

Міністерство освіти і науки України

Одеська національна морська академія

На правах рукопису

СОЛОДОВНИКОВ ВАЛЕРІЙ ГРИГОРОВИЧ

УДК 629.436

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПАЛИВОПІДГОТОВКИ СУДНОВИХ  
СЕРЕДНЬООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ  
КОНЦЕНТРАЦІЇ КОМПОНЕНТІВ, ЩО МІСТЯТЬ СІРКУ

05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:

Сагін Сергій Вікторович

кандидат технічних наук, доцент

Одеса – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....                                                                                               | 5  |
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                 | 9  |
| РАЗДЕЛ 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПРОБЛЕМЕ<br>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДГОТОВКИ<br>СУДОВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ<br>ДИЗЕЛЕЙ..... | 19 |
| 1.1. Среднеоборотные двигатели энергетических установок морских<br>судов и системы, обеспечивающие их работу.....                             | 20 |
| 1.2. Анализ схем топливоподготовки для судовых среднеоборотных<br>дизелей.....                                                                | 23 |
| 1.3. Анализ изменения эксплуатационных свойств топлив при их<br>подготовке.....                                                               | 28 |
| 1.3.1. Фракционный состав судовых топлив. ....                                                                                                | 28 |
| 1.3.2. Элементный состав топлива. ....                                                                                                        | 30 |
| 1.3.3. Групповой состав топлива. ....                                                                                                         | 34 |
| 1.4. Анализ влияния эксплуатационных свойств топлива на технические<br>характеристики судового дизеля.....                                    | 39 |
| 1.5. Анализ методов подготовки топлива к его использованию .....                                                                              | 41 |
| 1.6. Выводы по разделу 1.....                                                                                                                 | 51 |
| РАЗДЕЛ 2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ДИССЕРТАЦИОННОГО<br>ИССЛЕДОВАНИЯ.....                                                                                | 52 |
| 2.1. Выбор темы научного исследования.....                                                                                                    | 52 |
| 2.2. Обоснование цели и задач диссертационного исследования.....                                                                              | 57 |
| 2.3. Системный подход к разработке технологической карты научного<br>исследования.....                                                        | 60 |

|                                                                                                                               |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.4. Выводы по разделу 2.....                                                                                                 | 64         |
| <b>РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕРНИСТЫХ ПРИМЕСЕЙ</b>                                                                      |            |
| <b>В ТОПЛИВЕ НА РАБОТУ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ.....</b>                                                                               | <b>65</b>  |
| 3.1. Сернистые соединения в топливе и их влияние на техническое состояние дизеля.....                                         | 65         |
| 3.2. Методы определение серы в нефтепродуктах.....                                                                            | 72         |
| 3.3. Влияние составляющих серы в топливе на работу дизеля.....                                                                | 75         |
| 3.4. Общая характеристика способов защиты деталей дизеля при работе на сернистых топливах.....                                | 80         |
| 3.5. Методы десульфуризации топлива в судовых условиях.....                                                                   | 86         |
| 3.6. Особенности кавитационной обработки судового топлива.....                                                                | 89         |
| 3.7. Математическое описание процессов, происходящих при кавитационной обработке топлива.....                                 | 92         |
| 3.8. Экспериментальное определение оптимальной частоты ультразвуковой кавитационной обработки судового моторного топлива..... | 100        |
| 3.9. Выводы по разделу 3.....                                                                                                 | 110        |
| <b>РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ</b>                                                                          |            |
| <b>ОБРАБОТКИ ТОПЛИВА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ,</b>                                                                                   |            |
| <b>ЭКОНОМИЧЕСКИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И</b>                                                                                         |            |
| <b>ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДОВЫХ</b>                                                                                |            |
| <b>СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ.....</b>                                                                                           | <b>112</b> |
| 4.1. Технологическое обеспечение исследований по ультразвуковой кавитационной обработке топлива в судовых условиях.....       | 112        |
| 4.2. Исследования влияния ультразвуковой обработки топлива на сернистый износ деталей цилиндровой группы.....                 | 119        |
| 4.3. Исследование влияния ультразвуковой обработки топлива на эксплуатационные параметры работы дизеля.....                   | 128        |

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4. Влияние ультразвуковой обработки топлива на состояние<br>прецизионных пар топливной аппаратуры высокого давления.....              | 130 |
| 4.5 Влияние ультразвуковой обработки топлив на экологические<br>параметры работы дизеля.....                                            | 133 |
| 4.6. Выводы по разделу 4.....                                                                                                           | 137 |
| <b>РАЗДЕЛ 5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУДОВЫХ СИСТЕМ<br/>ТОПЛИВОПОДГОТОВКИ .....</b>                                                           |     |
| 5.1 Определение энергетической эффективности топливных систем<br>судовых СОД, работающих на высоковязких сортах тяжелых<br>топлив ..... | 139 |
| 5.2. Разработка модульных схем построения судовых систем<br>топливоподготовки .....                                                     | 148 |
| 5.3. Разработка вариантов перекомпоновки судовых систем<br>топливоподготовки .....                                                      | 152 |
| 5.4. Применение в системе топливоподготовке гидродинамических<br>активаторов топлива.....                                               | 161 |
| 5.5. Оценка конструктивного коэффициента энергетической<br>эффективности при совершенствовании топливной системы<br>судового СОД.....   | 164 |
| 5.4. Выводы по разделу 5.....                                                                                                           | 158 |
| <b>ВЫВОДЫ.....</b>                                                                                                                      | 171 |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>                                                                                           | 174 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>                                                                                                                  | 190 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Авторское свидетельство.....</b>                                                                                       | 191 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты внедрения результатов диссертационного<br/>исследования.....</b>                                                  | 195 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты обмеров цилиндрических втулок судового<br/>среднеоборотного дизеля S6A2 фирмы «Mitsubishi».....</b>         | 200 |

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

|        |                                                                 |
|--------|-----------------------------------------------------------------|
| ВД     | – вспомогательный двигатель                                     |
| ВМТ    | – верхняя мертвая точка                                         |
| ВОД    | – высокооборотный дизель                                        |
| ГД     | – главный двигатель                                             |
| ГТН    | – газотурбонагнетатель                                          |
| ДВС    | – двигатель внутреннего сгорания                                |
| ККЭЭ   | – конструктивный коэффициент энергетической эффективности       |
| КПД    | – коэффициент полезного действия                                |
| КШМ    | – кривошипно-шатунный механизм                                  |
| МАРПОЛ | – Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов |
| МОД    | – малооборотный дизель                                          |
| ПУЭС   | – план управления энергетической эффективностью судна           |
| СДВС   | – судовой двигатель внутреннего сгорания                        |
| СОД    | – среднеоборотный дизель                                        |
| СПУЭС  | – судовой план управления энергетической эффективностью судна   |
| СЭУ    | – судовая энергетическая установка                              |
| ТНВД   | – топливный насос высокого давления                             |
| ЦПГ    | – цилиндропоршневая группа                                      |
| СИМАС  | – Международный совет по двигателям внутреннего сгорания        |
| EEDI   | – Energy Efficiency Design Index                                |
| IMO    | – Международная морская организация                             |
| ISO    | – Международная организация по стандартизации                   |
| SEEMP  | – Ship Energy Efficiency Management Plan                        |

|                  |                                                                                       |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$         | — коэффициент избытка воздуха                                                         |
| $\gamma_r$       | — коэффициент остаточных газов                                                        |
| $\zeta$          | — коэффициент сопротивления среды                                                     |
| $\eta$           | — динамическая вязкость топлива, Па·с                                                 |
| $\eta_{аз}$      | — коэффициент кавитационного использования акустической энергии                       |
| $\eta_e$         | — эффективный коэффициент полезного действия дизеля                                   |
| $\mu_o$          | — коэффициент молекулярного изменения                                                 |
| $\mu_v$          | — коэффициент динамической вязкости воды, Па·с                                        |
| $\mu_t$          | — коэффициент динамической вязкости топлива, Па·с.                                    |
| $\mu_\varphi$    | — коэффициент молекулярного изменения, соответствующий углу поворота коленчатого вала |
| $v$              | — скорость частицы, м/с                                                               |
| $\nu_{уз}$       | — частота ультразвукового сигнала, кГц                                                |
| $\nu_{уз}^{опт}$ | — оптимальная частота ультразвукового сигнала, кГц                                    |
| $\rho$           | — плотность топлива, кг/м <sup>3</sup>                                                |
| $\rho_{ч}$       | — плотность механических примесей или воды, кг/м <sup>3</sup>                         |
| $\sigma$         | — поверхностное натяжение жидкости, Н/м                                               |
| $\tau$           | — длительность впрыскивания топлива, с                                                |
| $\varphi_d$      | — действительная продолжительность подачи топлива в цилиндр, °пкв                     |
| $v$              | — выделенный объем, м <sup>3</sup>                                                    |
| $\Delta v$       | — объем всех кавитационных пузырьков, м <sup>3</sup>                                  |
| $\chi_i$         | — доля теплоты, выделяющейся в процессе сгорания                                      |
| $\omega$         | — угловая скорость; рад <sup>-1</sup>                                                 |
| $\omega_o$       | — скорость оседания частиц, м/с                                                       |
| $a$              | — амплитуды ультразвуковой звуковой волны, мкм                                        |
| $b_e$            | — удельный эффективный расход топлива, кг/(кВт·час)                                   |
| $c_0$            | — скорость распространения ультразвуковой волны в топливе, м/с                        |

|               |   |                                                                                     |
|---------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $d$           | — | средний диаметр частицы загрязнения, принимаемой за сферический объект, м           |
| $F_A$         | — | подъемная сила среды, определяемая по закону Архимеда, кН                           |
| $F_c$         | — | сила сопротивления (сила трения), сила Стокса, кН                                   |
| $F_H$         | — | сила сопротивления среды, вычисляемая по закону Ньютона, кН                         |
| $F_{ц}$       | — | центробежная сила, кН                                                               |
| $G_{воз}$     | — | расхода воздуха, подаваемого в зону кавитации, кг/с                                 |
| $g$           | — | ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>                                      |
| $I_h$         | — | линейный износ цилиндрических втулок, мкм                                           |
| $I_m$         | — | массовый износ поршневых колец, гр                                                  |
| $L_o$         | — | теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кмоль/кг     |
| $M_L$         | — | количество молей свежего заряда, кмоль                                              |
| $N_{узг}$     | — | мощность ультразвукового генератора, кВт                                            |
| $n$           | — | частота вращения коленчатого вала дизеля, об/мин                                    |
| $P$           | — | сила тяжести или собственный вес, кН                                                |
| $P_a$         | — | акустическое давление, создаваемое при ультразвуковой кавитации, кПа                |
| $P_r$         | — | давление в парогазовом пузырьке, кПа                                                |
| $P_{п}$       | — | давление насыщенных паров, кПа                                                      |
| $P_0$         | — | начальное давление в пузырьке при наложении ультразвуковой кавитационной волны, кПа |
| $P_{\infty}$  | — | статическое давление в жидкости, кПа                                                |
| $P_{\varphi}$ | — | текущее значение давления в цилиндре, кгс/см <sup>2</sup>                           |
| $p_{max}$     | — | максимальное давление цикла, МПа                                                    |
| $Q_n^p$       | — | низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг                                             |
| $R$           | — | радиус пузырька кавитации, м                                                        |
| $R_{кр}$      | — | критический радиус пузырька кавитации, м                                            |

|                               |   |                                                  |
|-------------------------------|---|--------------------------------------------------|
| $R_{\max}$                    | — | максимальный радиус парогазового пузырька, м     |
| $R_0$                         | — | начальный радиус пузырька кавитации, м;          |
| $Re$                          | — | число Рейнольдса                                 |
| $r$                           | — | радиус действия угловой скорости, м              |
| $S_{\text{Ih}}$               | — | площадь пятен видимого износа, мм <sup>2</sup>   |
| $T_{\text{топ}}$              | — | температура топлива, К                           |
| $T_{\text{топ}}^{\text{опт}}$ | — | оптимальная температура топлива, К               |
| $T_0$                         | — | период первичного звука, сек                     |
| $t$                           | — | время, мин                                       |
| $t_{\text{Г}}$                | — | температуры выпускных газов, °С                  |
| $t_{\text{с}}$                | — | температуры точки росы водяных паров, °С         |
| $V_{\text{рас}}$              | — | объем расходной цистерны топлива, м <sup>3</sup> |



## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Основным источником, обеспечивающим работу судовых энергетических установок (СЭУ), в том числе двигателей внутреннего сгорания (ДВС), является топливо.

Судовые ДВС относятся к самому распространенному типу тепловых двигателей, используемых на морских и речных судах. По сравнению с другими типами энергетических установок (паротурбинных и газотурбинных), использующихся для обеспечения энергией судового пропульсивного комплекса, судовые дизели характеризуются минимальными расходами топлива как на единицу мощности (кг/кВт·час), так и на единицу пройденного судном пути (кг/милю). Наибольшее распространение на судах получили среднеоборотные дизели (СОД), которые используются на всех без исключения морских и речных судах, обеспечивая требуемой мощностью как пропульсивный комплекс (в случае их работы на винт), так и судовую электростанцию (в случае, их работы в качестве приводов генераторов электрического тока).

При эксплуатации судовых ДВС не редко возникают различные дилеммы, к одной из которых относится использование в судовых СОД высоковязких топлив с высоким содержанием серы. Данные топлива обладают пониженной стоимостью, поэтому их применение в судовой энергетике, начавшееся с котельных установок и распространенное на крейцкопфные малооборотные дизели (МОД), в настоящее время все шире и происходит и для СОД. Повышенная частота вращения данных моделей дизелей снижает время, отводимое на впрыскивание, смесеобразование и сгорание топлива (по сравнению с МОД), что является причиной сернистой коррозии и сернистого износа деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ).

Решение задачи снижения сернистого износа деталей ДВС в настоящее время полностью выполнено для МОД, имеющих отдельную цилиндровую систему смазывания. При этом задачей остается лишь найти оптимальное соотношение между содержанием серы в топливе и содержанием щелочных присадок в масле. Так, для топлив с содержанием серы до 2% рекомендуется использование цилиндрических масел, включающих в свой состав 40...50 мгКОН/г масла (где КОН – содержание щелочи в масле); для высоковязких топлив, содержащих до 3 % серы значение КОН может составлять 70...80 мг/г.

Судовые СОД имеют общую циркуляционную систему смазывания, применение масел с повышенным содержанием щелочи в данном случае нецелесообразно как по экономическим причинам (в связи с их высокой стоимостью), так и ввиду их худших эксплуатационных параметров (в частности меньшей способности сопротивляться нормальным нагрузкам). Поэтому, для СОД единственным способом борьбы с последствием применения сернистого топлива является его дополнительная обработка перед подачей в цилиндр, способствующая впоследствии снижению сернистого износа. При этом необходимо учитывать, что решение проблемы по удалению сернистых примесей из топлива должно быть комплексным, т.к. любое физическое воздействие на топливо приводит к изменению практически всех его компонентов.

Важность решения задач по обеспечению необходимого качества топлива определяется требованиями Приложения VI конвенции MARPOL, а также резолюциями Международной морской организации МЕРС.203(62) и МЕРС.213(63) где, в частности, в качестве одного из способов повышения конструктивной энергетической эффективности судна рассматривается совершенствование топливоподготовки.

Одним из способов выполнения данных требований является использование в СЭУ топлив с содержанием серы 0,01...0,1 %. Однако, на

сегодняшний момент нефтеперерабатывающие заводы не способны обеспечить потребителей топливом подобного качества в полном объеме, а судоходные компании не всегда могут пойти на повышенные финансовые затраты, связанные с покупкой подобных топлив. Это, а также необходимость пополнения запасов топлива в различных морских портах (в ряде из которых возможно снабжение судов только тяжелым топливом), приводит к тому, что для обеспечения работы СОД применяются топлива с содержанием серы 2,5...3,5 %, использование которых приводит к повышенному коррозионному износу деталей ЦПГ и поэтому требуют дополнительной топливоподготовки в судовых условиях.

При этом вопрос улучшения качества высокосернистых топлив путем совершенствования системы топливоподготовки судовых двигателей требует исследования и решения.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Тема диссертации связана с программой экономических реформ, проводимых в Украине, Транспортной стратегией Украины на период до 2020 г. (розп. КМУ від 20.10.10 р. № 2174-р) и планами выполнения научно-исследовательских работ Одесской национальной морской академии, в частности по теме «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології» № ДР 0114U000346, в которой автор диссертации подготовил отдельные разделы.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является повышение экологической эффективности и сохранение работоспособности судового СОД путем снижения серосодержания высоковязкого топлива.

**Научная гипотеза** заключается в том, что десульфуризация высоковязкого топлива в условиях судна достижима путем воздействия на его серосодержащие молекулы.

**Главная задача диссертационного исследования** заключается в разработке способа, средств и эффективного режима десульфуризации высоковязкого топлива системой топливоподготовки судового СОД.

Для решения главной задачи диссертационного исследования решены **вспомогательные задачи:**

- 1) анализ процессов топливоподготовки высоковязких тяжелых топлив, использующихся для работы судовых дизелей;
- 2) определение способов и средств контроля серосодержания в топливе после его десульфуризации;
- 3) установление диапазона оптимальных характеристик ультразвукового генератора при удалении серы из топлива;
- 4) анализ изменения коррозионного состояния ЦПГ судового СОД от серосодержания высоковязкого топлива.

