

УДК 621.436

Заблоцкий Ю.В.  
ОНМА

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА РАБОТУ ЭЛЕМЕНТОВ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

В ряде работ, посвященных вопросам исследования поведения углеводородных жидкостей (топлива и масла) вблизи металлических поверхностей, было определено наличие особой жидкокристаллической структуры, при котором молекулы жидкости обладают ориентационной упорядоченностью и характеризуются квазикристаллическими свойствами [1, 2]. Для двигателей внутреннего сгорания узлами, где наиболее отчетливо могут проявляться такие свойства, в первую очередь, являются пары трения вал – вкладыш подшипника [1], поршневое кольцо – втулка цилиндра [3], плунжер золотника – втулка топливного насоса высокого давления (ТНВД) [4].

Среди характеристик топлив, традиционно отмечается лишь их способность к самовоспламенению и сгоранию в цилиндре дизеля, при этом редко уделяется внимание еще одной их характеристике – смазочной способности. Причем именно смазочная способность обеспечивает качественную и надежную работу топливной аппаратуры дизеля, которая в свою очередь является одним из ответственных узлов любого двигателя. Понятие «смазочной способности» топлива не актуально для «объемных зон» топливной системы таких как трубопроводы, фильтра, сепараторы (за исключением, может быть, винтовых и шестеренчатых топливных насосов). Однако для элементов топливной аппаратуры высокого давления, где зазор между контактируемыми поверхностями определяется несколькими микрометрами, понятие «смазочная способность топлива» является более чем актуальным [5].

В вопросе обеспечения смазочных функций топлива важную роль играют силы поверхностного натяжения, которые для условий граничного смазывания (характерного для пары плунжер – втулка ТНВД) характеризуются анизотропией коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$ .

Суть этого эффекта заключается в том, что в зависимости от типа ориентации молекул в граничном слое топлива величина  $\sigma$  для одного и того же сорта топлива может быть различной.

Обычно смачивание происходит, когда поверхностное натяжение твердого тела  $\sigma_t$  больше поверхностного натяжения материала  $\sigma_m$ . При  $\sigma_m < \sigma_t$  смазочный материал смачивает поверхность узла трения. Обычно материалы, для которых  $\sigma_t < \sigma_m$  гомеотропно ориентируют молекулы смазочного материала, тогда как при  $\sigma_t > \sigma_m$  происходит ориентация молекул в плоскости подложки. Разность  $\Delta\sigma = \sigma_m - \sigma_t$  является мерой свободной энергии, определяющей вероятность возникновения молекулярной ориентации смазочного материала нормальной к поверхности материала элемента узла трения. Наибольшую стабильность и лучшую ориентацию будут иметь молекулярные слои, в которых комбинация смазочного материала в том, числе и топлива, с поверхностью узла дает большие  $|\Delta\sigma|$  от 5 до 15 кДж/м<sup>2</sup> [6].

Однако, одного выбора материалов для узлов трения топливной аппаратуры является недостаточным, необходимо также рассмотреть технологии обработки поверхностей узлов трения.

Для образования однородного ориентирования молекул топлива в смазочных слоях большую роль играет обработка поверхности узла трения. С целью усиления ориентирующего действия на молекулы смазки различают следующие виды и способы обработки узлов трения:

- 1) химические методы подготовки поверхности;
- 2) механические методы подготовки поверхности;
- 3) нанесение на поверхности узла трения неорганических покрытий;
- 4) методы модификации поверхностей трения под воздействием различных физических полей.
- 5) нанесение на поверхности узла трения органических пленок;

Для условий эксплуатации морского судна последний метод является наиболее подходящим, поскольку требует минимальное количество трудозатрат и практически не зависит от использования дополнительного оборудования.

В настоящее время используют два способа нанесения органических пленок на поверхности трения: собственно обработку поверхности специальными реагентами и применение объемных добавок.

В первом случае на чистые поверхности узла трения наносят тонкие пленки вещества, молекулы которого адсорбируются своими полярными группами к металлу. Углеводородные части молекул располагаются перпендикулярно поверхности и создают гомеотропную ориентацию.

