

УДК 621.896

## ВЛИЯНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДОВОГО МАЛОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

С. В. Сагин<sup>1</sup>, Ю. В. Заблоцкий<sup>2</sup>

*Рассмотрено влияние физико-химических характеристик топлива на его триботехнические свойства. Приведены результаты испытаний и определено влияние топлив с различными триботехническими свойствами на эксплуатационные характеристики судового малооборотного дизеля.*

**Ключевые слова:** *судовой дизель, топливо для судовых дизелей, триботехнические характеристики топлива, эксплуатационные характеристики судового дизеля.*

В последние годы значительно усовершенствовались все судовые малооборотные дизели (МОД). В связи с этим изменились требования к качеству топлива, а также стало в большей степени проявляться влияние его эксплуатационных характеристик на эффективность топливоиспользования. Эксплуатационные свойства топлива влияют не только на энергетические и экономические параметры работы судового дизеля, но и непосредственно определяют его хранение, транспортировку, перекачку, подачу, а также развитие рабочего процесса [1].

Наиболее общими характеристиками качества, которые в определенном сочетании характеризуют вышеперечисленные эксплуатационные свойства топлива, являются плотность, коэффициенты кинематической и условной вязкости, температуры помутнения, начала кристаллизации и застывания, содержание механических примесей и воды, фракционный состав, температура вспышки, цетановое число, удельная теплота сгорания, содержание смол, водорастворимых кислот и щелочей, кислотность, массовая доля общей серы, сероводорода и меркаптанов, коксуемость, зольность.

При этом не всегда учитываются триботехнические характеристики судовых топлив, которые, по ряду оценок, также имеют немаловажное значение в обеспечении надежной и безотказной работы судовых дизелей [2].

**Цель статьи** – определить влияние физико-химических характеристик топлива на его триботехнические свойства и установить их влияние на эксплуатационные параметры работы судовых дизелей.

<sup>1</sup> © Сагин С.В., к.т.н, доцент Одесской национальной морской академии.

<sup>2</sup> © Заблоцкий Ю.В., к.т.н, доцент Одесской национальной морской академии.

В современных судовых МОД с целью снижения эксплуатационных расходов используются высоковязкие топлива с максимально допустимым содержанием серы. Основными топливами для судовых малооборотных дизелей являются топлива дизельное маловязкого топливо MDO, моторное средневязкое IFO 180, моторное тяжелое IFO 380 и моторное сверхтяжелое (аналог судовых мазутов) IFO 500. При особых условиях работы используют аналогичные марки топлива с низким содержанием серы IFO 180-LS (Low Sulfur) и IFO 380-LS. Эти топлива содержат широкий фракционный состав и содержат в себе:

- 1) непредельные углеводороды;
- 2) ароматические углеводороды;
- 3) асфальто-смолистые вещества;
- 4) сернистые соединения.

Непредельные углеводороды быстро окисляются и тем самым обуславливают низкую стабильность топлива. Так, при хранении топлив, в которых находится только 1 % этих углеводородов, образуются осадки, увеличивается коксуемость;

Ароматические углеводороды имеют повышенную термическую стабильность, вследствие чего для их самовоспламенения требуется более высокая температура и более длительный период задержки, чем для нафтеновых и парафиновых углеводородов.

Смолы имеют плотность от 990 до 1100 кг/м<sup>3</sup> и поэтому при сепарации топлива почти не отделяются. Они термически и химически неустойчивы и легко окисляются и уплотняются, а при нагревании расщепляются. По отношению к различным растворителям выделяют следующие основные группы смолистых веществ:

- нейтральные смолы, которые составляют большую часть смолистых веществ, содержащихся в топливе;
- асфальтены, которые находятся в топливе в небольшом количестве;
- асфальтогенные кислоты, их присутствие в топливе ускоряет процесс окисления топлива при хранении;
- карбены, которые частично растворяются в сероуглероде;
- карбоиды, которые не растворяются ни в каких растворителях.

Карбены и карбоиды представляют собой коксообразные вещества, образующиеся в остаточных продуктах термокаталитической переработки прямогонных фракций. Обладая абразивными свойствами, они увеличивают износ прецизионных пар топливной аппаратуры, а при неблагоприятных условиях для сгорания также износ деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателя.