**Объект исследования** – судовой СОД, работающий на высокосернистом топливе.

**Предмет исследования** – система топливоподготовки судового СОД.

- дедукции (при осуществлении информационного поиска);
- системного анализа (при определении цели и задач исследования, а также при разработке технологической карты исследования);
- математического и физического моделирования (при разработке модели объекта исследования и при определении влияния параметров ультразвуковой обработки на структурный состав топлива, а также при определении влияния характеристик топлива на показатели судового СОД);
- статистической обработки данных (при обработке результатов экспериментов).

**Научная новизна работы** – состоит в том, что снижение серосодержания в высоковязком топливе в 1,15...1,35 раза обеспечивается ультразвуковым воздействием на малоподвижное, предварительно

очищенное от воды и механических примесей топливо, обогащенное пузырьками воздуха, которое совершается генератором ультразвуковых импульсов, установленным в верхней части расходной цистерны с одновременной подачей сжатого воздуха в ее нижнюю часть через специальный воздухораспределитель. При этом отношение мощности ультразвукового генератора  $N_{\text{узг}}$  к объему топлива в расходной цистерне  $V_{\text{рас}}$  составляет  $0,5...3,0 \text{ кВт/м}^3$ , а отношение расхода воздуха  $G_{\text{воз}}$  к объему топлива в расходной цистерне  $V_{\text{рас}}$  находится в пределах  $0,04...0,05 \text{ (м}^3/\text{час)/м}^3$ .

В результате исследования впервые установлено:

исследуемый эффект ультразвуковой десульфуризации совершается в малоподвижном объеме топлива, предварительно очищенного от воды и механических примесей, что характерно для расходной цистерны системы топливоподготовки;

зависимость объемной концентрации сульфида водорода (образующегося во время обработки топлива и выделяющегося с его открытой поверхности) от частоты ультразвукового генератора имеет нелинейный вид и характеризуется наличием максимума, соответствующего оптимальной частоте ультразвукового генератора;

оптимальная десульфуризация высокосернистых топлив при ультразвуковой обработке происходит в диапазоне частоты ультразвукового сигнала  $22...26 \text{ кГц}$  при амплитуде ультразвуковой волны  $0,36...0,68 \text{ мкм}$ ;

более чем трехкратное снижение коррозионного износа деталей судового СОД и  $1,15...1,35$  разовое снижение концентрации серосодержащих компонентов топлива достигается при отношении мощности ультразвукового генератора  $N_{\text{узг}}$  к объему расходной цистерны  $V_{\text{рас}}$  в пределах  $N_{\text{узг}}/V_{\text{рас}}=0,55...2,78 \text{ кВт/м}^3$  с совместной с интенсификацией процесса ультразвуковой обработки путем принудительной подачи воздуха в объем обрабатываемого топлива.

Усовершенствована методика определения структурного состава топлива, отличающаяся от существующих возможностью оценки остаточного содержания серы в топливе по объемной концентрации сульфида водорода, образующегося над свободной поверхностью топлива при его ультразвуковой обработке.

Получила дальнейшее развитие методика определения концентрации сернистых примесей в топливе на основе анализа линейчатых спектров горения топлива.

**Практическое значение** полученных результатов заключается в следующем:

- установленная взаимосвязь между частотой ультразвукового сигнала и снижением содержания сернистых примесей в топливе позволяет определить оптимальное время ультразвуковой обработки топлива, обеспечивающее минимальные энергозатраты на ее проведение;

- технологию ультразвуковой кавитационной обработки высокосернистого топлива целесообразно использовать при разработке гидродинамических активаторов, а рекомендации по определению оптимальных частот ультразвукового сигнала и времени ультразвуковой обработки топлива – при проектировании систем топливоподготовки судовых СОД.

Реализация результатов исследований на группе судовых СОД в диапазоне их мощности 180...4600 кВт обеспечивает снижение расхода топлива на 70...520 кг в сутки, что в ценах 2015 года составляет 40...350 долларов США в сутки.

Результаты диссертационного исследования внедрены:

система ультразвуковой обработки и гидродинамической активации тяжелого топлива, а также двухступенчатый модуль ультразвуковой

подготовки топлива – на судах, обслуживающихся производственной фирмой «Судоремонт» (акт внедрения от 12.05.2015 г.);

дополнительная система ультразвуковой подготовки топлива – на т/х «SOCOL-6» Товариства з обмеженою відповідальністю «Каалбай шіппінг Україна» (акт внедрения от 05.08.2015 г.);

блок ультразвуковой подготовки топлива – на т/х «Ocean Voyager» Товариства з обмеженою відповідальністю «Каалбай шіппінг Україна» (акт внедрения от 03.09.2015 г.);

теоретическое обоснование метода ультразвуковой кавитационной обработки топлива, а также особенности эксплуатации системы топливоподготовки судовых СОД, использующей эффект кавитации топлива, внедрены в учебный процесс Одесской национальной морской академии при изучении дисциплин «Технологія використання робочих речовин», «Технічне обслуговування і ремонт суднових технічних засобів», «Оптимізація режимів роботи суднових енергетичних установок» (акт внедрения от 23.06.2015 г.).

**Личный вклад соискателя** заключается в следующем:

проведение информационного поиска;

разработка математической модели процесса ультразвуковой кавитационной обработки высокосернистого топлива, использующегося в системах топливоподготовки судовых СОД;

проведение экспериментальных исследований (в лабораторных и судовых условиях) по определению оптимальных частоты и времени ультразвуковой кавитационной обработки, обеспечивающих максимальное снижение сернистых примесей в топливе при минимальных затратах энергии;

обработка и анализ экспериментальных данных; разработка рекомендаций по совершенствованию технической эксплуатации систем топливоподготовки судовых СОД.

Работы [14, 43, 79, 80, 83, 84, 106, 135, 137, 155, 156] выполнены автором самостоятельно.

В научных работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат следующие результаты:

[157] – переоборудование штатной судовой системы топливopодготовки;

[40] – разработка технологии подготовки элементов топливной системы к экспериментальным исследованиям, комплектация судовой топливной системы, проведение эксперимента и обработка их результатов (выполнялось на т/х «SOCOL-6» Товариства з обмеженою відповідальністю «Каалбай шиппінг Україна»);

[148] – проведение информационного поиска, составление математической модели и проверка ее адекватности (выполнялось в Одесской национальной морской академии);

[134] – проведение экспериментальных исследований, модернизация судовой системы топливopодготовки, проведение эксперимента в научной лаборатории и судовых условиях, обработка результатов эксперимента (выполнялось в Одесской национальной морской академии и на судах, обслуживающихся производственной фирмой «Судоремонт»);

[136] – проведение экспериментальных исследований, анализ и обработка полученных результатов (выполнялось на судах, обслуживающихся производственной фирмой «Судоремонт»);

[149] – проведение экспериментальных исследований и обработка полученных результатов (выполнялось в Одесской национальной морской академии и в Одесском национальном университете им. И.И. Мечникова);

[144] – разработка алгоритма подготовки топливной системы судового СОД при использовании дополнительной ультразвуковой кавитационной обработки топлива (выполнялась на т/х «Ocean Voyager» Товариства з обмеженою відповідальністю «Каалбай шиппінг Україна»).



**Апробация результатов работы.** Основные положения, отдельные разделы и научные результаты докладывались, обсуждались и были одобрены на следующих научно-технических конференциях:

науково-технічної конференції «Енергетика судна: експлуатація та ремонт», 26.03.2014–28.03.2014, Одеса, Одеська національна морська академія;

VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті – MINTT-2014», 27-29 травня 2014 р., Херсон, Херсонська державна морська академія;

XXXV международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике», Новосибирск, СибАК, 2014 г.;

XXVI міжнародної наукової конференції «Дисперсні системи», 22-26 вересня 2014 р., Одеса, Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова;

XXXVIII международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике», Новосибирск, СибАК, 2014 г.;

III Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасний стан та проблеми двигунобудування», 19-21 листопада 2014 р., м. Миколаїв, Національний університет кораблебудування;

IV международной научно-практической конференции «Техника и технологии: роль в развитии современного общества», 27 января 2015 г., Краснодар, 2015 г.;

Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика судна: експлуатація та ремонт», 26.03.2015–28.03.2015, Одеса, Одеська національна морська академія;

XV международной научно-практической конференции «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке», Москва, 27-28 марта 2015 г.;

VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті – MINTT-2015» (26-28 травня 2015 р., Херсон, Херсонська державна морська академія.

**Публикации.** Основные результаты диссертационного исследования изложены в 18 публикациях. Из них одно авторское свидетельство; одна в международном журнале Modern Applied Science; Published by Canadian Center of Science and Education, входящем в фонд Scopus; 6 опубликовано в научных журналах, входящих в перечень научных специализированных изданий Украины, рекомендованных Министерством образования и науки Украины для публикации результатов диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (из них 4 без соавторства); 10 публикаций в сборниках материалов научных конференций.

## РАЗДЕЛ 1

### ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПРОБЛЕМЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДГОТОВКИ СУДОВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Судовые двигатели внутреннего сгорания (СДВС) являются крупнейшими потребителями жидкого топлива. Мощность главных и вспомогательных двигателей судовых энергетических установок (СЭУ) лежит в диапазоне от нескольких сотен до десятков тысяч киловатт. При среднем удельном эффективном расходе топлива 180...185 г/(кВт·час) суточный расход топлива главным двигателем (ГД) может составлять 200...250 тонн/сутки, а вспомогательными двигателями (ВД), количество которых на современных судах до 4-х, а количество параллельно работающих до 3-х, – 10...12 тонн/сутки.

Дизельная энергетическая установка современных СЭУ комплектуется МОД и СОД. МОД, работающие по двухтактному циклу, используются в качестве ГД, передающих мощность на винт. Эту же функцию могут выполнять среднеоборотные четырехтактные дизели, однако наибольшее применение они получили в качестве ВД для привода судовых электрогенераторов.

В качестве топлива для ДВС используются жидкие нефтепродукты, которые традиционно делятся на тяжелые и легкие (дизельные). Эта классификация базируется на удельном весе, а точнее плотности топлива, которая для дизельных топлив при 20°C лежит в пределах 840...860 кг/м<sup>3</sup>, а для тяжелых до 980 кг/м<sup>3</sup> [1, 2].

### 1.1. Среднеоборотные дизели энергетических установок морских судов и системы, обеспечивающие их работу

К судовым СОД относятся двигатели, частота вращения коленчатого вала которых на номинальном режиме составляет 300...1000 об/мин. В случае использования СОД в качестве ВД коленчатый вал дизеля непосредственно соединен с ротором электрогенератора и их частоты вращения совпадают. Если СОД выполняет функции ГД коленчатый вал дизеля и гребной вал соединены редукторной передачей, обеспечивающей пониженную частоту вращения гребного винта по сравнению с частотой вращения коленчатого вала двигателя. СЭУ с СОД в качестве ГД применяются в мировом судостроении уже много лет. Однако из-за высоких удельных расходов топлива, малой цилиндровой и агрегатной мощности и недостаточной надежности и долговечности СОД долгое время не могли конкурировать с МОД [3].

На протяжении 70...80-х годов прошлого века ведущими дизелестроительными компаниями велась интенсивная исследовательская и проектно-конструкторская работа, направленная на перевод СОД на дешевые тяжелые топлива, повышение их цилиндровой и агрегатной мощности, снижение эмиссии выпускных газов, понижение удельного расхода топлива. Параллельно решались задачи по повышению надежности и долговечности двигателей. Результат этих последовательных шагов – появление принципиально новых СОД способных, в первую очередь, работать на высоковязких сортах топлива и характеризующихся агрегатной мощностью в пределах 30000 кВт и выше [4, 5]. Наибольшее распространение подобные дизели получили на пассажирских судах, контейнеровозах малого и среднего водоизмещения, а также на специализированных судах (морских и океанских

буксирах, рефулерных судах, судах обеспечения нефтедобывающих платформ и др.), где они используются в составе дизель-редукторных агрегатов с отбором мощности для приводов электроагрегатов, гидронасосов и других судовых механизмов.

Судовые СОД выпускаются всеми дизелестроительными фирмами: Daihatsu Diesel, Hyundai Heavy Industries, MaK–Caterpillar, MAN–Burmeister & Wain, Matsui Iron Works, Mitsubishi Heavy Industries, SEMT Pielstick, The Hanshin Diesel Works, Wartsila–Sulzer, Yanmar с числом цилиндров от 4-х до 20-ти (в V-образном исполнении) и цилиндровой мощностью от 15-ти до 1400 кВт [6].

Для обеспечения судовых дизелей (как главных, так и вспомогательных) топливом, маслом, водой и воздухом, а также для удаления отработавших газов СЭУ оборудуют системами: топливной, масляной, водяного охлаждения, сжатого воздуха, газовойпуска. Названные системы обеспечивают подачу топлива к топливным насосам высокого давления (ТНВД) дизелей и его последующий впрыск в цилиндр; подачу масла на смазку и охлаждение узлов трения; подачу охлаждающих жидкостей для отвода теплоты от нагретых деталей, подачу сжатого воздуха для пуска и реверса двигателя; подачу свежего воздуха для осуществления рабочего цикла и очистки цилиндра от продуктов сгорания.

В состав систем входит большое количество вспомогательного оборудования, выполняющих транспортировку топлива, масла и воды от приемных танков до соответствующих контуров дизеля с обеспечением и поддержанием их качественных характеристик. Длительный отрыв судна от берегового снабжения требует создания специальных хранилищ топлива, масла, пресной воды. Кроме того, для обеспечения живучести и непотопляемости судна, а также жизнедеятельности обслуживающего персонала и для выполнения присущих судну операций в машинно-

котельном отделении устанавливаются механизмы и устройства общесудовых систем, которые в той или иной степени могут быть связаны с системами, обслуживающими главный и вспомогательные дизели. Нарушение функционирования элементов систем СЭУ или выход их из строя может привести к снижению эффективности ее работы или к аварии двигателей, что, в свою очередь, может повлечь за собой снижение ходовых характеристик судна вплоть до его остановки [7]. Подобные ситуации особенно опасны в местах активного судоходства (морских проливах, каналах, акваториях портов), а также в неблагоприятных погодных условиях.

Самой разветвленной и насыщенной по своему составу является топливная система, которая состоит из систем высокого и низкого давлений. Топливная система низкого давления предназначена для подготовки и подачи топлива к топливной системе высокого давления и включает цистерны, фильтры, насосы, смесители, сепараторы, подогреватели, различные специальные устройства и топливопроводы. Топливная система высокого давления обеспечивает впрыскивание топлива в камеру сгорания двигателя и включает ТНВД и форсунку, обычно соединенные топливопроводом высокого давления. При применении насос-форсунок топливопровод высокого давления отсутствует, а в случае установки на дизеле современных систем common-rail нагнетание топлива к форсункам происходит из общей магистрали.

Масляная система служит для подачи масла к узлам и деталям дизеля, работающим в условиях трения. Масляная система обеспечивает: прием и хранение масла, очистку его от воды и механических примесей в фильтрах и сепараторах, охлаждение в маслоохладителях [8, 9]. Судовые СОД комплектуются циркуляционными системами смазывания, обеспечивающими подачу смазочного материала как к подшипникам коленчатого вала, так и непосредственно на зеркало цилиндровой втулки.

Системы водяного охлаждения предназначены для поддержания требуемого теплового режима работы дизеля путем отвода теплоты от таких его узлов как крышка цилиндра, выпускной клапан, цилиндровая втулка (при этом используется пресная вода), а также для охлаждения наддувочного воздуха в воздухоохладителе (с помощью забортной воды). Системы охлаждения пресной водой для современных дизелей выполняются только в замкнутом виде, в которых вода циркулирует по замкнутому контуру, а ее охлаждение происходит с помощью забортной воды, циркулирующей по открытому контуру.

Учитывая, что подавляющее большинство судовых СОД выполняются нереверсивными, система сжатого воздуха используется только для их пуска (что, тем не менее также важно и актуально, поскольку именно ВД обеспечивают электроэнергией все вспомогательные механизмы обслуживающие ввод в действие и работу ГД).

## 1.2. Анализ схем топливоподготовки для судовых среднеоборотных дизелей

Международной организацией по стандартизации (ISO) в 1987 году были разработаны и утверждены стандарты на топливо DP-8216 и DP-8217. Данные стандарты ISO каждые 5 лет подвергаются пересмотру и в них вносятся требуемые коррективы. В 2010 году по требованию Международной морской организация (IMO) ISO подготовила спецификацию морских сортов топлива, соответствующую переработанному Приложению VI Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ). В настоящее время данные стандарты обозначаются как ISO 8216-1:2010 и ISO 8217:2010

и определяют 4 марки дистиллятных и 6 марок остаточных судовых топлив. Дистиллятные топлива: газойль DMA, чистое дизельное топливо DMB и DMZ (с большим значением минимальной вязкости), топливо DMX, предназначенное для использования в наружном аварийном оборудовании. Вязкость этой группы топлив при 40°C составляет 1,4...2,5 мм<sup>2</sup>/с (сСт). Остаточные топлива: RMA, RMB, RME, RMG, RMH, RMKG, вязкость которых при 50°C лежит в пределах 180...700 мм<sup>2</sup>/с (сСт) [10].

