

УДК 621.436

**ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ,
ПРОТЕКАЮЩИЕ В ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЕ
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ****С.В. Сагин¹**

Рассмотрены триботехнические процессы, протекающие в топливной системе высокого давления судовых дизелей. Указаны основные виды износа и дефекты структуры рабочих поверхностей топливных насосов высокого давления и форсунок. Показаны наиболее интенсивные зоны изнашивания прецизионных пар топливной системы высокого давления, а также интенсивность распределения износа по длине элемента.

Ключевые слова: судовая топливная система высокого давления, прецизионная пара, износ топливной аппаратуры

Цель работы: изучить триботехнические процессы, протекающие в прецизионных парах топливной системы высокого давления судовых двигателей внутреннего сгорания; выполнить анализ интенсивности распределения износа по длине пар трения плунжер – втулка топливного насоса высокого давления и игла – распылитель форсунки.

Длительная эксплуатация судовых дизелей без существенных изменений показателей рабочего процесса в большей степени зависит от состояния топливных насосов и форсунок, надежность работы которых в основном определяется триботехническими показателями – качеством изготовления и состоянием прецизионных пар. Обычно оценку надёжности ведут по изменению линейного размера одной детали либо по изменению линейных размеров сопряженных деталей (зазоров) [1].

Как правило, известно предельно допустимое значение размера $h_{\text{пред}}$, при износе до которого детали снимают с эксплуатации. Также задается среднее значение $h_{\text{нач}}$ и среднее квадратичное отклонение S_h начального размера.

На рис. 1 представлена схема основных триботехнических узлов наименее надежных элементов топливной системы высокого давления двигателя – топливного насоса высокого давления (ТНВД) и форсунок.

Детали плунжерных пар ТНВД и распылителей форсунок работают в условиях действия высоких переменных давлений, температур и химического воздействия продуктов сгорания топлива.

¹ © Сагин С.В., к.т.н., доцент Одесской национальной морской академии.

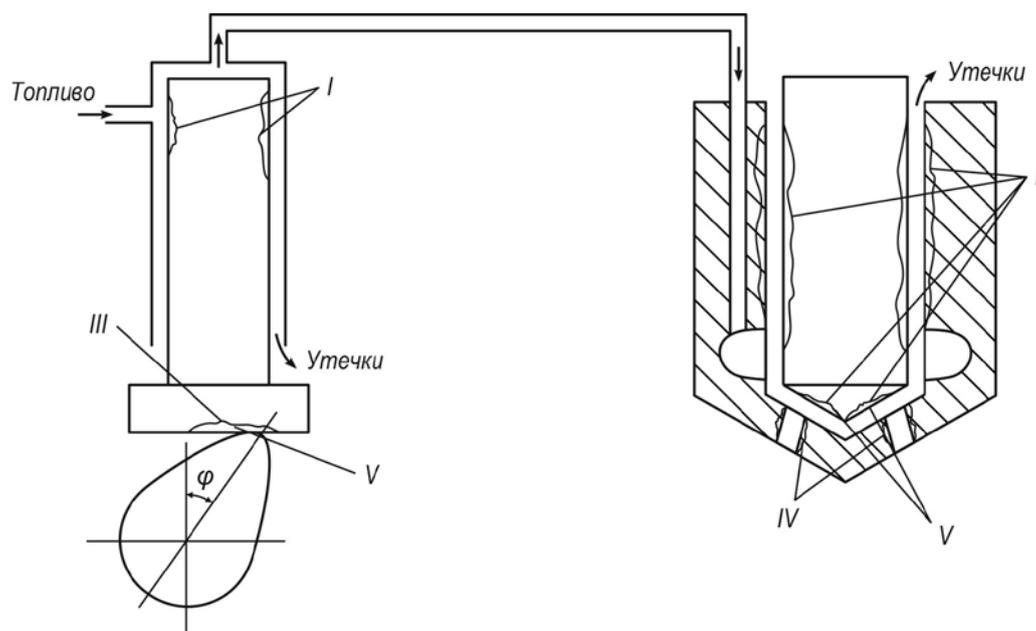


Рис. 1. Схема основных триботехнических узлов топливной системы высокого давления и различных зон износа:

I – абразивный, адгезионный, эрозионный, коррозионный; *II* – абразивный, адгезионный, коррозионный; *III* – коррозионно-механический; *IV* – абразивный, эрозионный, усталостный; *V* – пластическая деформация

Уплотнительные поверхности пар испытывают значительные ударные нагрузки. Под воздействием высоких переменных нагрузок рабочие поверхности деталей пар изменяют свою геометрическую форму. Условия работы прецизионных деталей усложняются также минимальными зазорами между рабочими направляющими поверхностями [2, 3]. Все эти специфические условия работы прецизионных пар обуславливают весьма высокие технические требования к материалам, технологии термической обработки и изготовления.

Прецизионные детали насосных элементов топливной аппаратуры изготавливают из хромомолибденоалюминиевых (38ХМЮА), хромовольфрамомарганцевых (ХВГ) шарикоподшипниковых (ШХ15), хромоникелевольфрамовых (18Н2Н4ВА), хромомолибденовых (25Х5МА) и быстрорежущих (Р9, Р18) сталей.

Эти материалы обладают высокой твердостью (до HRC=60), прочностью, износостойкостью, антифрикционными свойствами, способностью приобретать чистую поверхность при доводке и сохранять неизменными размеры и форму в течении длительного срока эксплуатации. Получение этих свойств обеспечивается специальной термохимической и термической обработкой.

Известно, что металлы, как и любые другие реальные твердые тела, имеют кристаллическую решетку далекую от идеальной, так как содержат большое количество дефектов структуры.

К последним относятся:

- микротрещины – это разрывы щелевого типа микро- или субмикроскопического размера;
- мозаичность структуры, выражающаяся в наличии числа кристаллических блоков, различных по размеру, но приблизительно одинаково ориентированных;
- свободные места в решетке (пустоты Смекала), образующиеся при отсутствии в решетке отдельных частиц или целых их групп;
- слоистые структуры в виде чередующихся слоев, разделенных кристаллическими плоскостями повышенной атомной плоскости;
- инородные включения микроскопических и ультрамикроскопических размеров.

Стальная поверхность при микроскопическом ее изучении представляется образованием чрезвычайно сложным. Рельеф поверхности, прежде всего, определяется видом обработки, которой подвергается металл.

К рабочим поверхностям насосных элементов топливной аппаратуры высокого давления предъявляются весьма высокие технические требования в отношении правильной геометрической формы рабочих поверхностей и их взаимного расположения, шероховатости поверхностей и физико-механических свойств поверхностного слоя [4].

Для выполнения этих требований рабочие поверхности после термической обработки подвергают шлифованию до 14 класса шероховатости, хонингованию, электроискровой обработке и доводке.

В собранных после совместной притирки прецизионных парах зазоры не превышают $0,001 \div 0,003$ мм, а при селективной сборке пар – $0,0008 \div 0,002$ мм. Технические условия на геометрическую форму прецизионных пар должны удовлетворять следующим требованиям.

Овальность и конусность рабочих поверхностей плунжера и гильзы должны составлять $0,0005 \div 0,002$ мм. Корсетность и бочкообразность рабочих поверхностей плунжера и гильзы некоторых насосов дизелей не допускается, а для некоторых дизелей допускается $0,0005 \div 0,002$ мм. Огранка рабочей поверхности плунжера $0,0005 \div 0,001$ мм.

Овальность и конусность рабочих цилиндрических поверхностей корпуса распылителя и иглы не должны быть более $0,001 \div 0,003$ мм, корсетность и бочкообразность рабочих цилиндрических поверхностей клапанной пары – не более $0,001 \div 0,003$ мм.

Кроме жестких технических условий и высоких требований на геометрическую форму, необходимо обеспечить чистоту обработки поверхностей по 11–12 классам, так как шероховатость рабочих поверхностей пре-

цизионных пар существенно влияет на их герметичность и износостойкость.

Большое влияние на получение требуемых геометрических форм прецизионных поверхностей и физико-механического состояния поверхностного слоя оказывают окончательные доводочные операции. От их качественного выполнения зависит работоспособность насосных элементов и дизеля в целом.