Объемные добавки, такие как жирные кислоты, действуют точно так же, но их необходимо вводить непосредственно в топливо. В этом случае ориентация определяется плотностью адсорбированных на поверхности молекул: при плотности  $10^{13} \dots 10^{14}$  молекул/см<sup>2</sup> происходит гомеотропная ориентация, а при меньшей плотности – планарная. Это объясняется межмолекулярным взаимодействием между молекулами органических покрытий. Когда плотность велика, концевые группы сильно взаимодействуют между собой, что и приводит к их гомеотропной ориентации. При небольшой плотности слабовзаимодействующие концевые группы располагаются параллельно металлическим поверхностям [7].

Заметим, что действие органических пленок на поверхностях трения до некоторой степени избирательно: определенные покрытия эффективно действуют только на определенные поверхности. Однако, к вопросу о закономерности действия органических пленок на молекулярные слои топлива можно подойти и с макроскопических позиций. Поверхность твердого тела характеризуется критическим поверхностным натяжением  $\sigma_{\text{тк}}$ , а жидкость поверхностным натяжением  $\sigma_{\text{м}}$ . При взаимодействии жидкости с поверхностью твердого тела при  $\sigma_{\text{м}} < \sigma_{\text{тк}}$  происходит смачивание, а при  $\sigma_{\text{м}} > \sigma_{\text{тк}}$  жидкость не смачивает поверхность. Взаимодействие смазочного материала с поверхностью, покрытой органической пленкой, можно трактовать как процесс смачивания. Гомеотропную ориентацию можно рассматривать как отсутствие смачивания, а планарную – как смачивание. Действительно, анализ поверхностных натяжений топлив и материалов узлов трения топливной аппаратуры, обработанных ориентантами, подтверждает такой подход [2].

Таким образом, величина  $\Delta\sigma = \sigma_{\text{м}} - \sigma_{\text{т}}$ , значение которой может являться мерой свободной энергии на единицу площади поверхно-

сти, определяющей ориентацию за счет физических процессов взаимодействия молекул ориентанта и смазочного материала.

Технологий процесса управления структурированием молекул в пристенных слоях топлива за счет использования органических пленок осуществлялась на примере топлива IFO380 и поверхностей прецизионных пар, выполненных из стали ШХ15. В качестве органического покрытия была взята перфторкислота  $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7\text{COOH}$ , представляющая высокомолекулярное фтористое соединение и относящаяся к классу эпиламов.

Метод эпиламирования, примененный для пары плунжер – втулка, не получил широкого распространения в элементах судовых технических средств. Это, в том числе, связано с консервативностью судовой энергетики как науки и стремлением судового экипажа избежать дополнительных рисков, возникающих при внедрении инновационных идей. Особенно это касается таких ответственных узлов, как топливная аппаратура.

Одним из важнейших преимуществ эпиламирования является то, что оно не меняет структуру обрабатываемой твердой поверхности, а лишь модифицирует ее, придавая поверхности антифрикционные, антиадгезионные, защитные и другие полезные свойства. Практически неизменными остаются и геометрические размеры обрабатываемых деталей – толщина защитного слоя составляет примерно  $100..150 \text{ \AA}$  ( $0,01...0,015 \text{ мкм}$ ).

Эпиламы представляют собой многокомпонентные системы, включающие фторорганические поверхностно-активные вещества в различных растворителях и регулирующие добавки. Ограничение использования эпиламов в судовой техники также связано с относительно низкими температурами, до величин которых происходит эффективное использование их свойств. В ряде источников [4] эти значения ограничивались величинами  $100...120^\circ\text{C}$ , однако подобные данные относятся к первому поколению данных препаратов. Для современных эпиламов (полизам, амидофен, амидоамин, трибофол, эфрен и др.) максимальные температуры их эксплуатации достигают  $600...700^\circ\text{C}$ . Таким образом, данные модификаторы поверхности вполне обоснованно могут использоваться для таких узлов трения, как прецизионная пара плунжер – втулка ТНВД, работающей в диапазоне температур до  $150^\circ\text{C}$ .