В последние годы на транспортных судах для СОД все шире применяются тяжелые сорта топлива высокой вязкости, имеющие более низкую стоимость [3, 11]. Согласно требованиям таких ведущих дизелестроительных фирм, как Wartsila–Sulzer, MAN–Burmeister&Wain судовые СОД должны надежно эксплуатироваться на всех режимах (в том числе на пусковых и переходных) при использовании топлив с вязкостью до 380 мм<sup>2</sup>/с [12, 13]. Перспективы развития транспортного судостроения с применением СОД в мировой практике тесно связаны с использованием подобных видов топлива. При этом следует отметить, что тяжелые сорта топлива используются для работы как главных СОД, передающих свою мощность на движитель, так и вспомогательных, являющихся приводом электрических генераторов двигателей. Кроме того, в судовой практике отчетливо прослеживается тенденция использования высоковязких сортов топлива не только для современных моделей СОД, но и перевода СОД предшествующих моделей (спроектированных с условием работы на легких сортах топлива) на эксплуатацию на топливе с повышенной вязкостью [14].

При работе СОД на высоковязких остаточных топливах наблюдается отклонение от нормального процесса сгорания в цилиндре, вызванное изменением параметров топливоподачи. Существенно увеличивается давление впрыска и изменяются фазы подачи топлива, причем эти отклонения тем значительнее, чем выше вязкость топлива. Тяжелые сорта



топлива по сравнению с дизельными характеризуются более низким цетановым числом, что приводит к увеличению периода задержки воспламенения при их сгорании. Вследствие этого к началу воспламенения в цилиндр дизеля подается несколько большее количество топлива, что обуславливает увеличение удельного расхода топлива и более жесткую работу дизеля. Тяжелое топливо сгорает медленнее чем дистиллятное, имеет больший процесс догорания, что способствуют увеличению температуры отработавших газов. Изменение процесса сгорания вызывает и более высокую, чем при работе на дизельном топливе, тепловую напряженность цилиндра [15, 16].

Традиционно эксплуатация судовых МОД на установившихся режимах работы производится на тяжелых сортах топлива. Температура воздушного заряда в цилиндре дизеля в момент впрыскивания топлива, а также длительный период времени, приходящийся на его воспламенение, позволяет надежно использовать в этих типах дизелей топливо ухудшенного структурного и фракционного состава. Время эксплуатации МОД на легком топливе, а также на смеси легкого и тяжелого топлива определяется их работой на пусковых режимах и зависит от назначения судна. Естественно, что в случае работы в прибрежных районах и частых портах захода, когда эксплуатация ГД происходит на режимах пуска и реверса, время работы дизеля на легком топливе повышается, как повышается и его расход. При длительных переходах эксплуатация ГД происходит только на тяжелых сортах топлива, причем время такой работы может достигать несколько десятков суток, что существенно снижает общие расходы легкого топлива.

Эксплуатационные режимы работы судовых СОД обеспечиваются как тяжелыми, так и легкими сортами топлива [17]. Использование маловязкого топлива обусловлено необходимостью обеспечения его надежного

самовоспламенения в течении более короткого (по сравнению с МОД) периода впрыскивания, длительность которого оценивается по выражению

$$\tau = \frac{\varphi_d}{6n}, \text{сек},$$

где  $n$  – частота вращения коленчатого вала дизеля, об/мин;

$\varphi_d = 15...35$  °пкв – действительная продолжительность подачи топлива в цилиндр.

Частота вращения коленчатого вала судовых МОД составляет 80...100 об/мин, а минимальное значение этого же параметра для СОД – 450...500 об/мин. Это приводит к тому, что даже при повышенной для СОД по сравнению с МОД продолжительностью подачи топлива в цилиндр время впрыскивания топлива и, соответственно, время его окисления, воспламенения и сгорания сокращается в 3..4 раза. Еще одной причиной использования в СОД легких сортов топлива является их частая работа на режимах пуска и частичного нагружения [18-20]. При этом часть тепловой энергии, подведенной в процессе сжатия, теряется из-за плохо прогретых поверхностей деталей ЦПГ, что существенно снижает температуру в цилиндре в момент впрыскивания топлива и вынуждает использовать топлива с меньшей температурой самовоспламенения.

Экологические требования, предъявляемые к СЭУ в целом и к судовым дизелям в частности, вынуждают проводить их эксплуатацию на топливах с пониженным содержанием серы. Согласно требованиям Международной конвенции MARPOL, в некоторых особых районах содержание серы в используемом топливе не должно превышать 0,1 % [21, 22]. При этом следует учитывать, что нефтеперерабатывающая промышленность в настоящее время еще не готова к производству требуемых объемов топлив с

подобным содержанием серы, а на рынок поступает топлива, фракционный состав которых содержит до 3 % серы [23, 24].

Применение топлива подобного фракционного состава ухудшает качество процесса сгорания, что, в том числе, приводит к повышенному износу деталей ЦПГ, цилиндрических крышек, выпускных клапанов, а также прогоранию лопаток газотурбонагнетателей (ГТН) и элементов газораспределительного тракта [25, 26]. Анализ данных по эксплуатации судовых СД, показывает, что износ их ЦПГ при работе на остаточных сортах топлива примерно в 2,5 раза больше по сравнению с использованием дистиллятных дизельных топлив. В той же пропорции сокращается период между капитальными ремонтами дизелей. Прежде всего, высокий износ и чрезмерное нагарообразование обуславливается значительным ухудшением группового и химического состава подобного топлива [27].

Использование тяжелых топлив в судовых СД требует создания систем топливоподготовки и обеспечения таких режимов их эксплуатации, которые способны нейтрализовать вредные воздействия физико-химических свойств и примесей топлива на надежность, долговечность и экономичность дизеля.

Увеличение вязкости топлива в процессе эксплуатации СД не оказывает заметного влияния на его распыливание, смесеобразование и сгорание в цилиндре дизеля, т.к. соответствующим подогревом можно добиться оптимальной вязкости топлива (5...12 сСт) перед его поступлением в цилиндр дизеля. Дизелестроительные фирмы рекомендуют верхний предел вязкости топлива для судовых СД 20...25 сСт при 50°C [28, 29].

Практически в СД могут быть использованы топлива с вязкостью до 380 сСт. Однако, вязкость топлива косвенно характеризует его групповой и химический состав. Топлива с повышенной вязкостью, как правило, характеризуются увеличенным содержанием ароматических углеводородов, асфальто-смолистых веществ и золы. Кроме того, с повышением вязкости

требуется большой подогрев топлива, что усложняет топливоподготовку и увеличивает затраты не только на подогрев, но и транспортировку и бункеровку [30, 31].

### 1.3. Анализ изменения эксплуатационных свойств топлив при их подготовке

Эксплуатационные свойства топлив оцениваются показателями, характеризующими процессы подачи, смесеобразования, сгорания, а также способность вызывать нагарообразование и изнашивание в деталях дизеля. Разные источники [32-36] определяют разные эксплуатационные свойства топлива, при этом все они к основным показателям относятся следующие: фракционный состав, температуры вспышки, воспламенения и самовоспламенения, цетановое число, плотность, вязкость, температуры помутнения и застывания, содержание механических примесей, алюмосиликатов, воды, кокса и асфальтенов, солей натрия и окислов ванадия, зольность, содержание серы; кислотность, теплота сгорания.

#### 1.3.1. Фракционный состав судовых топлив.

Фракционный состав топлива определяется количеством тех или иных нефтяных фракций в процентах по объему, выкипающих при определенных температурных пределах. Фракционный состав определяют путём перегонки топлива. Фракционный состав топлив является одним из важнейших показателей его качества, который дает возможность оценивать испаряемость его паров и выражает зависимость между температурой и количеством

перегоняющегося при этой температуре топлива. Фракционный состав (от которого зависит воспламеняемость топлива на пусковых режимах и особенно в условиях экстренного пуска) важен при использовании топлива в судовых СОД, в которых сгорание происходит за меньший промежуток времени.

Товарные сорта топлив обычно получают смешивание продуктов прямой перегонки нефти с продуктами ее вторичной переработки. Прямогонные дистилляты нефти (бензины, легроины, керосины, газойли) получают путем нагрева и испарения нефти при атмосферном давлении. Нефтяной остаток – прямогонный мазут, содержащий фракции нефти, вскипающие при температуре свыше 300...350 °С – используется для получения масляных погонов и является компонентом товарных сортов мазута, а также, наряду с другими прямогонными дистиллятами нефти, служит сырьем для вторичной переработки нефтепродуктов. Вторичная переработка нефти, целью которой является получение из нефти дополнительного количества светлых нефтепродуктов и улучшение отдельных показателей прямогонных дистиллятов, осуществляется при высоких температурах 500...700 °С и давлением 5...7 МПа методами термического или каталитического крекинга, гидрокрекинга и др. Получаемые в результате этих процессов нефтепродукты отличаются от прямогонных значительным изменением группового и химического состава в следствии деструкции (распада) углеводородов [11, 28, 37].

В дистиллятных продуктах крекинга, особенно в остаточных крекинг-мазутах, содержится большое количество непредельных и ароматических углеводородов и неуглеводородных соединений, а в доле остаточных топлив, (как прямогонных, так и полученных вторичной переработкой) кроме того, повышенное количество минеральных примесей.

Высоковязкое топливо имеет и более сложный фракционный состав. Тяжелые топлива, используемые для МОД и СОД, получают, как правило,

компаундированием остаточных топлив, содержащих фракции, кипящие при температуре 400...500 °С с дизельными топливами, температура кипения которых 200...300 °С. Последние добавляют в топливо для получения необходимой вязкости и снижения температуры застывания, что и определяет фракционный состав высоковязкого топлива [38].

Широкий фракционный состав для топлива, используемого в СОД и особенно в высокооборотных дизелях (ВОД), вызывает ухудшение качества распыливания, испарения и смесеобразования. Кроме того, при этом уменьшается полнота сгорания топлива и, как следствие, увеличивается его удельный расход [39-41].

Для топлив, используемых в СОД с частотой вращения до 500 об/мин, температурные пределы кипения не имеют важного значения, поэтому они не регламентированы стандартами. Время, отводимое на смесеобразование и горение, достаточно для полного сгорания топлива самого широкого фракционного состава. Однако применение топлива с возможно более узким фракционным составом способствует равномерному испарению капель в период самовоспламенения и интенсивному развитию пламени в период горения топлива в цилиндре дизеля.

### 1.3.2. Элементный состав топлива.

Расшифровать, т.е. идентифицировать «полный» химический состав судового топлива современными средствами пока не представляется возможным (поскольку в настоящее время получают и изучают химический состав нефти только до температур кипения узких фракций в максимальных пределах 500...580 °С), поэтому химический состав нефтяных топлив выражают двумя способами — элементным химическим составом и групповым химическим составом [42].

Элементный химический анализ топлив не раскрывает химической природы входящих в них соединений и поэтому не может дать достаточно полного представления об их свойствах, но позволяет рассчитать тепловой и материальный баланс горения топлива. Элементный химический состав – количественный состав химических элементов, входящих в топливо, выраженный в массовых долях или массовых процентах. Число химических элементов в составе топлива очень велико, но, не смотря на это, элементный химический состав топлива выражается зависимостью

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100\%,$$

которая определяет его основные горючие вещества: углерод С, водород Н, серу S, а также кислород О и азот N, находящиеся в сложных высокомолекулярных соединениях, и негорючие минеральные примеси, превращающиеся при сжигании топлива в золу А и влагу W.

Основной горючей составляющей топлива является углерод, горение которого обуславливает выделение основного количества тепла. Углерод содержится в топливах различного состава в количестве 83...88 % по массе, причем чем тяжелее нефть по плотности и фракционному составу, тем выше содержание углерода. Углерод входит в состав всех химических соединений топлива.

Вторым по процентному содержанию в топливе является водород, который составляет 10...14 % массы топлива, в более тяжелых топливах водорода меньше. Также как и углерод водород является составной частью всех химических соединений топлива. Водород и углерод являются основными горючими элементами топлива и носителями тепловой энергии [11, 14, 34].

Сера входит в состав многочисленной группы серосодержащих гетероатомных соединений. Топлива сильно отличаются по содержанию серы: в малосернистых сера составляет 0,01...0,5 % по массе, а в высокосернистых до 3,5 % по массе. В высококипящих фракциях нефти (выше 400 °С) серы обычно содержится значительно больше, чем в низкокипящих. Сера является одним из нежелательных элементов топлива [43].

Азот в топливе содержится в значительно меньших чем сера количествах (0,01...0,6 % по массе и лишь в отдельных случаях до 1,5 % по массе). Азотсодержащие соединения концентрируются в основном в тяжелых фракциях нефти (выше 400°С).

Кислород в топливе представлен в виде карбоновых и нафтенowych кислот, содержание его может быть от 0,05 до 0,85 % по массе. Кислород концентрируется в тяжелых фракциях нефти и является нежелательным элементом.

Кислород и азот в топливе являются органическим балластом, так как их наличие уменьшает содержание горючих элементов в топливе. Кроме того, кислород, находясь в соединении с водородом или углеродом топлива, переводит некоторую часть горючих компонентов в окислившееся состояние и уменьшает теплоту сгорания топлива. Азот при сжигании топлива в атмосфере воздуха не окисляется и переходит в продукты сгорания в свободном виде.

В составе топлива установлено более 500 индивидуальных и около 350 серо-, азот- и кислородсодержащих углеводородов, в нем обнаружено более 50 химических элементов. Содержание указанных соединений и примесей в топливе в первую очередь зависит от месторождении нефти, из которой оно получено, поэтому говорить о среднем химическом составе топлива можно только условно.



Кроме серы в топливах наиболее распространены углеводородные примеси, вода и механические примеси. Углеводородные примеси – это в основном гетероорганические соединения, входящие в состав исходного сырья. Это более всего характерно для дизельного топлива, вследствие их высокой молярной массы и высоких температур кипения. Прежде всего это сернистые соединения, углеводородные кислоты и смолисто-асфальтовые вещества. Вода попадает в топливо при транспортировке, хранении, и перекачивании топлива и ускоряет коррозию металлических деталей двигателя. Механические примеси ухудшают прокачиваемость топлива по системе топливоподачи, служат основой для образования смолистых отложений, увеличивают механический износ и коррозию металла. Особенно большой вред механические примеси приносят системам топливоподачи дизелей, вызывая повышенный износ прецизионных деталей. Основным источником механических примесей является атмосферная пыль.

Структурный состав топлива определяет одну из основных его характеристик – низшую теплоту сгорания  $Q_H$ , численное значение которой может быть определено по формуле Д.И. Менделеева

$$Q_H = 339,15C^p + 1256H^p - 108,86(O^p - S^p) - 25,12(9H^p + W^p).$$

От низшей теплоты сгорания топлива  $Q_H$  зависит его удельный эффективный расход  $b_e$

$$b_e = \frac{3600}{\eta_e \cdot Q_H},$$

где  $\eta_e$  – эффективный коэффициент полезного действия (КПД) дизеля.

При фиксированном значении эффективного КПД  $\eta_e = 0,45$  изменение структурного состава топлива приводит к следующим изменениям низшей теплоты сгорания и удельного эффективного расхода топлива (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Влияние структурного состава топлива на его низшую теплоту сгорания и удельный эффективный расход

| Изменение структурного состава топлива |       |       |       |       | $Q_n$ , кДж/кг | $b_e$ , кг/(кВт·ч) |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|----------------|--------------------|
| $C^p$                                  | $H^p$ | $S^p$ | $O^p$ | $W^p$ |                |                    |
| 87,0                                   | 11,3  | 1,0   | 0,4   | 0,3   | 41203          | 0,194              |
| 87,5                                   | 11,1  | 1,0   | 0,4   | 0,3   | 41870          | 0,191              |
| 87,2                                   | 12,6  | 0,1   | 0,05  | 0,05  | 42556          | 0,188              |

### 1.3.3. Групповой состав топлива.

Химический состав нефтяных топлив принято характеризовать содержанием основных групп углеводородов и других соединений [23, 42, 44]. Углеводороды нефти представлены тремя группами: парафиновые (алканы), наftenовые (цикланы или циклоалканы), ароматические (арены).

Парафиновые углеводороды (алканы или метановые углеводороды, гомологи метана, насыщенные углеводороды метанового ряда) – основная часть углеводородов топлива. Они имеют химическую формулу  $C_nH_{2n+2}$ , где С – углерод, Н – водород,  $n$  – количество атомов углерода. Алканы с числом атомов углерода от 1 до 4 являются газообразными и находятся в растворенном состоянии только в сырой нефти. Жидкие парафиновые углеводороды от  $C_5$  (температура кипения 36 °С) до  $C_{18}$  (температура кипения 320 °С) являются основой жидкого нефтяного топлива. Твердые парафиновые углеводороды начинают считать таковыми с углеводородов  $C_{19}$  или  $C_{20}$  и до максимально возможных в нефти. Такой термин в этом случае относится к нормальным алканам, представляющим действительно твердые микрочастицы. Твердые парафины – наиболее высокозастывающие углеводороды топлива, определяющие его температуру застывания, поэтому их содержание в топливах ограничено. Их содержание является классификационным признаком, по которому топлива относят к трем видам:

до 1,5 % – малопарафинистые, 1,5...6 % парафинистые, более 6 % – высокопарафинистые.

Нафтеновые углеводороды (цикланы) являются моноциклическими и полициклическими по строению и имеют химическую формулу  $C_nH_{2n}$ . нафтенy – желательный компонент всех нефтяных топлив, они имеют высокие теплоту сгорания и плотность и низкую температуру застывания.

