	205
	21	18,5
Температура вспышки, °С	256	212
Общее щелочное число, мгКОН/г	70	70
Класс SAE	50	50

Таблица 2. Результаты реологических испытаний судовых масел

Тип смазочного материала и его характеристика		Частота вращения вала дизеля, n , об/мин									
		0	–	–	–	50	60	70	80	90	100
		Скорость сдвига, $\dot{\gamma}$, с ⁻¹									
		0	50	100	150	177	213	248	284	319	355
Mobilgard570	Объемная вязкость, $\nu_{об}$, сСт	228									
	Вязкость граничного слоя, $\nu_{гр}$, сСт	256	239	233	223	221	218	216	215	214	
M-20E70	Объемная вязкость, $\nu_{об}$, сСт	197									
	Вязкость граничного слоя, $\nu_{гр}$, сСт	208	198	193	186	183	178	177	175	174	

В табл. 2 для частоты вращения вала n дизеля 12K98ME-C7 и соответствующей ей скорости сдвига $\dot{\gamma}$ приведены значения полученной в лабораторных условиях объемной вязкости $\nu_{об}$, а также вязкости граничного смазочного слоя $\nu_{гр}$.

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.

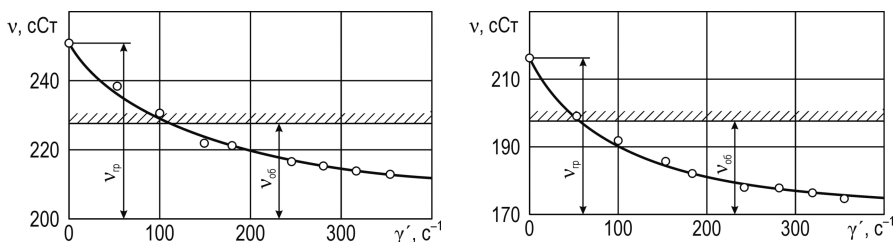


Рис. 3. Зависимость вязкости моторного масла (в граничном слое $v_{гр}$ и в большом объеме $v_{об}$) от скорости сдвига γ' при толщине масляного слоя 15 мкм: а) масло Mobilgard570; б) масло M-20E70

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Установленная в результате проведенных исследований зависимость вязкости ν от скорости сдвига γ' (рис. 3), подтверждает «неньютоновский» характер течения смазочного материала в узком зазоре пары трения поршневое кольцо – втулка цилиндра. Кроме того, полученные результаты совпадают с утверждениями, высказанными в [2, 4, 7], о том, что прилегающие к металлической поверхности триады трения граничные масляные слои более вязкие и обладают ориентационной упорядоченностью молекул.

При лабораторных исследованиях экспериментально установлено, что при увеличении линейной скорости перемещения в масляном слое возникают сдвиговые усилия, способствующие уменьшению его вязкости. Этот факт необходимо учитывать при выборе сорта масла для смазывания ЦПГ, 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 ЦПГ 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 10...12% 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.

Дальнейшие исследования предполагаются в направлении определения и изучения критической толщины смазочного слоя, обеспечивающего максимально возможное изменение вязкости смазочного материала при одновременном обеспечении заданных режимов трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм; пер. с англ. И. А. Лавыгина; под. ред. В. Г. Куличихина. – М. : Колос, 2003. – 312 с.
2. Кириян С. В. Эпитропные жидкокристаллические слои синтетических масел и их влияние на сдвиговое течение / С. В. Кириян, Б. А. Алтоиз // Физика аэродисперсных систем. – 2008. – № 45. – С. 72-77.
3. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.
4. Поповский Ю. М. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения / Ю. М. Поповский, С. В. Сагин, С. А. Ханмамедов, М. Н. Гребенюк // Вестник машиностроения. – 1996. – № 6. – С. 7–11.
5. Мацкевич Д. В. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя / Д. В. Мацкевич, С. В. Сагин, С. А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки: Одесса, 2010. – Вып. 25. – С. 109-118.
6. 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.
7. Кириян С. В. Реология моторных масел с квазижидкокристаллическими слоями в триаде трения / С. В. Кириян, Б. А. Алтоиз // Трение и износ. – 2010. – Т. 31 ; № 3. – С. 312–318.