Процесс изнашивания насосных элементов топливной аппаратуры необходимо рассматривать как комплекс взаимосвязанных факторов, влияющих на износ или зависание деталей пар. Рассмотрим основные факторы, входящие в этот комплекс. Ими являются

1) конструктивные факторы:

- обоснование выбора материала для деталей прецизионных пар и вида термической обработки;
- обоснование статического качества поверхности;
- выбор точности изготовления;
- выбор формы деталей, исходя из жесткости их элементов;

2) технологические факторы:

- разброс действительных значений размеров, качество поверхности, взаимное расположение в пределах технических условий и допусков на изготовление;
- уменьшение жесткости элементов деталей в зависимости от разброса действительных значений размеров;
- скрытые дефекты в результате нарушения технологии изготовления (прижоги, микротрещины и т.д.);
- характер и величина деформации рабочих поверхностей в процессе сборки;
- величина изменения статистического качества поверхности;
- скрытые дефекты сборки;

3) эксплуатационные факторы:

- перераспределение деформаций в результате хранения деталей;
- характер и величина деформаций рабочих поверхностей в зависимости от цикловых нагрузок и температур в процессе работы в различных климатических условиях;
- нарушение правил технического обслуживания;
- степень загрязнения воздуха и топлива абразивными частицами естественного происхождения.

Указанные выше факторы определяют интенсивность изнашивания и характер процессов трения и создают определенные виды износа и зависания деталей прецизионных пар. К видам изнашивания следует отнести:

- механическое (абразивное, вследствие пластического деформирования при хрупком разрушении);

- молекулярно-механическое изнашивание при схватывании;
- коррозионно-механическое (коррозионное и окислительное).

На основании действия перечисленных выше факторов определяются виды износа и зависания деталей прецизионных пар.

Износ может быть следствием упругопластической деформации деталей пар, полученной в процессе монтажа и в результате релаксации остаточных напряжений (деформационный износ). Зависание может быть в результате адгезионного износа, когда граничная смазочная пленка топлива разрушена и имеет место металлический контакт с последующим оплавлением трущихся поверхностей, местными структурными изменениями материала, а также в результате защемления движущейся детали пары трения. При определенных сочетаниях конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов может быть тот или иной вид износа или зависания.

В течении цикла работы насосного элемента скорость возвратно-поступательного движения плунжера во втулке значительно меняется, а зазор в поперечном сечении, вследствие сложного неосевого движения этих деталей также не остается постоянным. Зазор в сопряжениях заполнен топливом, в котором находятся механические частицы (абразив), имеющие различные размеры и физико-механические свойства. Абразивный износ можно считать основной причиной, выводящей из строя плунжерные пары ТНВД. Топливные фильтры не обеспечивают достаточной очистки топлива и пропускают мельчайшие механические частицы в топливную систему. Эти частицы, обладающие большей твердостью, чем поверхности деталей, изнашивают точно обработанные поверхности плунжера и втулки.

По степени воздействия механических частиц на поверхность прецизионной пары различают две разновидности абразивного износа.

Первая разновидность наблюдается в том случае, если в топливе находятся во взвешенном состоянии малые абразивные частицы, величина которых меньше, чем зазор между сопряженными деталями. В этом случае абразивные частицы, двигаясь вместе с потоком топлива со значительной скоростью и обладая значительной кинематической энергией, снимают микростружку с поверхностей деталей, образуя риски и царапины. Это приводит к тому, что микрогеометрия поверхности приобретает вид мелких бороздок и гребешков незначительной высоты с закругленными вершинами. Направление бороздок и гребешков соответствует направлению движения топлива.

Вторая разновидность абразивного износа возникает при попадании в зазор между прецизионными деталями твердых частиц, размер которых несколько больше, чем величина зазора между деталями. В этом случае при движении одной из деталей механические частицы заклиниваются между твердыми поверхностями и пропахивают бороздки значительной глубины.