Среди определяемых соединений серы находятся: элементарная сера, сероводород и группа с невысоким молекулярным весом - меркаптаны,

сульфиды и дисульфиды. Особенно вредны меркаптаны. Они коррозионно активны и вызывают коррозию и усиленное смолообразование в топливной аппаратуре. Коррозия особенно усиливается в присутствии воды.

Анализ работоспособности основных узлов и деталей судовых МОД фирм «МАН – Бурмейстер и Вайн» и «Вяртсиля–Зульцер» показывает, что от качества топлива и его фракционного состава зависит работа, главным образом, деталей ЦПГ, топливной аппаратуры и выпускных клапанов, т.е. деталей, непосредственно контактирующие с топливом и продуктами его сгорания (табл. 1).

Таблица 1

**Распределение отказов по основным узлам дизелей  
«МАН – Бурмейстер и Вайн» и «Вяртсиля–Зульцер»**

Узлы и детали	Количество отказов, %	
	«МАН – Бурмейстер и Вайн»	«Вяртсиля–Зульцер»
Цилиндровые крышки с клапанами	11,8	11,3
Детали ЦПГ	15,8	10,8
Выпускные клапаны	18,5	12,3
Подшипники движения	5,5	17,9
Топливная аппаратура	21,7	28,6
Газотурбонагнетатели и коллекторы	5,0	5,8
Механизмы и системы, обслуживающие двигатель	14,0	4,7
Прочие узлы и детали	7,7	8,4
Итого	100	100

На работу этих деталей основное влияние оказывают механические примеси (карбены, карбоиды и частицы неорганического происхождения), меркаптановые соединения серы, вода (особенно морская) и различные соли, которые при сгорании переходят в золу [3].

Однако, до последнего времени судовая техника не располагает методами и средствами нейтрализации вредного действия всех перечисленных примесей. Достаточно эффективно решен лишь вопрос по снижению в топливе механических примесей, воды и (в меньшей степени) золы. От количества механических примесей и размеров отдельных частиц этих примесей зависит работоспособность насосных элементов топливной аппаратуры [4].

Частицы органического происхождения (карбены и карбоиды) могут нарушать работу прецизионных пар топливных насосов и форсунок, вызывая зависание плунжеров и игл. Такие частицы заполняют зазоры прецизи-

онной пары и в результате их пластичной деформации и сцепления с трущимися поверхностями вызывают заклинивания движущихся деталей.

Заклинивание плунжеров и форсуночных игл может происходить из-за попадания в зазор прецизионной пары также частицы неорганического происхождения (песок, ржавчина и др.).

Износ трущихся поверхностей деталей прецизионных пар зависит как от размеров частиц неорганического происхождения, так и от их количества в топливе (рис. 1). Эта зависимость имеет степенной характер [5].

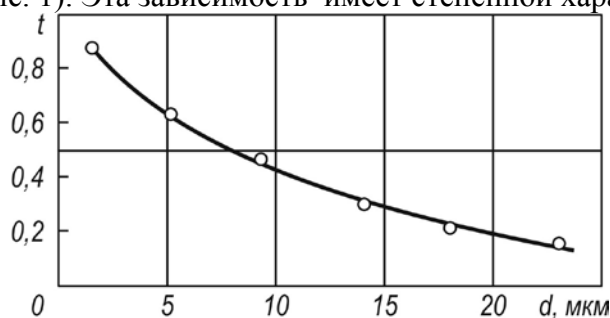


Рис. 1. Влияние размера частиц неорганического происхождения на износ прецизионных пар:

$t$  – относительный срок службы сопряженных пар;  
 $d$  – тонкость отсева частиц фильтром, мкм.

Наличие воды в топливе вызывает коррозионное разрушение поверхностей деталей прецизионных пар, причем оно значительно интенсифицируется при возрастании количества сернистых соединений. Частным видом коррозионного износа является окислительный, представляющий собой процесс образования на поверхности деталей пленки окислов вследствие адсорбции кислорода, растворенного в топливе. В процессе трения окисные пленки разрушаются и создают продукты износа, состоящие из окислов металла. Этот вид износа наблюдается обычно в условиях граничного трения, когда происходит местный контакт поверхностей, сопровождающийся пластической деформацией и насыщением поверхностных слоев металла кислородом, растворенным в топливе, и непосредственно из воздуха. По мере возрастания толщины окисных пленок последние становятся хрупкими, и от внутренних напряжений, а также под действием гидравлических ударов струй топлива, происходит их разрушение, при этом обнажаются нижележащие участки поверхности металла и процесс разрушения повторяется.