Механика взаимодействия эпиламов с поверхностью твердого тела выглядит следующим образом: при эпиламировании формируется слой ориентированных молекул, радикально меняющих энергетические воздействия поверхности твердого тела. Молекулы, закрепляемые за счет сил хемосорбции, образуют структуры Ленгмюра в виде спиралей с нормально направленными к поверхности материала осями. При покрытии металлических поверхностей (за исключением чистого титана) спиралевидные молекулы в состоянии захватывать электроны в тех местах поверхности, где особо высока электронная плотность, и тем самым «высаживаться» на поверхность. Места с повышенной электронной плотностью образуются на тех участках металлической поверхности, где имеются нарушения кристаллической решетки. Молекулы эпилама вступают во взаимодействие с этими электронами, образуя совместную электронную структуру, что обуславливает особо высокое сцепление эпилама с поверхностью субстрата. Постоянно действуют и другие (более слабые) силы сцепления, например, в виде Ван-дер-Ваальсовских сил и т.п.

Технология нанесения эпилама на поверхности плунжера и втулки, заключалась в следующем.

Для исследования процессов адсорбции органических пленок на поверхности, прецизионной пары были приготовлены образцы из стали ШХ 15 в виде пластин  $80 \times 15$  мм, рабочая поверхность которых доводилась до состояния «оптически» полированной поверхности. Первоначально поверхности визуально обследовались и в случае необходимости очищались от посторонних примесей. Далее проводилось их обезжиривание в озонобезопасном хладагенте 116 ( $C_2F_6$ ) путем объемного погружения с последующим высушиванием. После этого проводилось непосредственно эпиламирование. С интервалом 30 секунд образцы извлекались из раствора и после сушки на воздухе измерялась толщина нанесенной органической пленки на эллипсометрической установке [3], позволяющей с помощью анализа углов отражения свет от чистой поверхности и от поверхности с нанесенным покрытием определить толщину слоя эпилама. Результаты этих измерений приведены на рис.1.

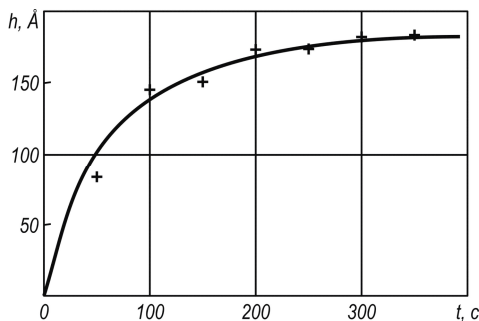


Рис. 1. Зависимость толщины органической пленки на стали ШХ 15 от времени выдержки в растворе

Как видно из рис. 1, после 180 с выдержки в растворе толщина адсорбционной органической пленки на подложке стабилизируется и составляет  $h = 150 \pm 20 \text{ Å}$ .

Эпиламирование поверхностей способствует образованию на них более прочных граничных смазочных слоев топлива, характеризующихся как повышенной степенью упорядоченности молекул, так и толщиной. Это факт был подтвержден измерением оптической анизотропии граничных слоев топлива с помощью метода двойного лучепреломления [8]. Результаты этих исследований показаны на рис. 2, где приведена зависимость разности фаз, вызванной оптической анизотропией, от обратной ширины световода, заполненного исследуемым топливом. Угол наклона первоначального участка этой графической зависимости пропорционален степени ориентационной упорядоченности молекул, а точка перегиба определяет удвоенную толщину граничного слоя.