Ароматические углеводороды (арены) являются ненасыщенными циклическими углеводородами, их содержание в нефти и нефтепродуктах различно. В легких фракциях их присутствие желательно (в определенных пределах) и необходимо для улучшения эксплуатационных характеристики (в частности для повышения детонационной стойкости). Ароматические углеводороды имеют повышенную термическую стабильность, вследствие чего для их самовоспламенения требуется более высокая температура и более длительный период задержки самовоспламенения, чем для нафтеновых и парафиновых углеводородов. Процесс сгорания ароматических углеводородов происходит с большой скоростью и сопровождается резким нарастанием давления в цилиндре, вызывающими «жесткую» работу дизеля. Отрицательное влияние ароматических углеводородов на протекание рабочего процесса в МОД сказывается значительно меньше, чем в СОД и ВОД. Это объясняется тем, что в МОД на смесеобразование и сгорание топлива отводится достаточно длительное время и сгорание происходит при высоком коэффициенте избытка воздуха ( $\alpha > 1,9$ ).

Гетерогенные соединения – это химические соединения углеводородов с одним или несколькими атомами различных химических элементов: серы, азота, кислорода, хлора и металлов. Нежелательные гетероатомные соединения существенно осложняют технологию переработку сырой нефти, оказывают влияние на эксплуатационные свойства конечных нефтепродуктов и уровень загрязнения окружающей среды.

Непредельные углеводороды – соединения, которые содержатся в дистилятных и остаточных продуктах крекинга и отсутствуют в сырой нефти и продуктах ее прямой перегонки. Добавление к топливу прямой перегонки, например, 20...30 % продуктов термического крекинга приводит к получению топлива с содержанием непредельных углеводородов около 10...12 %.

Непредельные углеводороды быстро окисляются и содержащие их топлива имеют низкую стабильность. Так, при хранении топлив, в которых находится только 1 % этих углеводородов, образуются осадки, увеличивается его коксуемость. В цилиндре дизеля непредельные углеводороды окисляются в предпламенном периоде, образуя смолистые вещества, что вызывает закоксовывание сопловых отверстий форсунок, усиленные отложения лака и нагара на деталях ЦПГ. Нагары отличаются высокой абразивностью, что усиливает износ деталей.

Важным компонентом как сырой нефти, так и продуктов нефтепереработки является сера и серосодержащие соединения [45, 46]. Сера в сырой нефти находится в связанном виде в количестве от 0,02 до 6 % по массе. По содержанию общей серы нефть условно подразделяется на малосернистую (до 0,5 %), сернистую (0,5...1,9 %) и высокосернистую (1,9...3 % и более). Идентифицировано около 300 серосодержащих соединений в нефти, которые выделяют в несколько групп. Простейшее соединение – сероводород  $H_2S$ , хотя его обычно определяют отдельно от других серосодержащих веществ. Меркаптаны – серосодержащие вещества (тиоспириты, тиолы) составляющие 2...10 % от всех серосодержащих веществ. Меркаптаны аккумулируются в легких фракциях, очень коррозионны и токсичны. Кроме меркаптанов различают также сульфиды, тиофены и др. [47].

Смолы и асфальтены – сложная смесь наиболее высокомолекулярных углеводородов и гетероатомных соединений с числом атомов углерода от 50 до 100. Асфальто-смолистые вещества представляют собой вязкие высокомолекулярные неуглеводородные органические соединения темного цвета, находящиеся в углеводородной среде в виде раствора или коллоидной системы, с размерами частиц менее 1 мкм. Эти вещества могут также находиться в углеводородном растворе в виде второй жидкой фазы. Смолы имеют плотность 990...1080 кг/м<sup>3</sup> и поэтому сепарацией топлива почти не отделяются. Смолы образуются в топливе в процессе его переработки, хранения и использования вследствие ряда сложных превращений нестабильных углеводородов, а также неуглеводородных соединений, содержащихся в нефтепродуктах. Смолы термически и химически неустойчивы и легко окисляются и уплотняются, а при нагревании расширяются. По отношению к различным растворителям выделяют следующие группы смолистых веществ. Нейтральные смолы, которые составляют большую часть смолистых веществ, содержащихся в топливе. Эти смолы растворяются в легком бензине, но не растворимы в щелочах и кислотах. Они тормозят окисления топлива, удлиняя тем самым процессы его воспламенения и сгорания.

Использование в дизелях топлива с высоким содержанием смол требует более совершенной организации топливоподготовки, процессов распыливания и смесеобразования, чем при работе на малосмолистых топливах. Смолы служат основным источником отложений в виде осадков и шлама в цистернах, трубопроводах и фильтрах; лаковых пленок на плунжерных парах ТНВД и иглах форсунок; кокса у сопловых отверстий форсунок; лаков и нагаров на деталях ЦПГ. Смолы значительно ухудшают деэмульгирующие свойства топлива, при их высоком содержании создаются стойкие водотопливные эмульсии. Косвенным показателем содержания смол

и других высокомолекулярных соединений в топливе служит его коксуетость, которая регламентируется стандартами на топливо [48].

Асфальтены – нейтральные вещества, растворимые в бензоле, хлороформе и других растворителях, но не растворимые в легком бензине. В нефтепродуктах асфальтены находятся в виде коллоидных систем. В присутствии серы асфальтены способны уплотняться в еще более высокомолекулярные вещества – карбены и карбоиды. Асфальтогенные кислоты – кислоты, растворяющиеся в спирте, бензоле и хлороформе. Реагируют с щелочами до температур не выше 120 °С.

Минеральные примеси, находящиеся в нефтепродуктах, в зависимости от происхождения можно разбить на две группы. К первой группе относятся загрязнения, попадающие в топливо в процессе переработки, транспортировки, хранения и применения. Сюда относятся продукты коррозии и износа технологического оборудования нефтеперегонных установок, цистерн, трубопроводов, а также почвенная пыль и минеральные соли, попадающие в топливо из воды при промывке товарных продуктов или при обводнении топлива в процессе хранения и использования. Большая часть минеральных примесей первой группы отделяется при отстаивании, сепарации и фильтрации топлива [49, 50]. Вторую, значительно меньшую группу, составляют зольные элементы нефти, перешедшие в товарные сорта топлива в процессе ее переработки. В золе нефтяных топлив содержится большое количество элементов (свыше 25), главным образом солей металлов, которые в сырой нефти находятся в растворенном виде или коллоидном состоянии.

Содержание золы в нефти колеблется в широких пределах – от 0,01 до 0,3 %. При перегонке нефти большая часть зольных элементов концентрируется в остаточном топливе, в асфальто-смолистой части. Большую часть нефтяной золы составляют натрий, ванадий, никель, кальций,

железо, алюминий. Пятиокись ванадия  $V_2O_5$ , также как окись железа  $Fe_2O_3$ , является сильным катализатором окисления  $SO_2$  и  $SO_3$ , поэтому присутствие ванадия в топливе усиливает коррозионный износ деталей ЦПГ.

Зольность топлива является одним из важных показателей его качества, нормируемых международными стандартами и ДСТУ. У высоковязкого топлива, используемого в МОД, зольность может достигать 0,15 %, а у дизельных топлив, применяемых в ВОД, содержание золы не должно превышать 0,01...0,02 % [12, 13].

#### 1.4. Анализ влияния эксплуатационных свойств топлива на технические характеристики судового дизеля

В последние годы практически во всех современных судовых СОД используются средне- и высоковязкие топлива. В связи с этим изменились и требования к качеству топлива, стало в большей степени проявляться влияние эксплуатационных свойств топлива на эффективность его использования, которая, в свою очередь, находится в прямой зависимости от качества его подготовки к сжиганию в дизеле.

Исследования по вопросам возможности применения в судовых СОД топлив ухудшенного фракционного состава развиваются по следующим направлениям:

- применение специальных присадок (антиокислительных, для предотвращения окислительных процессов и сокращения образования осадков при хранении топлива; диспергирующих, для предотвращения образования асфальто-смолистых агломератов; деэмульгирующих, для противодействия образованию стойких водотопливных эмульсий);

- применение многоступенчатой фильтрации с дополнительной гидродинамической обработкой;
- применение методов магнито- и электродинамической обработки;
- оснащение дизелей устройствами, обеспечивающими применение более вязкого топлива.

Для обеспечения качественной топливоподготовки и дальнейшего эффективного топлива использования, вновь строящиеся суда комплектуются специальными системами подготовки и подачи топлива, а топливные системы дизелей действующих судов переоборудуются с учетом возможности применения средне- и высоковязкого топлива.

Анализ работоспособности основных узлов и деталей дизелей показывает, что от качества топлива зависит работа, главным образом, деталей ЦПГ, топливной аппаратуры и выпускных клапанов [51, 52]. В табл. 1.2 показано распределение отказов по основным узлам дизелей фирм MAN–B&W и Wärtsilä-Sulzer.

Как следует из табл. 1.2, наибольшее количество отказов приходится на детали ЦПГ, топливную аппаратуру и выпускные клапаны. Нетрудно предположить, что это, прежде всего, связано с качеством подготовки топлива и обеспечением его сгорания. На состояние этих деталей основное влияние оказывают содержащиеся в топливе механические примеси (карбены, карбоиды и частицы неорганического происхождения), меркаптановые соединения серы, вода (особенно морская) и различные соли, которые при сгорании переходят в золу. При этом следует учитывать тот факт, что существующие системы топливоподготовки не в состоянии осуществить полную и комплексную очистку топлива от всех перечисленных примесей. Достаточно эффективным можно считать лишь решение вопроса по снижению в топливе механических примесей и воды, и в меньшей степени вопрос удаления золы, а практически нерешенным – удаление серы [53].



Таблица 1.2

## Распределение отказов по основным узлам дизелей

| Наименование узла или детали              | Отношение отказа каждого узла ко всем отказам |                 |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------|
|                                           | MAN-B&W                                       | Wärtsilä-Sulzer |
| Цилиндровые крышки                        | 9,7                                           | 10,3            |
| Детали ЦПГ                                | 16,3                                          | 14,3            |
| Выпускные клапаны                         | 19,7                                          | 18,3            |
| Подшипники движения                       | 5,3                                           | 6,1             |
| Топливная аппаратура                      | 22,4                                          | 23,6            |
| Газотурбонагнетатели                      | 5,2                                           | 5,5             |
| Механизмы и системы, обслуживающие дизель | 14,8                                          | 13,7            |
| Прочие узлы и детали                      | 6,6                                           | 8,2             |

## 1.5. Анализ методов подготовки топлива к его использованию

Анализ исследований по подготовки судового топлива к его сжиганию в цилиндре дизеля показывает, что традиционными методами очистки топлива являются отстаивание, сепарации и фильтрация, основной задачей которых является удаление из него воды, механических примесей и золы. Эта задача сформулировалась в результате анализа влияния примесей, находящихся в топливе, на показатели работы дизеля и тех методов и средств топливоподготовки, которыми располагает большинство СЭУ [15, 29, 34, 54-56].

Отстаивание топлива, как метод очистки топлива от механических примесей и воды, осуществляется под действием силы тяжести за счет большей плотности загрязняющих частиц.

В этом случае загрязняющие частицы в топливе оседают, не соприкасаясь между собой, и на каждую из них действуют сила тяжести или собственный вес, подъемная сила среды и сила сопротивления среды:

вес

$$P = \frac{\pi d^3 g \rho_{\text{ч}}}{6},$$

где  $d$  – средний диаметр частицы загрязнения, принимаемой за сферический объект, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{ч}}$  – плотность механических примесей или воды, кг/м<sup>3</sup>;

подъемная сила среды, определяемая по закону Архимеда,

$$F_{\text{А}} = \frac{\pi d^3 g \rho_{\text{т}}}{6},$$

где  $\rho_{\text{т}}$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;

сила сопротивления среды, которую в общем случае можно вычислить по закону Ньютона

$$F_{\text{Н}} = \frac{\zeta \pi d^2 \rho_{\text{т}} \omega_0^2}{8},$$

где  $\zeta$  – коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса и определяемый опытным путем, в зависимости от скорости частиц;

$\omega_0$  – скорость оседания частиц, м/с.

Если частицы падают в вязкой жидкости под действием собственного веса, то установившаяся скорость достигается, когда эта сила трения совместно с силой Архимеда точно уравновешиваются силой гравитации. Хотя в классической формулировке закон Архимеда выполняется только в

статическом случае, а не для движущихся тел, в данном случае выражение для силы Архимеда сохраняет традиционный вид.

При установившемся движении условие равновесия может быть записано так:

$$P - F_A = F_H.$$

Тогда скорость оседания твердых частиц в топливе определяется по выражению

$$\omega_o = \sqrt{\frac{4(\rho_q - \rho_t)gd}{3\rho_t\zeta}},$$

из которого видно, что скорость оседания загрязнений в топливе зависит, прежде всего, от разницы плотностей загрязнений и топлива и размера частиц.

Несмотря на большое число работ, посвященных оседанию частиц в гравитационном поле, универсальной зависимости для вычисления коэффициента сопротивления  $\zeta$  нет. В частном случае, при движении, частиц, имеющих форму шара, в вязкой несжимаемой жидкости коэффициент сопротивления может быть принят:

для ламинарного режима

$$\zeta_{\text{л}} = \frac{0,24\mu_t}{\omega_o d\rho_t};$$

для переходного режима

$$\zeta_{\text{п}} = 10\sqrt{\frac{\mu_t}{\omega_o d\rho_t}};$$

для турбулентного режима

$$\zeta_{\text{т}} = 0,5,$$

где  $\mu_{\text{т}}$  – коэффициент динамической вязкости топлива, Па·с.

С учетом выражения для  $\zeta_{\text{л}}$  получим расчетную зависимость для скорости оседания частиц в ламинарном потоке (при  $Re < 1$ ), т.е.

$$\omega_o = \frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{т}})gd^2}{18\mu_{\text{т}}}.$$

Для определения скорости оседания эмульгированной воды в топливе с учетом вязкости воды можно использовать формулу

$$\omega_o = \left( \frac{(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{т}})d^2}{18\mu_{\text{т}}} \right) \left( \frac{3(\mu_{\text{т}} - \mu_{\text{в}})g}{(3\mu_{\text{т}} + 2\mu_{\text{в}})} \right),$$

где  $\mu_{\text{в}}$  – коэффициент динамической вязкости воды, Па·с.

Действительная скорость оседания частиц в топливе отличается от расчетной, так как трудно точно определить плотность загрязнения и коэффициент сопротивления который во многом зависит от режима оседания. Причиной несовпадения расчетных и действительных скоростей оседания частиц при очистке топлива отстаиванием так же являются и конвективные токи, возникающие в емкостях, предназначенных для отстаивания топлива, вследствие изменения температуры наружного воздуха.

Основные недостатки очистки топлива отстаиванием – это длительность процесса и невозможность удалить мелкодисперсные загрязнения. Отстаивание является самым простым методом очистки топлива. В настоящее время он утрачивает свое значение и применяется в качестве самостоятельного метода – лишь для топлива с вязкостью до 20 сСт и в

качестве вспомогательного для более современных способов. Качество отстаивания зависит от времени процесса, температуры, высоты столба и плотности топлива, состояния моря. Интенсивность процесса отстаивания может быть проиллюстрирована диаграммой, показанной на рис. 1.1.

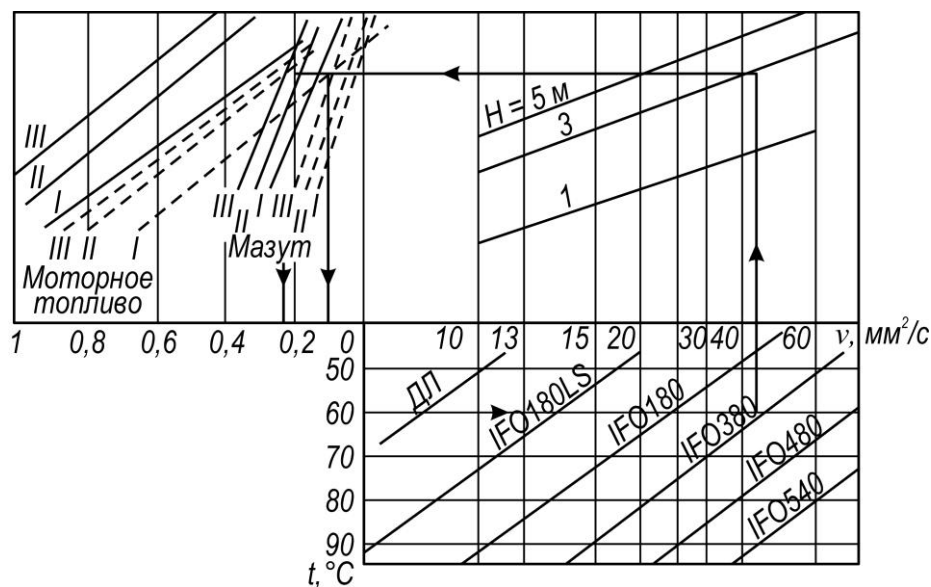


Рис. 1.1. Номограмма отстаивания топлива:

I—8 ч; II—16 ч; III— 4 ч — время отстаивания; --- вода; — механические примеси

Эффективность отстаивания характеризуется величиной коэффициента  $\sigma$ , показывающего степень удаления из топлива примесей.