Описывая процессы коррозионного изнашивания и влияния окисных пленок на триботехнические характеристики пар трения топливной аппаратуры, необходимо учитывать, что в реальных условиях поверхность металла всегда несет на себе сложную систему адсорбционных слоев (рис. 2).

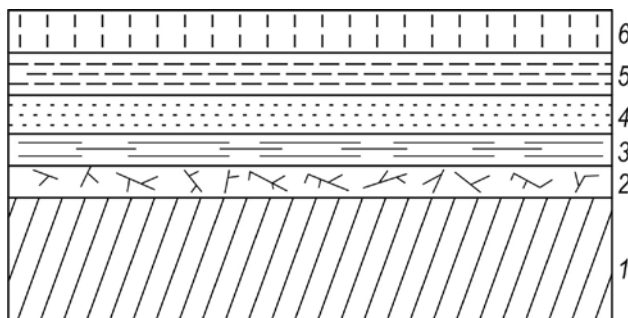


Рис. 2. Схема основных видов адсорбционных слоев на поверхности металла:  
 1 - первичная объемная структура металла; 2 - зона деформированного металла;  
 3 - слой окислов металла; 4 - адсорбционный слой газов; 5 - адсорбционный слой воды;  
 6 - адсорбционный слой полярных молекул

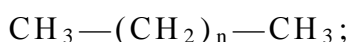
Непосредственно над ювенильной поверхностью металла обычно находятся слои его окислов. Такие оксидные пленки прочно связаны с металлом, имеют различную толщину, достигающую несколько десятков ангстрем, и отчасти проникают через устья микродефектов на внутреннюю поверхность. Именно эта окисленную поверхность получается в результате обычных методов ее очистки.

Кроме того, на поверхности окисленного слоя присутствуют:

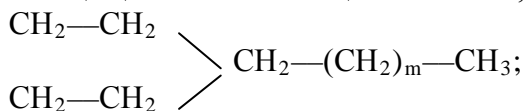
- адсорбционные слои газов (обычно воздуха);
- адсорбционные слои воды различной толщины, образующиеся во всех случаях, когда металл соприкасается со средой, содержащей водяные пары;
- адсорбционные слои полярных и неполярных молекул органических веществ (т.е. смазки).

При рассмотрении структуры таких низкомолекулярных углеводородных жидкостей как топлива необходимо учитывать, что в их составе имеются полярные молекулы поверхностно-активных веществ (ПАВ).

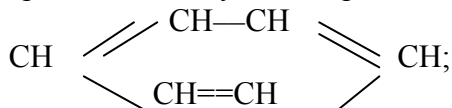
Топлива содержат углеводороды с концевыми метильными группами:



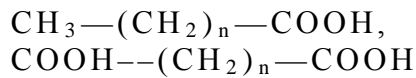
кольца циклопентана и циклогексана, имеющих боковые цепи,



ароматические углеводороды с бензольными кольцами



жирные кислоты



и другие.

Наличие углеводов с длинными цепями, т.е. с большим молекулярным весом позволяет топливам обладать довольно высокими антифрикционными свойствами. Углеводородных жидкостей коэффициент трения  $f_{\text{тр}}$  является линейной убывающей функцией молекулярного веса  $M$ , и соответственно длины углеродной цепи  $L$ :  $f_{\text{тр}}=b-aM$ . На рис. 3 показана зависимость коэффициента статического трения  $f_{\text{мп}}$  от молекулярного веса смазочного материала, нанесенного в виде тонкого граничного слоя. На рис. 4 приведена зависимость коэффициента трения  $f_{\text{мп}}$  и угла смачивания  $\theta$  числа углеродных атомов  $N$  для жирных кислот [6].