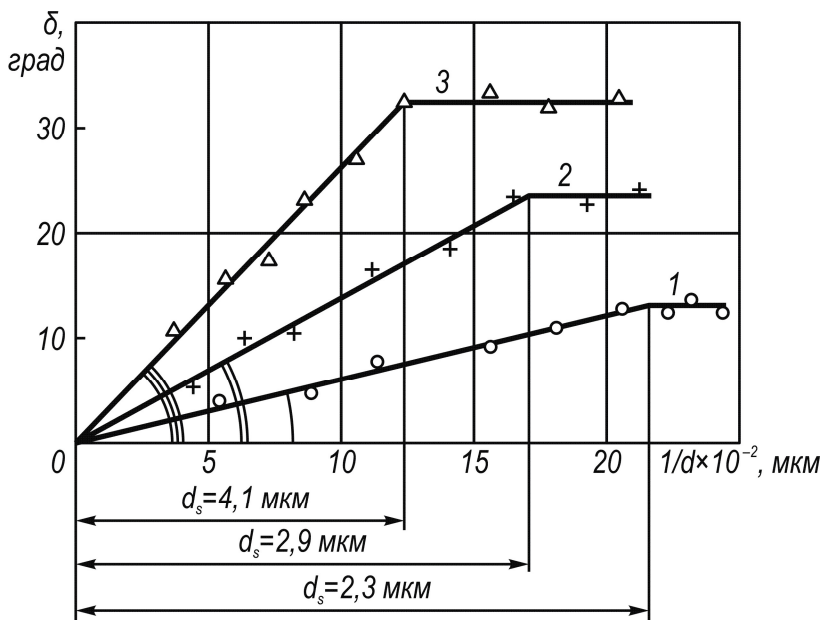


Рис. 2. Зависимость разности фаз  $\delta$ , вызванной оптической анизотропией, от обратной ширины световода  $1/d$ , заполненного топливом IFO380, для различного состояния металлической поверхности: 1 – поверхность без нанесения эпилама; 2 – эпиламирование поверхности в течении 100 с;

3 – эпиламирование поверхности в течении 300 с

Проведенные исследования показали, что в пристенных слоях топлива IFO380 удастся реализовать создание ориентационно упорядоченного слоя как с гомеотропной, так и с планарной структурой.

Для топлива IFO380 поверхностное натяжение составляет  $\sigma_m = 28$  Дж/м<sup>2</sup>. Тогда  $\Delta\sigma = \sigma_m - \sigma_t$  и должна иметь место гомеотропная ориентация. С другой стороны на стали, покрытой мономолекулярным слоем перфторкислоты  $\sigma_t = 44$  Дж/м<sup>2</sup>, в этом случае  $\Delta\sigma < 0$  и наблюдается планарная структура. Измерения с использованием структурно чувствительных методов в полной мере подтвердили приведенные в утверждении.

Триботехнические исследования проводились на экспериментальной установке, позволяющей определять силу трения  $F_{тр}$  в сопряжении плунжер – втулка в зависимости от нормальной нагрузки  $N$  [8]. Трущиеся образцы были выполнены из стали ШХ 15.

Диапазон изменения нагрузки и скорости был выбран таким, чтобы прецизионная пара работала в режиме граничной смазки. На рис. 3, а приведены результаты измерения силы трения  $F_{тр}$  в зависимости от нормальной нагрузки  $N$  на узел трения при объемной температуре топлива  $t=60$  °С и скорости скольжения 0,8 м/с. Резкий подъем значения силы трения  $F_{тр}$  при увеличении нагрузки  $N$  обусловлен деструкцией граничного смазочного слоя. Приведенные результаты показывают, что большую нагрузку выдерживают структурированные слои топлива, образованные на предварительно эпиламированной металлической поверхности (кривая 2), наименьшее значение наблюдается в случае эксплуатации металлической поверхности без нанесения органических покрытий (кривая 1).

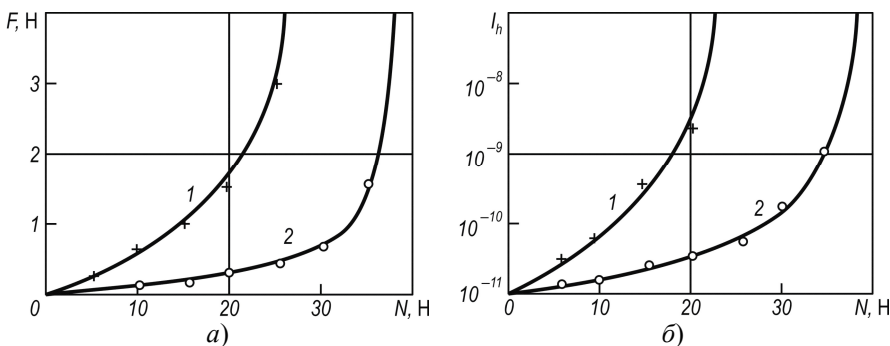


Рис. 3. Зависимость силы трения  $F_{тр}$  (а) и интенсивности изнашивания  $I_h$  (б) в сопряжении плунжер – золотник ТНВД от нормальной нагрузки  $N$

К аналогичным результатам привели и испытания на износ (рис. 3, б), из которого видно, что наименьшая интенсивность изнашивания  $I_h$  наблюдается в случае реализации явления структурирования граничного слоя топлива.