Одним из основных методов очистки топлива на судах является сепарация, в процессе которой уменьшается содержание механических примесей, воды и золообразующих солей. Эффективность очистки (полнота освобождения от примесей) методом сепарации различна для различных видов топлива. Отличается она и для различных партий топлива одного и того же вида. Основное влияние на эффективность очистки топлива методом сепарации оказывает групповой состав, соотношение дистиллятных и остаточных компонентов, принятое при его компаундировании, и, наконец, выбранный режим сепарации.

При сепарации отделение примесей осуществляется за счет центробежной силы, определяемой по формуле:

$$F_{ц} = \frac{\pi d^3 \omega^2 r (\rho_{ч} - \rho_{т})}{6},$$

где  $\omega$  – угловая скорость;  $\text{рад}^{-1}$ ;

$r$  – радиус действия угловой скорости, м.

На притяжение частиц в топливе действует сила сопротивления (сила трения), так же называемая силой Стокса  $F_c$ , которая подчиняется закону Стокса:

$$F_c = 3\pi d \eta v,$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость топлива,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$v$  – скорость частицы,  $\text{м/с}$ .

Максимальная тонкость отсева с помощью сепараторов  $\approx 0,2 \dots 0,6$  мкм; при  $Re \leq 200 \dots 300$ .

Результаты исследований [57, 58] показывают, что маловязкое топливо очищается с большей эффективностью чем высоковязкое. Так, содержание механических примесей при сепарации топлив с вязкостью 50...100 сСт уменьшается на 70...80 %, с вязкостью 180...380 сСт – на 50...60 %, с вязкостью более 380 сСт – на 20...40 %. Содержание воды после процесса сепарации в маловязких топливах уменьшается практически на 100 %, в средневязких – на 95...100 %, в высоковязких – на 75...85 %. Указанные уровни снижения механических примесей и воды сопровождаются потерями горючей части топлива, в основном тяжелых ее компонентов (асфальтенов и смол). Эти потери могут достигать 2...3 %, снижая пропорционально теплотворную способность топлива, что является существенным недостатком сепарации [59, 60].

Вследствие того, что сепарация средне- и высоковязких топлив производится при подогреве топлива до 80...90 °С, этот метод подготовки сопровождается усилением окислительных процессов, повышающих содержание смолистых веществ.

Кроме потерь теплотворной способности топлива и усиления окислительных процессов, существенным недостатком сепарации является его малая эффективность по изменению дисперсности механических примесей (карбенов, карбоидов и частиц неорганического происхождения) содержащихся в топливе [11, 15, 61, 62]. При уменьшении общего количества частиц механических примесей относительная плотность распределения оставшихся в топливе частиц меньших размеров практически не изменяется. Таким образом, сепарация только снижает вероятность отказов в работе узлов двигателя (прежде всего топливной аппаратуры), но не исключает их полностью [11].

Очистка топлива путем фильтрации осуществляется на всем пути его следования из танков к дизелю. Средства фильтрации топлива при этом делятся на две основные группы: самоочищающиеся фильтрационные установки и топливные фильтры [63]. Примером использования дополнительных фильтрующих элементов в системе топливоподготовки судовых СОД может служить схема, рекомендованная корпорацией MAN-B&W (рис. 1.2) [64-66].

В судовых системах топливоподготовки также использовались альтернативные способы, обеспечивающие улучшение качества высокосернистых топлив. К таким способам прежде всего относятся использование гомогенизации, применение водотопливных эмульсий, использование присадок к топливу.

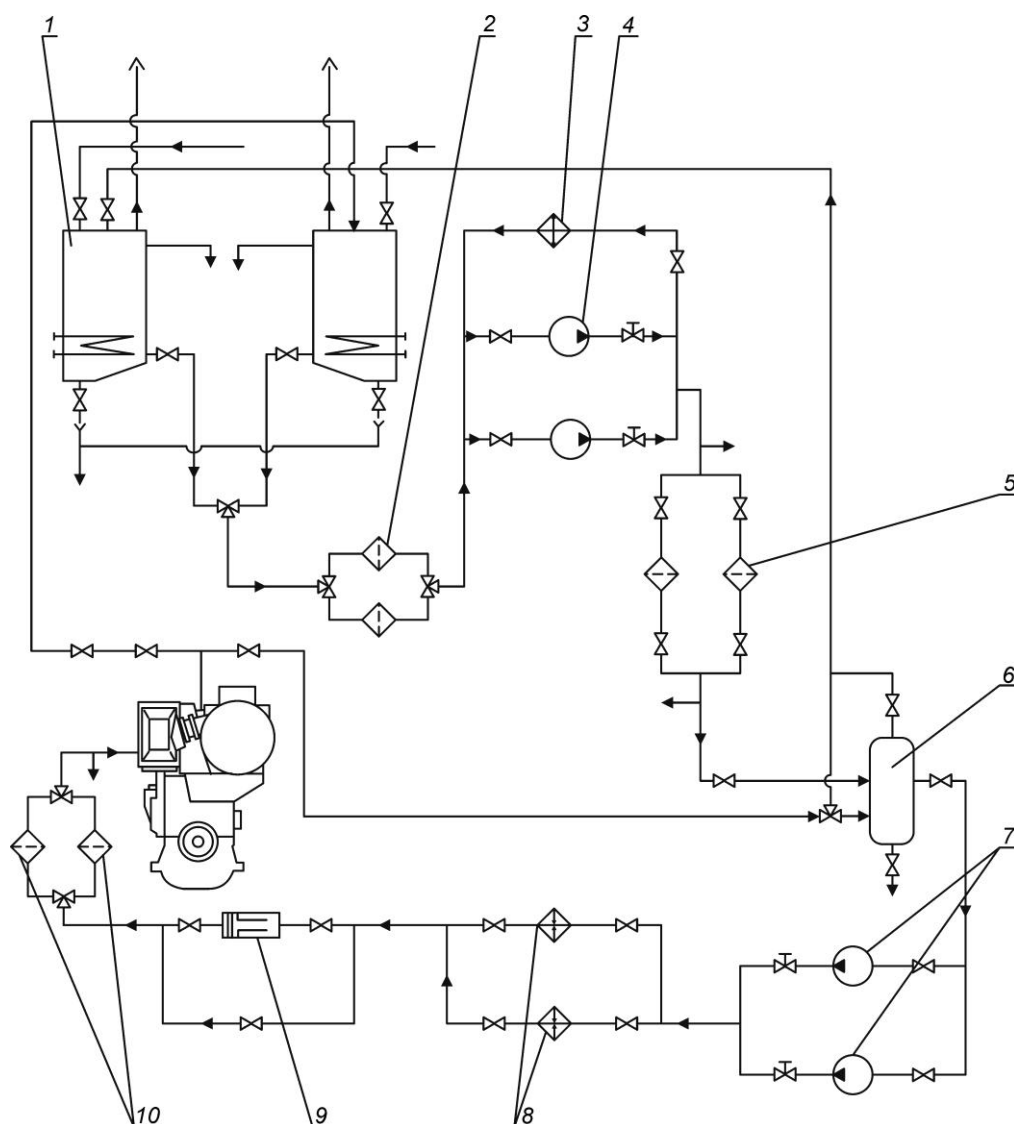


Рис.1.2. Расходная топливная система судового СОД:

1 – расходная цистерна тяжелого топлива; 2, 10 – сдвоенный фильтр;  
 3 – охладитель топлива; 4, 7 – топливоподкачивающие насосы;  
 5 – автоматический фильтр; 6 – смесительная цистерна; 8 – топливный подогреватель; 9 – регулятор вязкости

Гомогенизация, как явление, обеспечивающее повышение однородности топлива, применялась для дополнительной подготовки высоковязких топлив в сочетании со стандартными методами топливоподготовки. Большой вклад в развитие теоретических вопросов гомогенизации топлива, а также



возможности ее применения в судовых условиях внесла школа украинских ученых, возглавляемая д.т.н., профессором Ю. Я. Фоминым [16]. Основной задачей, решение которой обеспечивалось при гомогенизации топлива, была сохранение теплотворной способности топлива за счет уменьшения шламообразования и удаления с ним горючих составляющих топлива. Однако широкого распространения на флоте гомогенизаторы не получили, хотя и выпускались как отечественными, так и зарубежными производителями [15]. Прежде всего это было вызвано дополнительными затратами энергии на ее проведение, дополнительными вибрационными нагрузками, создаваемыми при гомогенизации на конструкции машинного отделения и судовые системы, а также необходимостью выполнения регламентных работ по обслуживанию таких систем.

Улучшение качества топлива и последующее совершенствование процесса сгорания топлива за счет применения водотопливных эмульсий достигало свой эффект для дизелей средней форсировки, с максимальным давлением цикла  $p_{max}$  не превышающем 8...9 МПа. Это было связано с тем, что использование водотопливных эмульсий основывалось на «эффекте микровзрывов» впрыснутый в цилиндр вместе с топливом частичек воды. Эти частички парообразовывались до момента самовоспламенения топлива, способствуя обогащению топливного факела дополнительным кислородом и повышая тем самым интенсивность сгорания топлива [7, 36]. Однако развитие судового дизелестроения и связанное с ним возрастание  $p_{max}$  до 14...16 МПа и выше привело к нивелированию эффекта «микровзрывов» и сейчас использование водотопливных эмульсий, как и прямой впрыск воды в воздушную и газовую магистрали, а также непосредственно в цилиндр дизеля, применяется только с целью обеспечения экологических параметров работы дизеля.

Применение присадок к судовым топливам также не имеет широкого распространения в судовой практике и используется лишь в единичных случаях фирмами, самостоятельно производящими такие присадки и имеющие в своем подчинении морские суда [47, 54]. При этом следует признать, что топливные присадки способствуют улучшению интенсивности процесса сгорания топлива, однако их воздействие на коррозионный износ ЦПГ и экологические показатели работы дизеля неоднозначно. Кроме того, большая часть присадок к топливу не отличается высокой стабильностью. Поэтому применение присадок к топливу малоэффективно в случае их растворения в объеме как отстойной, так и расходной цистерн, а требует дополнительных дозирующих устройств, обеспечивающих порционную подачу присадок в топливо непосредственно перед впрыскиваем в цилиндр дизеля, что усложняет и без этого разветвленную систему топливоподготовки.

Вопросы ультразвуковой обработки топлива также рассматривались при проектировании и модернизации систем топливоподготовки [41, 58]. Однако этот вид топливоподготовки изучался с точки зрения создания стойких смесей топлива разной плотности и структурного состава, а его использование с целью снижения концентрации серосодержащих компонентов с параллельным влиянием на коррозионный износ и экологические параметры работы дизеля, вообще не изучалось.

Таким образом, невзирая на большое количество исследований, выполненных как отдельными учеными, так и научными организациями, подавляющее большинство из них касается оптимизации стандартных способов топливоподготовки, не выполняя глубокого анализа альтернативных способов совершенствования систем топливоподготовки судовых СОД.

## 1.6. Выводы по разделу 1

В результате проведенного обзора литературных источников установлено следующее:

в мировом дизелестроении (в том числе и судовом) продолжается тенденция увеличения агрегатных мощностей среднеоборотных двигателей, одновременно с повышением эффективных показателей судовых дизелей растут энергетические затраты, связанные с обеспечением функционирования системы топливоподготовки и поддержания заданных эксплуатационных характеристик топлива;

судовая система топливоподготовки является системой, эксплуатация которой напрямую влияет на экономичность работы судовых СОД и энергетическую эффективность всей СЭУ;

управление процессами, происходящими в системе топливоподготовки, приводит к изменению структурных составляющих топлива и способствуют улучшению энергетических и экономических характеристик ДВС;

широкое применение высоковязких топлив в современных судовых СОД, а также перевод СОД предыдущих моделей на подобные сорта топлива требуют создания специальных систем и технологий его очистки от примесей и подготовки к сжиганию в цилиндре дизеля.

Приведенные факты свидетельствуют о необходимости исследований, направленных на разработку алгоритмов и способов повышения качества высокосернистых топлив, используемых в судовых СОД, путем совершенствования их систем топливоподготовки.

## РАЗДЕЛ 2

### ОБЩАЯ МЕТОДИКА ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 2.1. Выбор темы научного исследования

Один из выдающихся украинских ученых И. И. Кринецкий, посвятивший свои работы как судовой автоматике и энергетике, так и методологии научных исследований определял главный подход к научному исследованию следующей фразой: «...чтобы избежать односторонности в исследовании объекта, необходимо учесть все существенные стороны и связи предмета...» [68]. Это высказывание полностью определяет современные требования к диссертационному исследованию в категориях «объект исследования» и «предмет исследования». Подобный методологический подход позволяет определить тему и направление научного исследования, сформулировать главную задачу научного исследования и определить вспомогательные задачи, способствующие ее решению.

Выбор направления научного исследования основан на проведенной экспертной оценке возможных вариантов решения задачи повышения экологической эффективности и сохранения работоспособности судового СОД по следующим критериям: актуальность, научная новизна, экономическая эффективность, возможность использования в условиях морского судна, соответствие паспорту специальности, а также основным направлениям научной специальности и научной школы.

Направление научного исследования выбрано с помощью метода экспертных оценок по приведенным выше критериям и отражено в таблице 2.1, где положительной оценке соответствует знак «+», а отрицательной знак «-».

Таблица 2.1

Использование метода экспертных оценок для определения вариантов решения задачи повышения экологической эффективности и сохранения работоспособности судового СОД

| Вариант решения поставленной задачи                                                   | Критерии     |                 |                             |                                                     |                                     |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------|
|                                                                                       | актуальность | научная новизна | экономическая эффективность | возможность использования в условиях морского судна | соответствие паспорту специальности | сумма баллов |
| 1. Технологическое совершенствование элементов системы топливоподготовки              | –            | –               | +                           | –                                                   | –                                   | 2            |
| 2. Конструкционное совершенствование элементов топливной аппаратуры высокого давления | +            | –               | +                           | +                                                   | –                                   | 3            |
| 3. Разработка и применение альтернативных видов топлива                               | +            | +               | –                           | +                                                   | –                                   | 3            |
| 4. Совершенствование системы топливоиспользования                                     | +            | +               | –                           | +                                                   | +                                   | 4            |
| 5. Совершенствование системы топливоподготовки                                        | +            | +               | +                           | +                                                   | +                                   | 5            |

Выполненная экспертная оценка значимости исследований по технологическому совершенствованию элементов системы топливоподготовки показала, что на современном этапе развития судовых СОД и их топливных систем данный вариант решения поставленной задачи всесторонне изучен и не является актуальным.

Конструкционное совершенствование элементов топливной аппаратуры высокого давления СОД в настоящее время также достигло своего максимума, а отдельные варианты решения этой задачи относятся не к судовой энергетике, а к автомобильному и железнодорожному транспорту.

Оценка значимости варианта, связанного с разработкой и применением альтернативных видов топлива не подтверждается его экономической эффективностью, в связи с длительностью этапов его внедрения.

Кроме того, названные варианты не соответствуют паспорту специальности, основным направлениям научной специальности и научной школы.

Экспертные оценки значимости совершенствования систем топливоиспользования показали, что в основном все оцениваемые критерии имеют положительную оценку, однако экономическая эффективность данного варианта в настоящий момент еще не может быть обеспечена ввиду необходимости масштабных конструктивных преобразований систем СЭУ.

По результатам экспертных оценок наиболее оптимальным и целесообразным следует признать вариант совершенствования системы топливоподготовки, в связи с этим именно на его развитие направлено научное исследование и тема диссертации.

Учитывая выбранное направление научного исследования, а также на основании результатов анализа информационного поиска, выполненного в первом разделе, была определена тема научного исследования – совершенствование системы топливоподготовки судовых среднеоборотных дизелей путем снижения концентрации серосодержащих компонентов.

Основным обоснованием выбора темы исследований также является следующее:

- повышение качества тяжелых топлив, использующихся в судовых СОД способствует выполнению основных задач, возлагаемых на морское судно: обеспечение жизнедеятельности судового экипажа, перевозка груза в требуемом состоянии и в установленное время, получение экономической эффективности;

- судовые СОД используются в качестве как главных, так и вспомогательных двигателей, при этом системы топливоподготовки обоих типов двигателей постоянно требуют совершенствования в связи изменением как характеристик топлив, так и требований международных и национальных классификационных обществ к поддержанию его качества;

- топливные системы как МОД, так и СОД являются самыми разветвленными и насыщенными из всех судовых систем и обеспечивают не только преобразование потенциальной энергии топлива в полезную работу, но и выполнение основных законов термодинамики – изменение внутренней энергии и работу против внешних сил в рабочем цикле дизеля;

- судовое моторное топливо является дисперсной системой, в состав которой кроме углеводородных фракций входит большое количество дополнительных органических и неорганических компонентов, часть из которых оказывает отрицательное воздействие как на эксплуатационные свойства топлива, так и на протекание рабочего цикла в цилиндре дизеля и техническое состояние его элементов, что вынуждает искать варианты совершенствования систем топливоподготовки.

Важность проведения исследований, связанных с вопросами совершенствования систем топливоподготовки, подтверждается программой экономических реформ, проводимых в Украине, а также Транспортной стратегией Украины на период до 2020 г. Одной из целей этого документа в области развития транспортного сектора экономики Украины на период до 2020 года, является модернизация транспортной инфраструктуры и подвижного состава для обеспечения растущей мобильности населения и товаропотоков, обеспечение конкурентоспособных и качественных транспортных услуг, повышение экологической и энергетической эффективности транспортных процессов и безопасности перевозок пассажиров и грузов. Кроме того, проведение подобных исследований

согласуется с требованиями резолюций МЕРС.203(62) и МЕРС.213(63) Международной морской организации о введении новых правил энергетической эффективности судов и о разработке плана энергетической эффективности судна. В последней, в частности, в качестве одного из способов повышения энергетической эффективности рассматривается совершенствование топливоподготовки.