Прецизионная пара имеет в этом случае более грубую поверхность по сравнению с микрорельефом при первой разновидности износа. Если в первом случае средняя высота гребешков не превышает $4\div 5$ мкм, а расстояние между их вершинами составляет $145\div 150$ мкм, то во втором случае средняя высота гребешков составляет $9\div 10$ мкм, а расстояние между ними $80\div 85$ мкм.

При значительной концентрации механических (абразивных) частиц в топливе вторая разновидность износа является более разрушительной по сравнению с первым типом.

Высокая энергоемкость и насыщенность топливной системы судовых дизелей в то же время характеризуется самым ответственным, с точки зрения обеспечения надежности, трибоузлом – парой трения плунжер–втулка ТНВД и парой трения игла форсунки – корпус распылителя. Повышенный износ или заклинивание в данных трибосопряжениях приводит к отказу не только в отдельно взятом ТНВД, но и к нарушению в работе всей топливной системы высокого давления [4]. На рис. 2, 3 показаны наиболее интенсивные зоны изнашивания прецизионных пар топливной системы высокого давления, а также интенсивность распределения износа по длине элемента [5].

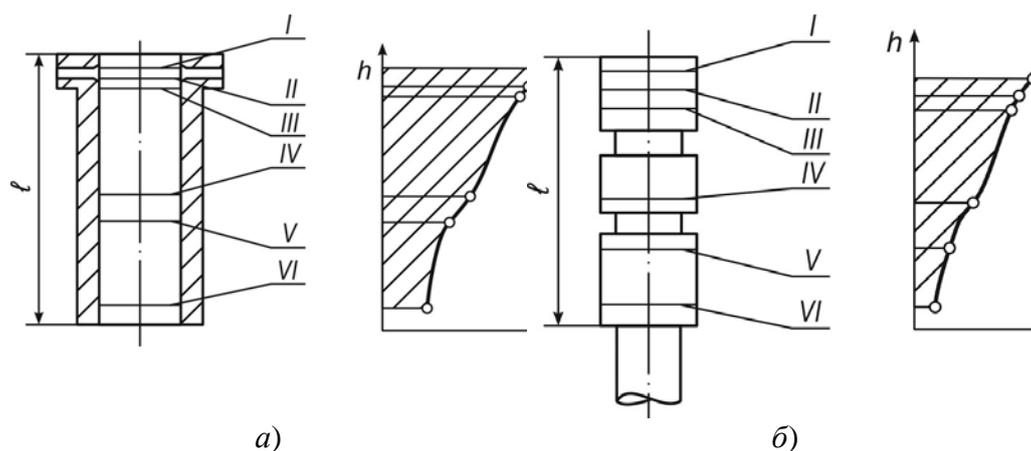


Рис. 2. Зоны и интенсивность изнашивания элементов ТНВД:
 а) втулка плунжера; б) плунжер ТНВД

Изложенные утверждения были проверены и подтверждены на топливной аппаратуре судовых дизелей, установленных на транспортных судах. Результаты этих исследований представлены в табл. 1, где приведены значения износа и интенсивности изнашивания прецизионных пар топливной аппаратуры различных дизелей за 1000 часов работы.

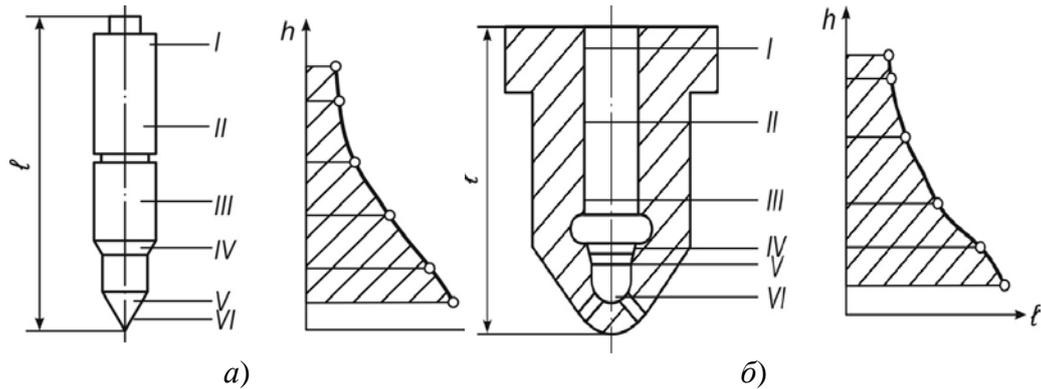


Рис. 3. Зоны и интенсивность изнашивания на игле форсунки (а) в корпусе распылителя (б)