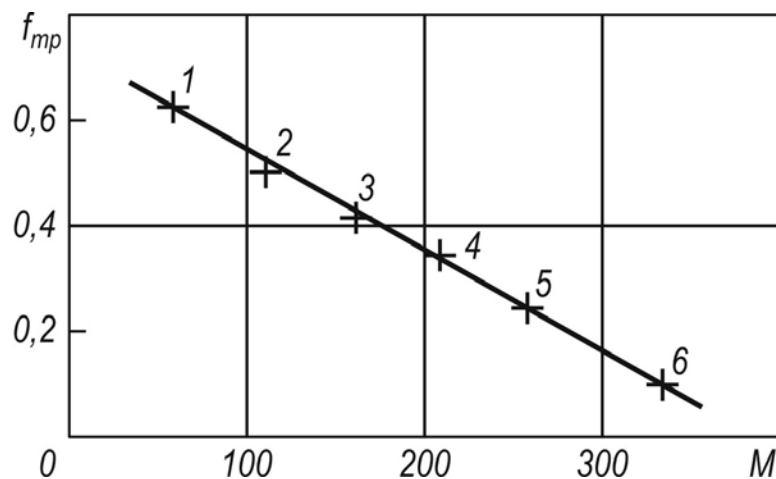


Рис. 3. Зависимость коэффициента статического трения  $f_{\text{мп}}$  от молекулярного веса  $M$  смазочного материала:  
1 – пентан; 2 – гексан; 3 – гептан; 4 – октан; 5 – ундекан; 6 – нонадекан

Полярность молекул химических соединений, составляющих жидкость, придает ей особые свойства [6, 7]. В объеме всем таким молекулам свойственна склонность к объединению в результате взаимодействия углеводородных структур, групп и диполей. Объединение может происходить как в направлении, перпендикулярном оси молекул (и тогда образуются жидкие пластины), так и вдоль осей цепочных структур (при этом возникают длинные гибкие макромолекулы). В обычном диапазоне температур

молекулы углеводородных жидкостей силами взаимодействия активных частей связаны в агрегаты – мицеллы.

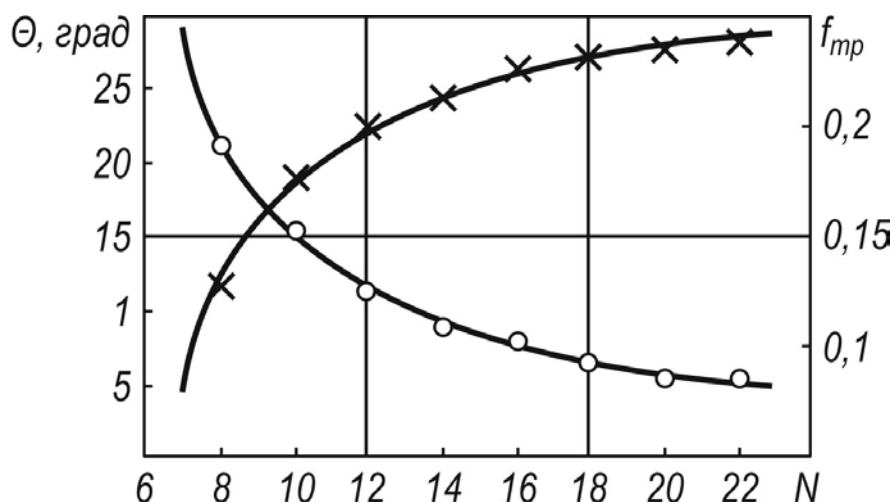


Рис.4. Зависимость коэффициента трения  $f_{тр}$  (x) и угла смачивания  $\theta$  (o) от числа углеродных атомов  $N$  для жирных кислот

Для того, чтобы составить полное представление о структуре топлив как низкомолекулярных углеводородных жидкостей, необходимо учесть возможность образования в топливах поверхностей раздела фаз (капли воды и пузырьки газа), появление твердых поверхностей (механические примеси). По границам раздела фаз и на твердых поверхностях происходит адсорбция ПАВ с образованием новых структурных комплексов. При адсорбции на твердых поверхностях, молекулы жидкости способны переходить в особое состояние – так называемых жидких кристаллов (или квазикристаллическое состояние, т.е. состояние, промежуточное между жидким и твердокристаллическим).

Для жидких кристаллов характерно определенное расположение молекул – длинными осями параллельно друг другу. Различают более строгое – смектическое (пластинчатое) строение жидких кристаллов, когда параллельно ориентированные молекулы расположены слоями, и более свободное – нематическое (нитевидное) строение, при котором параллельно ориентированные молекулы располагаются беспорядочно.