Актуальность темы исследования базируется на запросе практики о необходимости повышения экологической эффективности и сохранения работоспособности судовых СОД, а также поиска новых путей повышения качества топлива, применяемого в СОД и сохранения энергетической эффективности судна при передачи мощности от дизеля к потребителям энергии.

Научная направленность исследований соответствует паспорту специальности; профилю исследований, проводимых кафедрой технической эксплуатации флота Одесской национальной морской академии; основным направлениям специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки.

Научные исследования выполнялись в соответствии с тематикой госбюджетной научно-исследовательской работы Одесской национальной морской академии «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології» № ДР 0114U000346, в которой автор диссертации подготовил отдельные разделы.

В качестве объекта исследования в диссертации выбран судовой СОД, работающий на высокосернистом топливе.

Предметом исследования являются процессы топливоподготовки судового СОД.



## 2.2. Обоснование цели и задач диссертационного исследования

Учитывая тему диссертационного исследования, была сформулирована цель работы – повышение экологической эффективности и сохранение работоспособности судового СОД путем снижения серосодержания высоковязкого топлива.

Гипотеза научного исследования состоит в том, что десульфуризация высоковязкого топлива в условиях судна достижима путем воздействия на его серосодержащие молекулы.

Главная задача диссертационного исследования заключается в разработке способа, средств и эффективного режима десульфуризации высоковязкого топлива системой топливоподготовки судового СОД.

К сожалению, в настоящее время проблеме десульфуризации топлива, находящегося на борту судна при его автономном плавании не уделяется должного внимания. Национальные и международные стандарты на топливо позволяют использовать в практике эксплуатации СЭУ сорта топлива с широким диапазоном концентрации сернистых примесей. Содержание сернистых примесей в топливе регламентируется только на этапе проведения судовых бункеровочных операций. При этом, учитывая длительную автономную работу СЭУ в акватории мирового океана за пределами особых экологических районов, эксплуатация тепловых двигателей происходит на сортах топлива с максимально допустимым содержанием сернистых примесей, что в первую очередь связано с вопросами экономической эффективности. Использование подобных топлив является одной из причин ухудшения технического состояния деталей судовых СОД и снижения их энергетической эффективности.

В комплексных системах топливоподготовки вопросам ультразвуковой подготовки не уделяется должного внимания прежде всего из-за отсутствия исследований по определению оптимальных частот ультразвукового сигнала, способствующих максимальной эффективности процесса подготовки топлива при минимальных расходах энергии на его проведение, а также исследований, касающихся интенсификации процесса ультразвуковой обработки за счет создания дополнительных зон кавитации путем принудительной подачи воздуха в обрабатываемое топливо.

Для решения главной задачи необходимо решение ряда вспомогательных задач, а именно:

- 1) анализ процессов топливоподготовки высоковязких тяжелых топлив, используемых для работы судовых дизелей;
- 2) определение способов и средств контроля серосодержания в топливе после его десульфуризации;
- 3) установление диапазона оптимальных характеристик ультразвукового генератора при удалении серы из топлива;
- 4) анализ изменения коррозионного состояния ЦПГ судового СОД от серосодержания высоковязкого топлива.

Первой вспомогательной задачей диссертационного исследования предусматривается определение оптимального участка системы топливоподготовки, в пределах которого наиболее целесообразно проводить дополнительную ультразвуковую обработку топлива.

Вторая вспомогательная задача направлена на определение показателей, характеризующих процесс десульфуризации топлива при его ультразвуковой обработки.

Третья вспомогательная задача связана с экспериментальными исследованиями по определению диапазона оптимальных частот ультразвукового сигнала, обеспечивающего максимальное снижение

концентрации сернистых соединений в топливе при минимальных затратах энергии.

Четвертая вспомогательная задача связана с определением влияния ультразвуковой обработки топлива на коррозионный износ цилиндрических втулок и поршневых колец судового СОД.

При решении каждой вспомогательной задачи получены соответствующие научные результаты, а именно:

1) ультразвуковую десульфуризацию необходимо совершать в малоподвижном объеме топлива, предварительно очищенного от воды и механических примесей, что характерно для расходной цистерны системы топливоподготовки;

2) контроль серосодержания в топливе после его десульфуризации необходимо выполнять по объемной концентрации сульфида водорода, образующегося во время ультразвуковой обработки топлива и выделяющегося с его открытой поверхности;

3) оптимальная десульфуризация высокосернистых топлив при ультразвуковой обработке происходит в диапазоне частоты ультразвукового сигнала 22...26 кГц при амплитуде ультразвуковой волны 0,36...0,68 мкм;

4) ультразвуковая десульфуризация топлива с совместной интенсификацией процесса ультразвуковой обработки путем принудительной подачи воздуха в объем обрабатываемого топлива способствует 1,15...1,35 разовому снижению концентрации серосодержащих компонентов топлива и более чем трехкратному снижению коррозионного износа деталей судового СОД.

Решение главной задачи диссертационного исследования выполнено путем синтеза научных результатов решения вспомогательных задач.

### 2.3. Системный подход к разработке технологической карты научного исследования

Системный анализ и системный подход к решению научных задач позволяет оценить все факторы, способствующие достижению поставленной цели, и определить оптимальные способы их достижения [68, 69]. Определение «система» относится к философской категории научного познания, а комплекс вспомогательных задач, решаемых в любом диссертационном исследовании, переводит это понятие в категорию сложных систем. При решении научно-прикладных задач рассматриваются сложные системы, состоящие из большого числа отдельных элементов, которые находятся между собой во взаимосвязи и взаимодействии. На базе системного анализа судовых энергетических установок, предложенного украинским ученым-исследователем А. В. Козьминых [70] к таким системам (с точки зрения системного подхода) возможно отнести судовой СОД, а также его систему топливоподготовки, включающую в свой состав параллельно и последовательно работающие механизмы.

С учетом общей теории систем методологии научных исследований [71] и системного подхода к проблеме безопасного управления судном [72], судовой СОД можно представить как сложную многокомпонентную систему, с динамически меняющимися контролируемыми и регулируемыми параметрами, состоящую из дополнительных подсистем. Функционирование этих подсистем осуществляется от энергии топлива, вырабатываемой СОД. Исследование процессов, протекающих в отдельных подсистемах, приводит к решению задач по обеспечению экологической, экономической, энергетической эффективности работы двигателя либо энергетической установки.

С учетом изложенного в диссертационном исследовании был разработан замкнутый цикл научного исследования, который системно представлен в виде технологической карты исследования, приведенной на рис. 2.1.

Тема диссертационной работы формируется на основе «запроса практики» о необходимости поиска новых путей повышения экологической эффективности судовых СОД путем снижения серосодержания высоковязкого топлива.

Тезисом решения главной задачи является научный прогноз о том, что совершенствование системы топливоподготовки судовых может быть достигнуто за счет ультразвуковой кавитационной обработки топлива, способствующее снижению концентрации серосодержащих компонентов.

В качестве основных научных результатов диссертационного исследования принято следующее:

выполнен анализ способов подготовки высоковязкого топлива и определен участок топливной системы, наиболее подходящий для проведения ультразвуковой обработки топлива;

разработана методика определения оптимальной частоты ультразвукового сигнала при десульфуризации топлива по объемной концентрации сульфида водорода, образующегося и выделяющегося с открытой поверхности топлива при его ультразвуковой обработке;

определены оптимальные частоты и амплитуды ультразвукового кавитационного сигнала, обеспечивающие максимальное снижение концентрации сернистых соединений в топливе при минимальных затратах энергии;

определен характер изменения технического состояния ЦПГ, а также энергетических, экономических и экологических показателей судового СОД при проведении ультразвуковой кавитационной обработки топлива.

Основные экспериментальные исследования, выполненные в работе, проводились в лабораторных и производственных условиях.

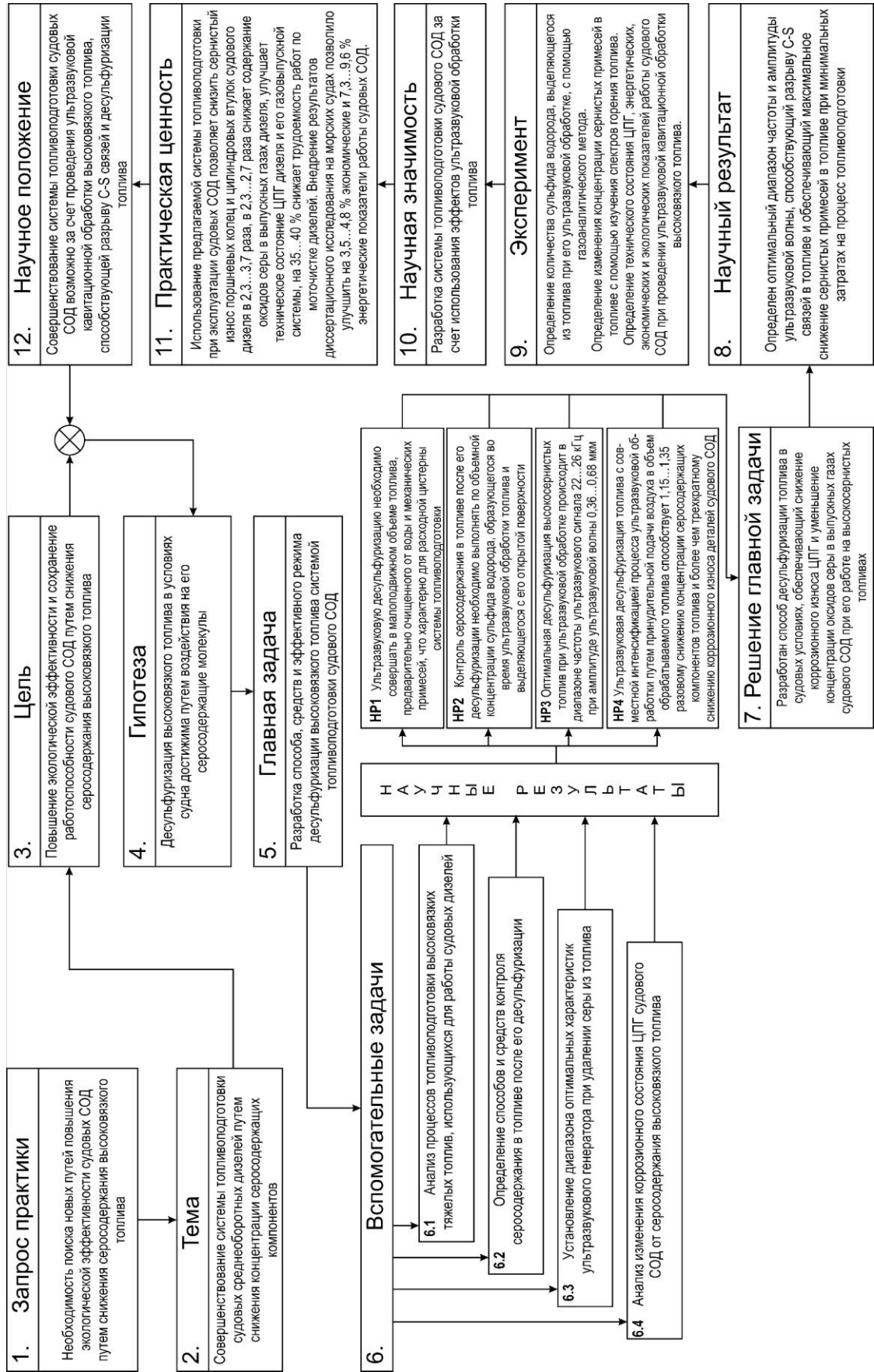


Рис. 2.1. Технологическая карта научного исследования

В условиях научной лаборатории с помощью газоаналитического метода определялось количества сульфида водорода, выделяющегося из топлива при его ультразвуковой обработке; с помощью изучения линейчатых спектров горения топлива определялось изменение концентрации сернистых примесей в топливе. Погрешность в измерениях при проведении лабораторных исследований не превышала 3,5 %.

В производственных условиях определялось техническое состояние и основные показатели работы судового СОД при проведении ультразвуковой кавитационной обработки топлива. При этом погрешность в измерениях не превышала 4,5 %.

Научная значимость диссертационного исследования состоит в разработке системы топливоподготовки за счет использования эффектов ультразвуковой кавитационной обработки топлива.

Практическая ценность – использование предлагаемой системы топливоподготовки при эксплуатации судовых СОД позволяет снизить сернистый износ поршневых колец и цилиндрических втулок судового дизеля в 2,3...3,7 раза, в 2,3...2,7 раза снижает содержание оксидов серы в выпускных газах дизеля, улучшает техническое состояние ЦПГ дизеля и его газовыпускной системы, на 35...40 % снижает трудоемкость работ по очистке дизелей. Внедрение результатов диссертационного исследования на морских судах позволило улучшить на 3,5...4,8 % экономические и 7,3...9,6 % энергетические показатели работы судовых СОД.

В диссертационном исследовании выдвинуты и подтверждено научное положение: совершенствование системы топливоподготовки судовых СОД возможно за счет проведения ультразвуковой кавитационной обработки топлива, способствующей разрыву C-S связей и десульфуризации топлива.

## 2.4. Выводы по разделу 2

1. В результате выбора темы диссертационного исследования по признакам актуальности, научной новизны, практической значимости, соответствии паспорту специальности и основным направлениям специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки сформулирована тема, направленная на повышение экологической эффективности и сохранения работоспособности судового СОД за счет совершенствования системы топливоподготовки путем разработки способа средств и эффективного режима максимальной десульфуризации топлива.

Объектом исследования выбран судовый СОД, работающий на высокосернистом топливе.

Предметом исследования являются процессы топливоподготовки судового СОД.

2. Целью исследования является повышение экологической эффективности и сохранение работоспособности судового СОД путем снижения серосодержания высоковязкого топлива.

3. Главная задача диссертационного исследования заключается в разработке способа, средств и эффективного режима десульфуризации высоковязкого топлива системой топливоподготовки судового СОД.

4. Решение главной задачи диссертационного исследования выполнено на основе синтеза результатов вспомогательных задач. На базе системного подхода замкнутый цикл научного исследования представлен в виде технологической карты исследования.



### РАЗДЕЛ 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕРНИСТЫХ ПРИМЕСЕЙ В ТОПЛИВЕ НА РАБОТУ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Третий раздел посвящен решению первой и второй вспомогательных задач диссертационного исследования, которыми являются:

анализ процессов топливоподготовки высоковязких топлив, использующихся для работы судовых дизелей;

определение способов и средств контроля серосодержания в топливе после его десульфуризации;

### 3.1. Сернистые соединения в топливе и их влияние на техническое состояние дизеля

Повышенное содержание неуглеводородных соединений в топливах для СОД является следствием ухудшения качества добываемой нефти и использования крекинг остатков в виде компонентов товарных топлив [11, 73]. В мировой практике добыча сернистой нефти возрастает. Содержание серы в полученном из нее топливе доходит до 4 %. Увеличению содержания серы сопутствует ухудшение группового и химического состава нефти, возрастает содержание ароматических углеводородов, асфальто-смолистых веществ и зольных элементов [74].

Большая часть сернистых соединений нефти имеет высокий молекулярный вес и температуру кипения, поэтому при прямой перегонке нефти от 70 до 90 % всех сернистых соединений конденсируется в остатках (мазут, гудрон). Так, например, в прямогонных продуктах нефти, содержащей в исходном состоянии 0,3...0,35 % серы, содержится: в бензине

– 0,045...0,048 %, керосине – 0,058...0,06 %, в мазуте – 0,58...0,65 % серы (т.е. вдвое больше чем в исходной нефти). Естественно, что с ростом процентного содержания серы в «базовой» нефти, повышается содержание серы в получаемом в результате ее перегонке топливе. Остаточное топливо, получаемое в результате вторичной переработки нефти (например, крекинг процесса), содержит еще большее количество серы, чем прямогонные мазуты. Это вызвано техническим распадом сернистых соединений, содержащихся в прямогонных фракциях нефти, причем значительная часть серы концентрируется в остаточных продуктах крекинга [75].

Большая часть сернистых соединений находится в высокомолекулярной (ароматической) части нефти, и примерно 70 % их группового состава до сих пор мало изучена в связи с несовершенством методов анализа [42]. Среди соединений серы наиболее исследованными являются: элементарная сера, сероводород и группа с высокими молекулярным весом – меркаптаны, сульфиды и дисульфиды [76].

Элементарная сера может содержаться в растворенном состоянии (до 3 %) в нефти и дистиллятных продуктах перегонки. Она очень агрессивна к цветным металлам, особенно к меди и ее сплавам (черные металлы при температуре 100...120 °С не подвергаются разрушениям). Находясь в топливе, она предотвращает жидкофазное окисление углеводородов, т.е. выполняет роль антиокислительной присадки.

Сероводород находится в нефти в растворенном состоянии и отличается высокой коррозионной активностью, особенно к меди и ее сплавам, а также к черным металлам.

Меркаптаны представляют собой жидкие, растворимые в нефти вещества с низкой температурой кипения (35...140 °С), благодаря чему при перегонки нефти переходят в дистилляты. Меркаптаны коррозионно активны. Их присутствие в товарных сортах топлива крайне вредно, т.к. они вызывают коррозию цветных металлов [77, 78].