Таблица 1

Износ прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей

Тип дизеля	Прецизионная пара	Общий износ, мм	Интенсивность изнашивания, мм/час
Hitachi MAN-B&W 8L35MC	плунжер-втулка	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-10}$
	игла-распылитель	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-10}$
MAN-B&W 6L42MC	плунжер-втулка	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-10}$
	игла-распылитель	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-10}$
Hanshin 6LF58	плунжер-втулка	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-10}$
	игла-распылитель	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-10}$
B&W 6KGF74	плунжер-втулка	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-10}$
	игла-распылитель	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-10}$

С помощью осмотров и замеров деталей отработавших пар установлено:

1) основными лимитирующими исправную работу плунжерной пары оказались износы направляющих поверхностей плунжера и втулки в области головки плунжера;

2) характер износа поверхностей одинаков у различных типов плунжерных пар;

3) у плунжеров больше изнашивается поверхность головки от торца до отсечной кромки спирали, средняя часть головки изнашивается меньше, к торцевой части плунжера износ увеличивается, в области отсечной кромки спирали износ также увеличивается;

3) втулки плунжерных пар изнашиваются больше в своей верхней части на одной трети длины, нижняя часть втулки в области торца изнашивается меньше.

По результатам рис. 2, 3 и табл.1 отметим также, что увеличение интенсивности износа втулки относительно плунжера, а также корпуса распылителя относительно форсуночной иглы, можно объяснить большим временем контакта этих элементов с абразивными частицами топлива, а главное – закоперемнностью трения в данных трибосопряжениях [1, 6].

Наблюдения за работой плунжерных пар и определение их плотности при различных зазорах позволяют сделать вывод о том, что предельный зазор их может быть допущен до величины, равной трем «монтажным» (установочным) зазорам $S_{пр} < 3S_{монт}$.

Осмотрами и замерами деталей форсуночных пар установлено, что поверхности запирающего конуса иглы и корпуса распылителя (рис. 3) изнашиваются неравномерно. У деталей, после отработки 3000÷4000 часов появляется утечка топлива через запирающие поверхности конуса и засорение распыливающих отверстий несгоревшими углеводородами [7].

Причиной изнашивания плунжерных пар дизельных топливных насосов являются абразивные частицы, присутствующие в топливе. Величина износа зависит от количества проникших с топливом в зазор абразивных частиц, размер которых в каждый момент периода изнашивания больше радиального зазора между плунжером и гильзой.

Наибольший износ плунжера наблюдается на участках расположенных против впускного и отсечного окон втулки. На доведенных поверхностях участков появляется матовый оттенок, поверхность таких участков щебенчатая. Глубина царапания достигает 10 мкм. На отсечной кромке спирали плунжера появляются местные износы в виде сколов (вмятин), глубина которых достигает 30 мкм, а ширина 2÷3 мм.

Износ отсечных кромок плунжера является следствием эррозионно-кавитационного износа.

Возникновение местного износа на участке плунжера, расположенного против впускного окна объясняется тем, что в момент, когда плунжер верхним торцом перекрывает впускное окно гильзы, в зазор вместе с топливом попадают абразивные частицы, размеры которых могут быть больше величины зазора. При движении плунжера защемленные абразивные частицы протаскиваются и перекатываются через зазор по направлению движения трущихся поверхностей и своими ориентированными острыми кромками срезают металл на поверхности плунжера и втулки. По мере дальнейшего продвижения частиц их режущие кромки притупляются, размельчаются, и режущая способность абразивного материала уменьшается. Этим объясняется уменьшение величины износа при удалении от верхнего торца плунжера.

Износ винтовой отсечной кромки плунжера объясняется гидроабразивным действием топлива.