Жидкие кристаллы обладают свойствами и жидкостей и кристаллических тел. С последними их роднит анизотропия свойств, в том числе механических. Так, смектические структуры обладают малым сопротивлением

скольжению (сдвигу) параллельно слоям и большим – в направлении, перпендикулярном слоям. На образование жидкокристаллических структур влияет величина диполя молекул и силовое поле твердой поверхности. Структура топлив, длина цепей молекул в них, существенным образом влияет на противоизносные свойства (см. рис. 3, 4). Собственно, актуальность проблемы повышения противоизносных свойств топлив, используемых не только в судовых дизелях, и заставила глубоко изучить структуру и химический состав у низкомолекулярных углеводородных жидкостей. Противоизносными свойствами жидкость обладает в том случае, когда обработанные ей металлы при трении имеют меньший износ и большую критическую нагрузку заедания (схватывания), чем в эталонных условиях. Эталонными условиями может быть сухое трение этих же металлов или трение их в специально подобранной жидкости, определяемой как эталон. При этом внешние условия трения – нагрузка, скорость, геометрия контакта – должны быть одинаковыми при испытании жидкости и эталона.

Когда наряду с уменьшением износа и увеличением критической нагрузки заедания трущейся пары жидкость снижает силы трения или уменьшает коэффициент трения, то такие свойства жидкости называют смазывающей способностью [2]. Смазывающая способность жидкости (топлива) оценивается по величинам износа, критической нагрузке заедания металлов и сил трения (коэффициента трения). В ряде случаев более важной для практики характеристикой низкомолекулярных углеводородных жидкостей являются их противоизносные свойства, а не смазочная способность. Это объясняется тем, что для многих агрегатов (топливных, гидравлических), работающих в среде низкомолекулярных углеводородных жидкостей, более важна защита их от повышенного износа, чем некоторое снижение мощности привода вследствие уменьшения сил трения.

Для углеводородных жидкостей соблюдается такое правило: улучшение противоизносных свойств приводит к улучшению смазывающей способности. Но из этого правила есть исключения, прежде всего, при граничном трении. В этом случае определяющую играют особые «квазикристаллические» свойства смазки, которые зачастую не описываются расчетными методами, а определяются экспериментально [6, 7]. Смазочное действие жидкостей, в том числе и топлив, в реальных условиях работы машин и механизмов проявляет себя в сложной совокупности, определяемой условиями трения. В связи с этим исследование смазочной способности низкомолекулярных углеводородных жидкостей, которыми являются топлива, должно носить комплексный характер, обеспечивающий не только получение количественных зависимостей характеристик трения и износа, но и раскрытие тех физико-химических процессов, которые характеризуют трение и износ.



Безаварийная работа топливной аппаратуры при больших сроках ее службы между профилактиками является необходимым условием надежности двигателя в целом. Известны три основные группы причин неисправностей: конструктивные, производственные и эксплуатационные.

Конструктивные и производственные причины выхода из строя топливной аппаратуры связаны с качеством материала, его обработки, контроля и сборки отдельных узлов. Эксплуатационные причины выхода из строя топливной аппаратуры обычно заключаются в плохом качестве очистки топлива, в низком уровне технической эксплуатации, в наличии больших вибраций двигателя.

Таким образом, тяжелые условия работы топливной аппаратуры выдвигают повышенные требования к триботехническим характеристикам как самих прецизионных пар, так и топлив, используемых в МОД.

Для подтверждения этого на судовом МОД 6L42MC фирмы «МАН-Бурмейстер и Вайн» проводились испытания топлив с различными триботехническими свойствами. За базовую триботехническую характеристику принимался условный коэффициент трения  $f_{mp}$ , который обеспечивает топливо в паре трения при лабораторных испытаниях [2]. В качестве эксплуатационных характеристик определялись температура газов перед газотурбокомпрессором и максимальное давление сгорания, которые измерялись с помощью штатных средств диагностики. Эти параметры относятся к основным, по которым происходит регулирование рабочего процесса дизеля и определение рассогласования нагрузки по цилиндрам.

Исследования проводились для разных сортов судового топлива: маловязкого MDO, средневязкого IFO 180 и IFO 180-LS, тяжелого IFO 380 и IFO 380-LS. Результаты исследований приведены в табл. 2 и на рис. 5, 6, 7.

Рассмотрим представленные результаты.

Увеличение коэффициента трения  $f_{mp}$  для топлив происходит в соответствии с увеличением их вязкости и ухудшением их фракционного состава (в частности, с уменьшением процентного состава углеводородных групп и увеличением процентного состава сернистых соединений).

При использовании топлив с худшими триботехническими характеристиками возрастает температура газов перед ГТН, а вместе с ней и тепловые нагрузки на весь дизель.