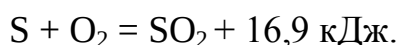
Необходимо отметить, что наиболее агрессивных сернистых соединений (элементарной серы, сероводорода и меркаптанов) в мазутах содержится значительно меньше, чем в сырой нефти, или в легких погонах, в то время, как общее содержание серы в остаточных топливах значительно выше.

Сульфиды – жидкие вещества, имеющие невысокую температуру кипения, поэтому при перегонке нефти поступают в светлые дистилляты, в которых содержится 50...80 % всех сернистых соединений. По химическим свойствам сульфиды являются нейтральными веществами.

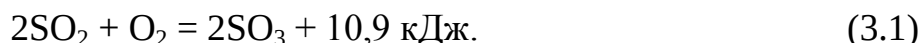
Дисульфиды относятся к вредным сернистым соединениям и составляют от 5 до 30 % сульфидов, находящихся во фракциях прямой перегонки нефти. Во фракциях и остатках термического крекинга они почти полностью отсутствуют, т.к. при высоких температурах разлагаются.

Еще до попадания в цилиндр дизеля агрессивные сернистые соединения, находящиеся в топливе, оказывают корродирующее воздействие на цистерны, трубопроводы, и детали топливной аппаратуры двигателя [79, 80].

В процессе горения топлива вся сера, находящаяся в различных соединениях (как нейтральных, так и агрессивных), сгорает. Причем ее полному сгоранию способствует большой избыток воздуха для горения в цилиндре СОД ( $\alpha=1,6...2,4$ ):



Часть образовавшейся двуокиси серы  $SO_2$  переходит в трехокись (серный ангидрид):



Интенсивность этой реакции зависит от концентрации в цилиндре дизеля  $\text{SO}_2$  и кислорода, от температуры и давления газов, наличия и степени эффективности катализаторов [81].

С увеличением коэффициента избытка воздуха для сгорания, общего содержания серы в топливе, а также с повышением давления в цилиндре интенсивность образования  $\text{SO}_3$  возрастает. Повышение температуры замедляет образование  $\text{SO}_3$ , т.к. реакция (3.1) является экзотермической [82]. Например, при атмосферном давлении и температуре  $410^\circ\text{C}$  все 100 %  $\text{SO}_2$  могут перейти в  $\text{SO}_3$ , а при температуре  $1000^\circ\text{C}$  и том же давлении – только 1%. Изменение температуры газов оказывает на процесс образования  $\text{SO}_3$  более сильное влияние, чем изменение их давления, в следствии чего максимальное количество  $\text{SO}_3$  в цилиндре двигателя образуется в условиях относительно низких температур, т.е. в конце расширения продуктов сгорания в цилиндре и во время их выпуска.

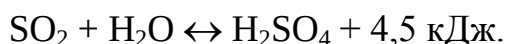
Реакция окисления  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$  без катализаторов протекает медленно. Однако, в присутствии таких активных соединений, как окись железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  или пятиокись ванадия  $\text{V}_2\text{O}_5$ , образование серного ангидрида значительно ускоряется. Часть этих окисей осаждается в нагарах, остальная находится в продуктах горения в виде тонкой суспензии, т.е. в состоянии максимальной активности.

Серный ангидрид при температуре выше  $400^\circ\text{C}$  диссоциирует на  $\text{SO}_2$  и  $\text{O}_2$ , причем с увеличением температуры скорость диссоциации резко возрастает. При высоких температурах газов в цилиндре уменьшается каталитическая активность  $\text{V}_2\text{O}_5$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , в результате чего наибольшее количество  $\text{SO}_3$  образуется в цилиндре дизеля в конце хода расширения.

Трехокись серы при высоких температурах деталей ЦПГ, изготовленных из чугуна и стали, может вступить с ними в непосредственную реакцию, вызывая газовую коррозию, которая носит чисто химический характер и наблюдается при температурах на поверхностях свыше  $1000...1100^\circ\text{C}$ .

Поскольку в дизелях поверхность деталей ЦПГ до таких высоких температур не нагревается, газовая коррозия, вызываемая присутствием в цилиндре трехоксида серы, практически не имеет места.

Повышенный износ деталей двигателя при работе на сернистых топливах обусловлен, главным образом, электрохимической (влажной) коррозией. Серный ангидрид, находящийся в цилиндре в газообразном состоянии, соединяясь с парами воды, всегда присутствующей в цилиндре, образует пары серной кислоты



Повышение температуры способствует диссоциации паров серной кислоты, поэтому наиболее благоприятные условия для их образования бывают в конце расширения продуктов сгорания и при выпуске. Количество серной кислоты, конденсирующейся на зеркале цилиндрической втулки, возрастает с понижением температуры ее стенок и повышением точки росы паров  $\text{H}_2\text{SO}_4$  [83, 84].

Таким образом, в дизеле может иметь место газовая коррозия и коррозия, происходящая в жидкой фазе, которые зависят от температуры деталей ЦПГ и от точки росы продуктов сгорания сернистого топлива (рис. 3.1).

При температуре внутренней поверхности дизеля превышающей точку росы газовой смеси, продукты сгорания не конденсируются и коррозия может происходить только с участием газовой фазы.

Очевидно, что интенсивность газовой коррозии будет возрастать с температурой, подчиняясь общему закону повышения скорости химических реакций с увеличением температуры и замедления при снижении

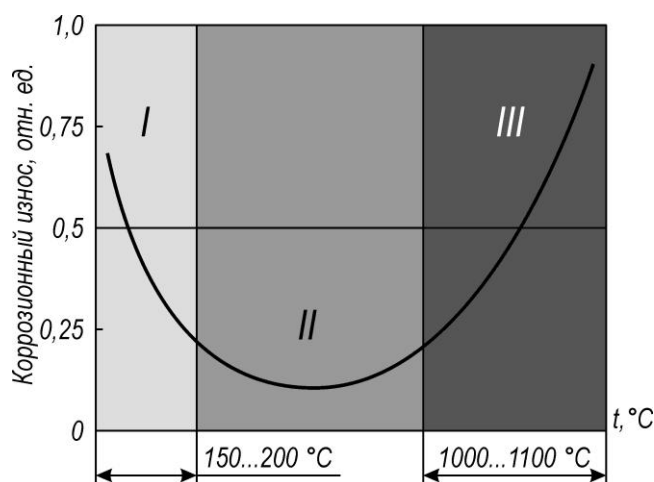


Рис. 3.1. Зависимость коррозионного износа деталей дизеля от температуры при работе на сернистом топливе:

*I* – зона кислотной коррозии; *II* – зона минимальных износов; *III* – зона газовой коррозии

температуры. При снижении температуры ниже точки росы будет происходить конденсация воды и образование сернистой или серной кислоты. Этот процесс будет иметь место на тех поверхностях дизеля, температура которых ниже температуры насыщения (точки росы) продуктов сгорания. Например, на внутренней поверхности втулки цилиндра, охлаждаемой снаружи водой.

Корродирующее действие образующихся на стенках цилиндра растворов серной кислоты определяется их концентрацией и температурой. Серная кислота крепостью свыше 93 % не действует на черные металлы, в то время как разбавленная легко вызывает их коррозию. Наиболее активна по отношению к чугуну кислота с концентрацией от 3 до 20 %.

Таким образом, по мере снижения температуры стенки цилиндра ниже температуры насыщения интенсивность коррозии вновь начинает резко возрастать и кривая коррозии принимает вид, показанный на рис. 3.1, т.е. имеет минимум на участке температур, несколько превышающих температуру насыщения.

В дизелях газовой коррозии более всего подвержены тарелки выпускных клапанов, но особое значение это вид коррозии имеет для газовых турбин газотурбокомпрессоров.

На рис. 3.2 показано сравнение газовой коррозии в среде  $\text{SO}_2$  ряда металлов [85]. Для дизелей большое значение имеет кислотная коррозия, происходящая в жидкой фазе, т.к. основные элементы ЦПГ, например, стенки поршня, втулки цилиндра и поршневые кольца имеют такие температуры, при которых возможна конденсация продуктов сгорания сернистых топлив.

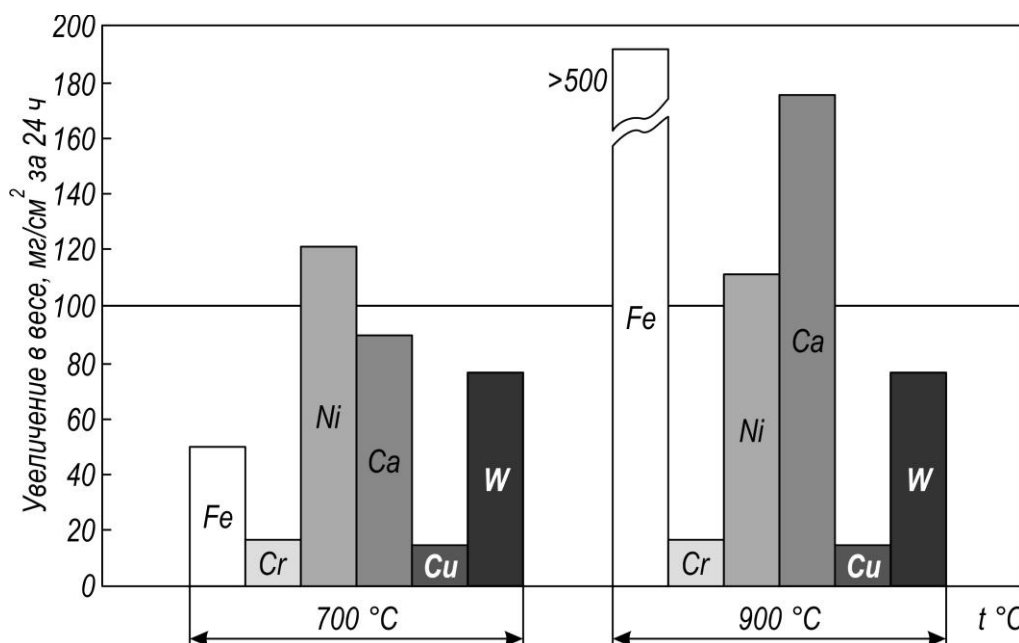


Рис. 3.2. Сравнение газовой коррозии для ряда металлов в среде  $\text{SO}_2$  (по Гадфильду)

Усиленный коррозионный износ, наблюдаемый при работе дизелей на высокосернистом остаточном топливе, вызывается не только повышенным содержанием серы в топливе, но и ухудшением его сгорания, что особенно проявляется при наличии в топливе большого количества углеводородов и асфальто-смолистых веществ. Образующиеся в цилиндре дизеля продукты неполного сгорания топлива – аморфные углеродистые частички, поглощают

пары серной кислоты и воды и, оседая на поверхности металла, вызывают его коррозию.

Разрушающиеся частички чугуна вместе с сульфатом железа (продуктом коррозии) под воздействием высокой температуры превращаются в окись железа, обладающую сильными абразивными свойствами.

Наличие в топливе серы увеличивает также абразивный износ трущихся поверхностей, поскольку сульфаты способствуют затвердеванию отложений углеводородов. Кроме того, накопление сернистых соединений в нагарах делает их более твердыми.

Окислы серы ускоряют полимеризацию углеводородов топлива и масла. Продукты полимеризации не растворяются в масле и, будучи липкими, прочно удерживаются на поверхности металла в виде лаковой пленки, в которой цементируются твердые частицы из продуктов сгорания. Абразивные частицы, в свою очередь, создают на зеркале цилиндровой втулки мелкие царапины и риски, что усиливает коррозионную активность растворов серной кислоты, проникающей вглубь металлической поверхности [86, 87].

### 3.2. Методы определения серы в нефтепродуктах

Органические соединения серы являются природным компонентом сырой нефти. При термическом воздействии в процессе переработки нефти сера и ее соединения попадают в нефтепродукты в различных концентрациях.

Основные формы присутствия серосодержащих соединений в нефтепродуктах следующие:



- сероводород  $\text{H}_2\text{S}$ , образующийся при термическом разложении серосодержащих соединений;
- элементарная сера, продукт окисления сероводорода;
- меркаптаны  $\text{R-SH}$ ;
- сульфиды или тиоэфиры  $\text{R-S-R}$ ;
- дисульфиды и политиоэфиры  $\text{R-S}\dots\text{S-R}$ ;
- тиофен  $\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$  и его производные;
- тиофан или тетрагидротиофен  $\text{C}_4\text{H}_8\text{S}$  и его производные;
- бициклические и полициклические серосодержащие соединения;
- кислые и средние эфиры серной кислоты и сульфокислоты, образующиеся в процессе очистки нефтяных дистиллятов [88].

Присутствие этих соединений нежелательно, т.к. они вызывают коррозию оборудования и деталей двигателей, а также загрязняют атмосферу при сгорании.

Разработано множество методов определения серы, от классических химических, например, сжигание в бомбе или лампе с последующим титриметрическим или гравиметрическим окончанием, до современных инструментальных, включая ультрафиолетовую и рентгеновскую флуоресценцию [89]. Выбор подходящего метода для решения аналитической задачи зависит от природы и состава анализируемого объекта, требуемого диапазона концентраций и необходимой точности проведения исследований [90–94].

В табл. 3.1 перечислены стандартные методы определения серы в нефтепродуктах утвержденные национальным (Госстандартом Украины); а также международными классификационными обществами, в частности ASTM (American Society for Testing and Materials) – Американским Обществом по Испытанию Материалов), API (American Petroleum Institute) – Американский институт нефти, IP (Institute of Petroleum) – Институт Нефти,

Таблица 3.1

## Стандартные методы определения общей серы

| Метод                                                  | ASTM            | IP          | EN ISO          | UOP         | ГОСТ/<br>ДСТУ     |
|--------------------------------------------------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-------------------|
| Бомбовый метод                                         | D129            | 61          | –               | –           | 3877              |
| Ламповый метод                                         | D1266           | 62,<br>107  | –               | –           | P51859,<br>19121  |
| Сжигание в кислородно-водородной грелке                | –               | 243         | 24260           | 586         | –                 |
| Сжигание в кварцевой трубке                            | D1551           | 63          | –               | 1437        |                   |
| Высокотемпературный метод                              | D1552           | –           | –               | 864         | –                 |
| Волнодисперсный рентгенофлуоресцентный анализ          | D2622,<br>D6364 | 497,<br>447 | 14596,<br>20884 | –           | P52660-<br>2006   |
| Окислительная микрокулометрия                          | D3120,<br>D3961 | 373         | –               | 727,<br>731 | –                 |
| Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ      | D4294,<br>D6445 | 336,<br>496 | 20847,<br>8754  | 836         | P50442,<br>P51947 |
| Волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ       | D4927,<br>D6443 | 407         | –               | 842         | –                 |
| Окислительный пиролиз и ультрафиолетовая флуоресценция | D5453           | 490         | 20846           | –           | P20846-<br>2006   |
| Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ      | D7212           | 531         | –               | –           | –                 |
| Рентгенофлуоресцентный анализ                          | D7220           | 532         | –               | –           |                   |
| Восстановление на никеле Ренея                         | –               | –           | –               | 357         | 13380             |

EN ISO (Europäische Norm International Organization for Standards) – Стандарты Западной Европы Международной Организации по Стандартизации, UOP (Universal Oil Products), Госстандартом России, которые в настоящее время широко применяются наряду с национальным стандартом [95, 96].

Рассматриваемые методы относятся к количественному определению суммарного содержания соединений серы (общей серы) в нефти, углеводородных жидкостях, топливах и смазках.

Все эти методы можно условно разделить на 3 группы:

1) методы, основанные на окислении серы и последующем определении оксидов: ASTM D129, D1266, D1551, D1552, D3120, D5453, D6920 и их аналоги;

2) методы, основанные на восстановлении серы до  $H_2S$ : ASTM D4045, UOP 357, ГОСТ 13380;

3) спектральные методы:

а) основанные на рентгеновском излучении: ASTM D2622, D4294, D6334, D6443, D6445, D7039, D7212, D7220 и их аналоги;

б) атомно-эмиссионные: ASTM D4951, D5185;

в) определение линейчатых спектров горения.

### 3.3. Влияние составляющих серы в топливе на работу дизеля

Воздействие продуктов сгорания высоковязких сернистых топлив на детали дизеля и прежде всего детали ЦПГ приводит к повышенному износу цилиндрических втулок и поршневых колец и усиливает отложение нагара и лака в цилиндрах и выпускной системе дизеля. Все это сильно затрудняет

обслуживание дизелей, т.к. требуются более частые выводы судов из эксплуатации для моточисток дизелей и замены изношенных деталей.

В таблице 3.2 приведены сведения для некоторых типов дизелей по износам цилиндровых втулок при работе на дизельном и тяжелом топливе (с вязкостью 380...420 сСт при 50° С и содержанием серы 0,05 и 2,3 % соответственно) [97].