Дальнейшие исследования рассматриваемого способа управления процессами трения за счет ориентации молекул в смазочных слоях топлива были проведены на судовом дизеле 6Г60. Задачей было снижение интенсивности изнашивания за счет использования структурирования молекул в граничных смазочных слоях топлива. Для этой цели по указанной выше методике производилось эпиламирование поверхностей плунжера и втулки ТНВД. Эпиламированию подвергались плунжера и втулки ТНВД одного из дизелей, топлив-

ная аппаратура второго дизеля эксплуатировалась в штатном режиме.

Результаты испытаний приведены на рис.4, из которого следует, что реализация в граничных слоях топлива ориентированной структуры молекул позволяет в значительной степени снизить интенсивность изнашивания плунжерных пар ТНВД, повысив таким образом надежность и долговечность работы данного узла дизеля.

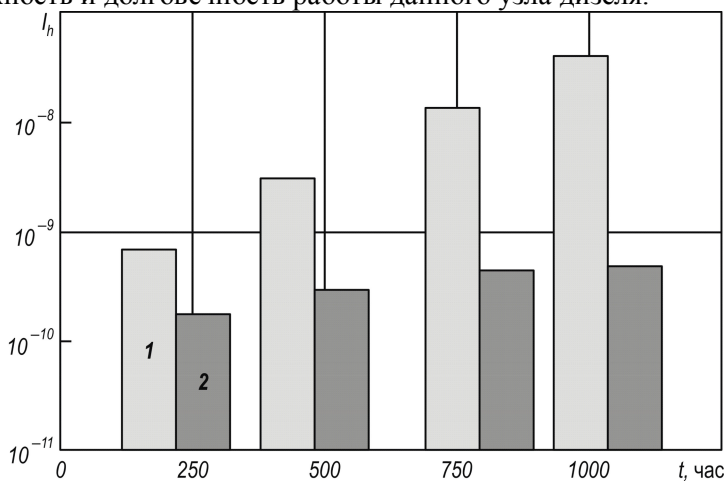


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания  $I_h$  плунжерных пар ТНВД от времени работы  $t$  судового дизеля 6Г60

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сагин С. В. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения / С. В. Сагин, Ю. М. Поповский, М. Н. Гребенюк // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – Одесса: ОГМА. – С.102-104.

2. Кардаш В. П. Повышение эффективности эксплуатации судовых устройств / В. П. Кардаш, С. А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – Одесса : ОНМА, 2007. – Вып. 18. – С. 70-77.

3. Слободянюк Д. И. Расклинивающее давление в тонких пленках цилиндрического масла на чугунных поршневых кольцах судовых дизелей / Д. И. Слободянюк, М. А. Колегаев, И. М. Слободянюк // Про-

блеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2013 . – № 2. – Одесса: ОНМУ. – С. 43-51.

4. Заблоцкий Ю. В. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей / Ю. В. Заблоцкий, В. Г. Солодовников // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 46-56.

5. Мацкевич Д. В. Определение смазочной способности дизельных топлив / Д. В. Мацкевич, Ю. В. Заблоцкий // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2011. – № 28. – Одесса: ОНМА. – С.145-153.

6. Алтоиз Б. А. Физика приповерхностных слоев жидкости / Б. А. Алтоиз, Ю. М. Поповский. – Одесса : Астропринт, 1996. – 152 с.

7. Де Жен П. Физика жидких кристаллов : пер. с англ. / П. Де Жен. – М. : Мир, 1977. – 324 с.

8. Сагин С. В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей / С. В. Сагин, Ю. В. Заблоцкий // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012 . – № 4. – Одесса: ОНМУ. – С. 68-81.