Возрастание степени рассогласования величины максимального давления сгорания по цилиндрам дизеля свидетельствует о повышении триботехнических потерь в элементах топливной аппаратуры дизеля и худшем распыливании топлива.

Таблица 2

Результаты исследований триботехнических характеристик топлив и эксплуатационных свойств судового малооборотного дизеля

Марка топлива	Коэффициент трения, $f_{тр}$ , усл. единицы	Средняя температура газов перед ГТН, $t_{ср}$ , °C	Максимальное отклонение температуры газов перед ГТН от среднего значения, %	Максимальное давление сгорания, $p_z$ , МПа	Отклонение максимального давления сгорания от среднего значения, %	Удельный эффективный расход топлива, $b_e$ , г/(кВт·час)
MDO	1,0	350	2,3	13,1	1,05	176
IFO 180-LS	1,08	353	2,7	13,1	1,14	182
IFO 180	1,12	355	2,95	13,2	1,37	184
IFO 380-LS	1,23	360	3,25	13,15	1,78	187
IFO 380	1,37	363	3,3	13,2	1,9	189

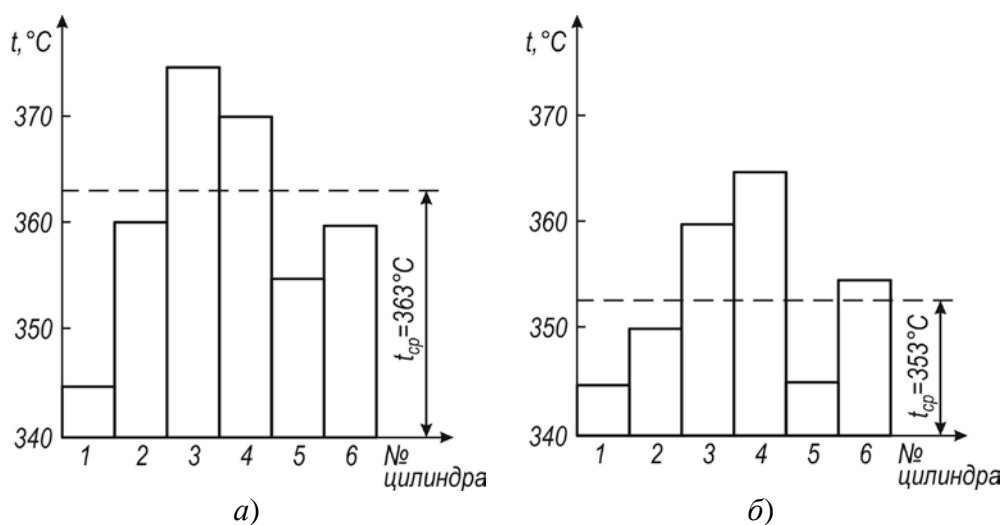


Рис.5. Рассогласование температуры газов перед ГТН по цилиндрам судового дизеля 6L42MC при работе на различных топливах:  
 а – высоковязкое IFO 380; б – средневязкое с низким содержанием серы IFO 180-LS