В момент нагнетания топлива в надплунжерном пространстве происходит увеличение зазора между плунжером и втулкой вследствие упругих деформаций втулки. Радиальная составляющая деформации втулки зависит от осевой силы при ее затяжке. Ее величина колеблется от 0,5 до 1,5 мкм. Беспереывная пульсация при увеличении средней величины зазора способствует повышению износа рабочих поверхностей плунжерной пары, вызываемого попаданием абразивных частиц в зазор. Разрушение на золотниковой части плунжера вблизи его отсечной кромки является следствием кавитации.

Характер и интенсивность износа в насосных элементах топливной аппаратуры определяется размером абразивных частиц.

Одним из видов износа, наблюдающегося в плунжерных парах топливных насосов, является схватывание первого рода.

Этот процесс возникает и развивается при малых скоростях скольжения и больших удельных давлениях, превышающих предел текучести металла. Схватывание первого рода наблюдается на отдельных участках (пятнах) фактического контакта в условиях незначительного повышения температуры и приводит к интенсивному разрушению поверхностей трения и уносу значительных частиц металла.

Условия для возникновения износа по механизму схватывания в плунжерных парах создаются естественным путем в процессе трения и износа сопряженных поверхностей плунжер–втулка. Схватывание происходит в том случае, когда усилия, действующие в точках фактического контакта, создают напряжения, превышающие предел текучести металла.

При этом адсорбированные на поверхности пленки разрушаются, обнажая отдельные ювенильные участки поверхности металла. Одновременно с этим происходит выглаживание неровностей на поверхностях трения, благодаря чему значительно возрастает вероятность образования пятен фактического контакта. Далее, при тесном сближении ювенильных металлических поверхностей возникают металлические связи, аналогичные междоатомным связям в сплошном металле – происходит схватывание «холодная сварка металлов»). В процессе взаимного перемещения деталей, образовавшиеся мостики схватывания разрушаются, причем, поскольку вследствие пластической деформации металл упрочняется, разрушение мостиков происходит обычно по основному, менее прочному металлу. Таким образом, схватывание первого рода приводит к вырыванию из поверхности металла частиц значительных размеров, а далее в местах отрыва происходит концентрация механических напряжений, образуются микротрещины, что снижает усталостную прочность материала.

Из приведенных данных следует, что триботехнические показатели прецизионных пар определяют процессы трения и изнашивания в топливной аппаратуре и влияют на ее надежность.

Выводы

1. Триботехнические процессы, протекающие в топливной аппаратуре, оказывают значительное влияние на ее работу. Улучшение триботехнических характеристик приводит к повышению надежности топливной аппаратуры и двигателя в целом.
2. Основные триботехнические узлы топливной системы высокого давления подвергаются воздействию абразивного, адгезионного, эрозионного, коррозионного износа, а также пластической деформации.
3. Износ элементов топливной системы высокого давления (пар трения плунжер – втулка топливного насоса высокого давления и инга форсунки – корпус распылителя) происходит неравномерно по длине этих элементов и является причиной знакопеременного трения.
4. Совершенствование триботехнических процессов в топливной аппаратуре и снижение энергетических потерь при ее эксплуатации является одним из путей повышения экономических показателей работы судовых дизелей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимов В.Д. Трибология знакопеременного трения. – Одесса: Интерпринт, 2011. – 432 с.
2. Васькевич Ф.А. Двигатели внутреннего сгорания. Теория, эксплуатация, обслуживание. – Новороссийск: МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2009. – 266 с.
3. Семенов В.С. Теплонапряженность и долговечность цилиндропоршневой группы судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1977. – 182 с.
4. Мацкевич Д.В., Заблоцкий Ю.В. Определение смазочной способности дизельных топлив // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – Одесса: ОНМА, 2011. – № 28. – С. 145-153.
5. Марденский В.П. Топливная аппаратура судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1983. – 168 с.
6. Евдокимов В.Д., Кравец В.В. Знакопеременность трения поверхностей с покрытиями и фрикционно-электрическим упрочнением. – Одесса: Интерпринт, 2012. – 104 с.
7. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Использование топливных присадок в судовых дизелях // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – Одесса: ОНМА, 2012. – № 30. – С. 165-171.

Рукопись поступила в редакцию 25.04.2013 г.