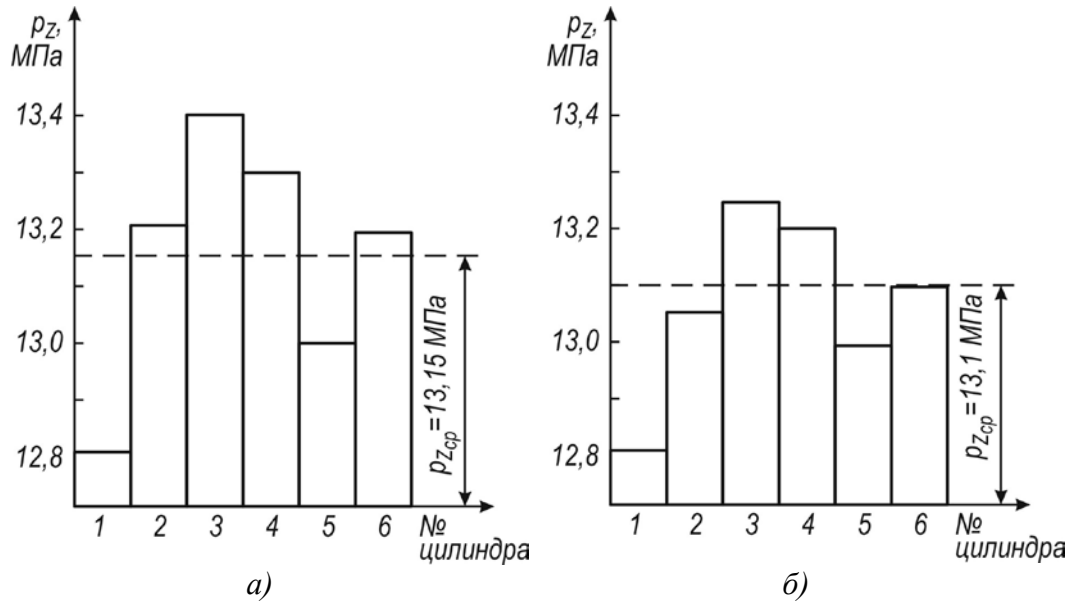


Рис. 6. Рассогласование максимального давления сгорания по цилиндрам судового дизеля 6L42MC при работе на различных топливах:  
 а – высоковязкое IFO 380; б – средневязкое с низким содержанием серы IFO 180-LS

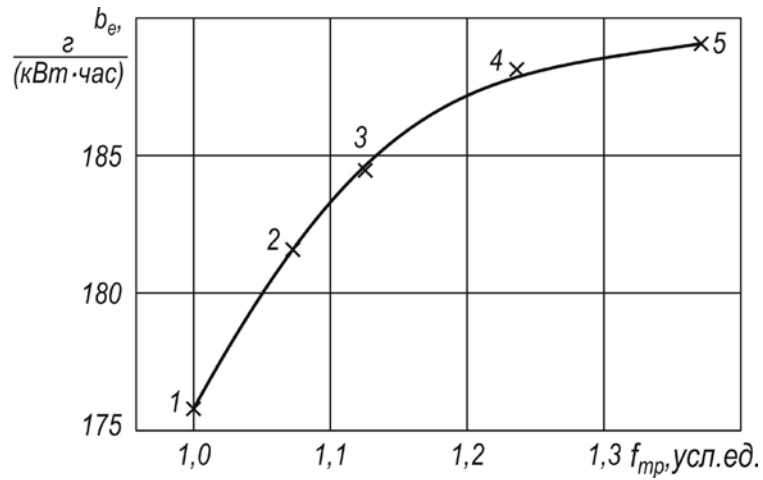


Рис. 7. Зависимость удельного эффективного расхода топлива  $b_e$ , г/(кВт·час), от условного коэффициента трения  $f_{тр}$ , усл.ед., различных топлив:  
 1 – MDO; 2 – IFO 180-LS; 3 – IFO 180; 4 – IFO 380-LS; 5 – IFO 380

**Выводы**

1. Триботехнические свойства топлива оказывают прямое влияние на эксплуатационные параметры работы судовых дизелей.
2. В качестве комплексного параметра, определяющего триботехнические характеристики судовых топлив, может быть принят условный коэффициент трения, который определяется экспериментально на лабораторной установке, моделирующей процессы трения в трибосопряжениях судовых дизелей.
3. Уменьшение процентного состава углеводородных групп в составе топлива ухудшает его триботехнические характеристики.
4. Существует корреляционная зависимость между триботехническими свойствами топлива и эксплуатационными (как энергетическими, так и экономическими) параметрами работы судового дизеля. Качественно она может быть определена зависимостью удельного эффективного расхода топлива от коэффициента трения.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.
2. Мацкевич Д.В., Заблоцкий Ю.В. Определение смазочной способности дизельных топлив // Судовые энергетические установки: Науч.-техн. сб. – Одесса: ОНМА, 2011. – № 28. – С. 145–153.
3. Кодымский Э.И. Особенности технической эксплуатации судовых малооборотных дизелей. – Одесса: Латстар, 2002. – 132 с.
4. Васькевич Ф.А. Повышение эффективности эксплуатации дизелей методами регулирования и диагностики топливной аппаратуры. – Новороссийск: МГА, 2009. – 174 с.
5. Березовский Ф.М. Основы трибологии и работоспособность транспортной техники. – Новороссийск: НГМА, 2002. – 148 с.
6. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматиз, 1963. – 472 с.
7. Мацкевич Д.В., Сагин С.В. Диагностирование структурного состояния углеводородных жидкостей по их электрической прочности // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – Одесса: ІНТЕРПРИНТ, 2012. – № 2. . – С. 38–46.

*Рукопись поступила в редакцию 13.12.2012 г.*