Таблица 3.2

Износ цилиндровых втулок судовых СОД при работе на топливах с различным содержанием серы

| Фирма производитель и тип дизеля              | Средний износ на 1000 часов работы, мм |                              |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|
|                                               | на дизельном топливе (S=0,05 %)        | на тяжелом топливе (S=2,3 %) |
| MAN B&W Diesel Group, L21/31, L32/40          | 0,08...0,16                            | 0,11...0,36                  |
| Wärtsilä Corporation, Wärtsilä26, Wärtsilä46  | 0,05...0,20                            | 0,12...0,47                  |
| Caterpillar Marine Power System, MaK20, MaK43 | 0,05...0,08                            | 0,15...0,53                  |
| Daihatsu Diesel MFG Co. Ltd, DE23, DK32       | 0,08...0,11                            | 0,13...0,45                  |
| SEMT Pielstick, PA5, PC4.2                    | 0,06...0,12                            | 0,17...0,42                  |

На рис. 3.3 а, б показано изменение скорости износа цилиндровых втулок и поршневых колец в зависимости от содержания серы в топливе. При увеличении содержания серы от 0,8 до 2,1 % (т.е. в 2,6 раза), происходит увеличение износа цилиндровых втулок в 1,6...1,7 раза, а износ поршневых колец возрастает в 1,9...2,1 раза [98]. Следует отметить, что исследования выполнялись для масел, щелочной состав которых составляет 10 мгКОН/г (для масла M16E10) и 30 мгКОН/г (для масла Mobilgard 343).

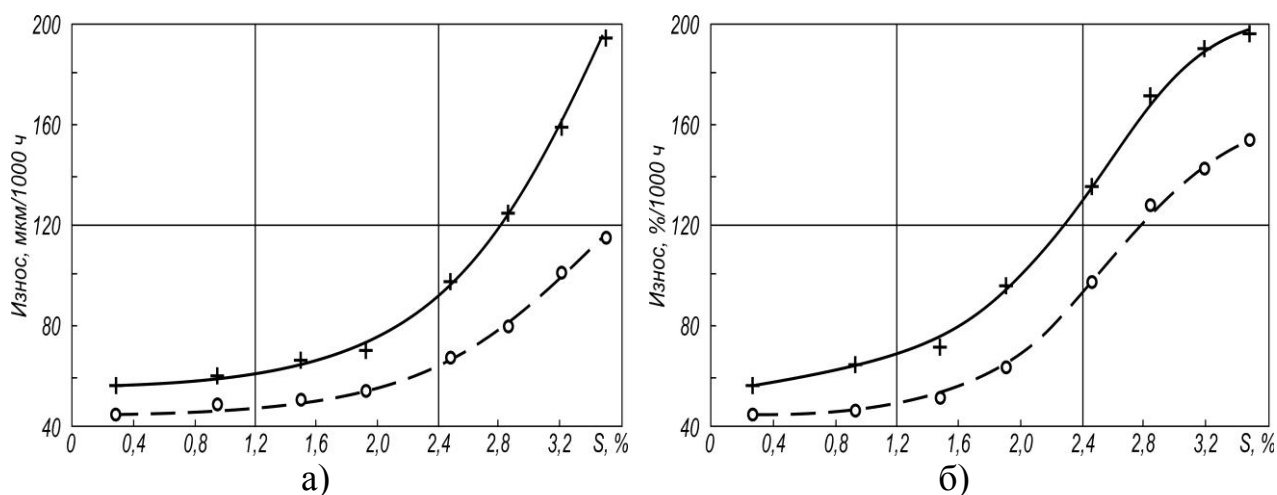


Рис. 3.3. Влияние содержания серы в топливе на износ ЦПГ:

а) цилиндровые втулки; б) поршневые кольца):

———— — масло M16E10; — — — — - масло Mobilgard 343

Сравнение износа деталей ЦПГ при работе двигателя на топливе с разным содержанием серы (2,1 и 2,7 %), выполненное в [99], показало, что подобное увеличение приводит к росту износа цилиндрических втулок в 3,6...3,7 раза, а поршневых колец в 2,8...2,9 раза.

Причиной более быстрого роста скорости износа ЦПГ по сравнению с ростом содержания серы в топливе является повышенное содержание в высоковязких топливах крекинг-остатков, ухудшающих сгорание топлива и повышающих зольность, содержание механических примесей и других вредных компонентов. Так, в прямогонных сортах топлива содержится в 3,2...3,4 раза меньше золы и в 7,3...7,5 раз меньше механических примесей чем в остаточных.

Наиболее агрессивными компонентами золы являются отдельные окислы и соли, входящие в ее состав, такие как окись кремния  $\text{SiO}_2$ , окись железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и соли натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaCl}$ . Эти компоненты золы в основном действуют как абразивы. Удаление  $\text{SiO}_2$  и значительной части  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  позволяет в отдельных случаях уменьшить износ цилиндрических втулок на 50 %. Отметим, что в

большинстве случаев зольные примеси действуют как абразивы, поэтому в качестве их противодействия используют повышенную на 5...7 %

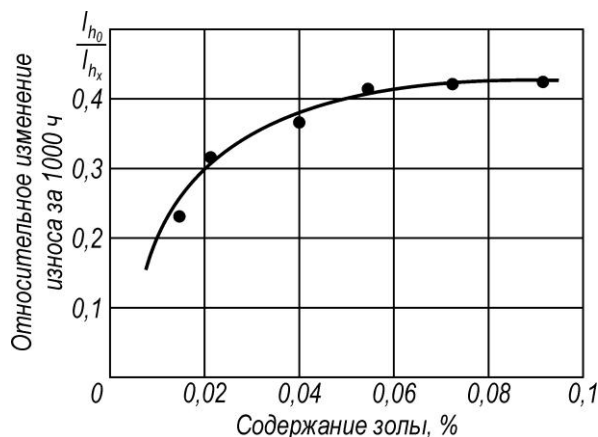


Рис. 3.4. Относительное изменение износа цилиндрических втулок в зависимости от содержания золы в топливе:

$I_{h_0}, I_{h_x}$  – значение износа при 0%-ом и  $x\%$ -ом содержании золы в топливе

маслоподачу. На рис. 3.4 приведена зависимость износа втулок от содержания золы в топливе. Необходимо отметить также, что с увеличением содержания серы в топливе скорость износа цилиндрических втулок растет быстрее, чем скорость износа поршневых колец. Так, по данным [100], износ цилиндрических втулок при работе дизеля на топливе с содержанием серы 1,8 и 2,3 % возрос в 5,7 раза, а суммарная

потеря в весе комплекта поршневых колец увеличилась только в 3,2 раза. Причина этого – недостаточное поступление нейтрализующих компонентов масла в зону максимального износа, т.е. в верхнюю часть цилиндрической втулки. Свежее масло, поступающее в нижнюю часть цилиндра, при перемещении вверх расходует часть щелочных присадок на нейтрализацию растворов кислот в нижней части зеркала цилиндрической втулки и на поршневых кольцах. Таким образом, поршневые кольца, с помощью которых масло распределяется по зеркалу цилиндрической втулки, подвергаются в первую очередь воздействию его нейтрализующих присадок, поэтому скорость их износа с увеличением содержания серы в топливе растет меньше, чем скорость износа верхней части цилиндрической втулки.

Образование некоторого количества нагара на стенках камеры сгорания, днище поршня, клапанах и выпускной системе дизеля является практически

неизбежным, независимым от количества тех или иных компонентов в топливе. Однако, применение сернистых топлив повышает общее количество нагара, отложений и меняет характер углеродистых частиц, делая их более плотными и твердыми [101].

Увеличение нагарообразования зависит не только от общего количества серы в топливе, но и от природы входящих в него соединений. Сера в топливе изменяет свойства отложений, способствуя образованию более плотных, трудноудаляемых нагаров с высокой абразивностью.

Повышенным износом характеризуются пусковые режимы работы дизеля, в особенности если они происходят на сернистом топливе. Это особенно актуально именно для судовых СОД, пуск которых (в отличие от МОД) может выполняться без предварительного прогрева с помощью циркуляции масла и воды в элементах дизеля. В этот период смазка ЦПГ дизеля осуществляется недостаточно эффективно, сам дизель находится в непрогретом состоянии, все это создает благоприятные условия для возникновения кислотной коррозии.

Приведенные данные относительно влияния температуры деталей ЦПГ на возникновение электрохимической коррозии подчеркивают важность поддержания оптимального температурного режима охлаждения дизеля.

Нежелательные последствия, обусловленные наличием в топливе сернистых и других неуглеводородных соединений, сделали первоочередной задачей процесс обессеривания нефтепродуктов. В нефтеперерабатывающей промышленности используется ряд методов обессеривания топлива, из которых наиболее эффективным является метод гидроочистки [102]. Однако, большие капиталовложения, необходимые для обеспечения процесса по обессериванию топлива, вынуждают искать другие пути решения задачи нормальной и рентабельной задачи эксплуатации СОД на сернистых топливах. С этой целью рядом авторов были проведены широкие исследования по совершенствованию системы топливоподготовки на борту

судна; обеспечению более полного сгорания высоковязких топлив; улучшению качества материалов деталей цилиндра наиболее подверженных коррозии; повышению температуры воды, охлаждающей двигатель; использованию присадок к топливу и маслам [36, 52, 57, 62, 87].

### 3.4. Общая характеристика способов защиты деталей дизеля при работе на сернистых топливах

Исходя из того, что в горючей массе топлива находятся разнообразные сернистые соединения (элементарная сера, сероводород, меркаптаны, сульфиды, дисульфиды, тиофены, теофаны, сульфокислоты и др.), взаимодействующие с деталями ЦПГ, крышкой цилиндра, выпускными и продувочными клапанами при различном физико-химическом состоянии топлива, можно обозначить следующие основные пути защиты этих узлов дизеля:

- изготовление деталей дизеля из материалов, стойких к воздействию сернистой коррозии;
- изменения в конструкции дизелей, предназначенных для работы на сернистых топливах;
- применение нейтрализующих антисернистых присадок к топливу;
- исключение режимов работы дизеля, вызывающих наиболее интенсивную электрохимическую коррозию и повышенный износ (т.е. режимов с низкой температурой воды, охлаждающей стенки цилиндра и цилиндровую крышку);
- создание систем топливоподготовки, снижающих количество сернистых соединений, которые поступают в цилиндр дизеля;



- выбор режима работы системы топливоподготовки, обеспечивающего наиболее качественную обработку топлива.

Износостойкость цилиндрических втулок, поршневых колец, цилиндрических крышек и других деталей, подверженных коррозии, повышают путем изготовления их из легированных чугунов. Значительное снижение износа достигается путем хромирования цилиндрических втулок (рис. 3.5). Однако, данный вариант рентабелен лишь для малоразмерных промышленных ДВС и не получил широкого распространения для судовых двигателей в следствие высокой технологической стоимости [103].

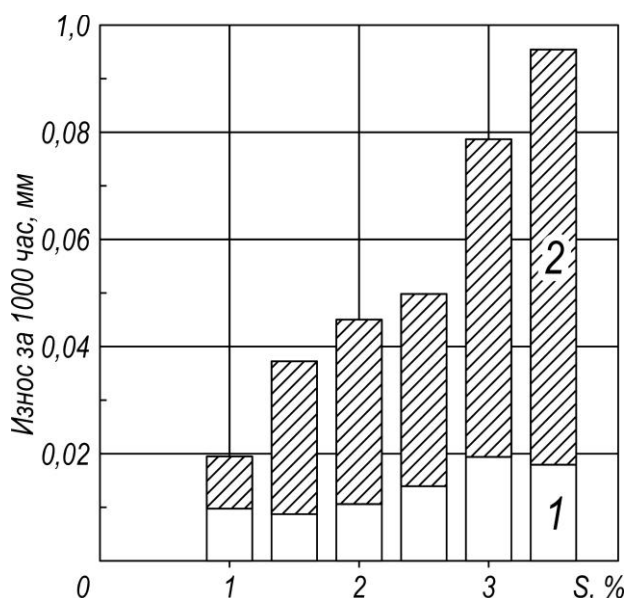


Рис. 3.5. Сравнение износа цилиндрических втулок:

1 – хромированные; 2 – нехромированные

Для увеличения сроков службы деталей ЦПГ в МОД, работающих на высоковязком сернистом топливе, ряд дизелестроительных фирм цилиндрическую втулку выполняют из двух частей: верхнюю – стальную, а нижнюю (с выпускными и продувочными окнами) – чугунную. Чугунная часть втулки, дополнительно обогащенная фосфором, характеризуется повышенной способностью сопротивляться коррозии и износу.

Для уменьшения сернистой коррозии охлаждение цилиндрических втулок длинноходовых МОД выполняется с помощью двухконтурной системы охлаждения. Данный метод широко внедряется в производство МОД, однако неэффективен для СОД, конструктивно имеющих меньшие отношения длины цилиндрической втулки к диаметру поршня, а также меньшие толщины цилиндрических втулок, что уравнивает градиенты температур в их разных сечениях.

Для уменьшения износа канавок верхних поршневых колец их хромируют или используют противоизносные кольца, располагаемые под уплотнительными кольцами. Применяется также пористое хромирование верхнего поршневого кольца [104].

Для предотвращения закоксовывания и поломки поршневых колец в дизелях с высокой степенью наддува и большим диаметром цилиндра увеличивают зазоры в замках до 6,8...7,0 мм и торцевые зазоры между кольцом и канавкой до 0,35...0,40 мм. Для этой же цели применяют скорректированные поршневые кольца с плавно уменьшающейся в сторону замка на длине 160...200 мм от замка радиальной толщиной.

Для борьбы с износом и нагарообразованием в деталях ЦПГ дизелей, работающих на сернистых топливах, были разработаны специальные присадки, предотвращающие коррозионное воздействие агрессивных сернистых соединений, а также интенсифицирующие процесс сгорания топлива и частично нейтрализующие окислы серы [105]. В качестве присадок к сернистым соединениям применялись соли щелочных металлов, нафтенит цинка, коллоидная медь и другие различные металлоорганические соединения. Несмотря на антиизносные и противонагарные свойства, присадки к топливам не получили широкого распространения на практике. Причиной этого является их плохая стабильность. При длительном хранении топлива присадки выпадают из него, а ввод их в расходную цистерну

непосредственно на судне усложняет систему топливоподготовки и затрудняет обслуживание дизеля.

Значительное снижение износа и нагарообразования в дизелях, работающих на сернистых топливах, было получено введением в цилиндры газообразного аммиака. Однако, в судовых условиях этот способ нейтрализации кислотной среды, образующейся в цилиндре дизеля, оказался неприемлемым вследствие его токсичности.

В условиях эксплуатации дизеля необходимо поддерживать температуру охлаждающей воды и масла на верхних пределах, рекомендованных инструкциями (во избежание конденсации продуктов сгорания серы и образования крепких минеральных серосодержащих кислот: сернистой  $\text{H}_2\text{SO}_3$ , серной  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , пероксомоносерной  $\text{H}_2\text{SO}_5$ , пероксодисерной  $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$  и ряда других). На режиме частичных нагрузок рекомендуется повышать температуру воздуха на входе в цилиндр путем отключения охладителя наддувочного воздуха.

При сгорании топлива в цилиндре дизеля все содержащиеся в нем сернистые соединения образуют двуокись  $\text{SO}_2$  и трехокись  $\text{SO}_3$  серы. Окисление серы в  $\text{SO}_3$  связано с характерным для этого процесса у дизелей избытком кислорода и каталитическим влиянием преимущественно различных окислов железа  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и окиси ванадия  $\text{V}_2\text{O}_5$ . Одновременно в цилиндре образуется большое количество водяных паров и, таким образом, в продуктах сгорания появляется система из двух конденсирующихся компонентов  $\text{H}_2\text{O}$  –  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , обуславливающая возможность интенсивной электрохимической коррозии.

Условием выпадения конденсата на стенках цилиндра является превышение точки росы указанной двухфазной смеси над температурой стенок. Необходимо отметить, что точка росы смеси даже при очень малом содержании  $\text{H}_2\text{SO}_4$  значительно превышает точку росы водяного пара. По мере снижения температуры поверхностей деталей до точки росы водяных

паров из продуктов сгорания начинает выпадать раствор серной кислоты и вода, тем самым значительно снижается концентрация конденсата на стенках. Последнее обстоятельство приводит к резкому возрастанию агрессивности конденсата, поскольку известно, что серная кислота наиболее сильно реагирует с металлами при концентрации 3...20 % [106].

Таким образом, при температурах стенок цилиндра, превышающих точку росы продуктов сгорания, электрохимическая коррозия протекает слабо. В случае же, когда температура стенок оказывается ниже точки росы водяного пара, интенсивность коррозии резко возрастает.

Температуры точки росы водяных паров  $t_s$  может быть подсчитана по формуле, предложенной Б.Б. Генбомом [107]

$$t_s = 100 \left\{ \left[ 0,0016d\alpha L_o + \frac{H}{2} \left( \frac{\gamma_r}{\mu_o} + \chi_i \right) \right] \frac{P_\varphi}{\mu_\varphi (1 + \gamma_r) M_L} \right\}^{0,25}; \quad (3.2)$$

где  $d$  – массовое влагосодержание воздуха, г/кг;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;

$L_o$  – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кмоль/кг;

$H$  – содержание водорода в топливе;

$\gamma_r$  – коэффициент остаточных газов;

$\mu_o$  – коэффициент молекулярного изменения;

$\chi_i$  – доля теплоты, выделяющейся в процессе сгорания;

$P_\varphi$  – текущее значение давления в цилиндре, кгс/см<sup>2</sup>;

$\mu_\varphi$  – коэффициент молекулярного изменения, соответствующий углу поворота коленчатого вала;

$M_L$  – количество молей свежего заряда, кмоль.

Для определения влияния содержания серы в топливе на точку росы целесообразно использовать эмпирическую зависимость, полученную В.С. Семеновым [108]

$$t_p = t_s + 170 \left( \frac{\chi_i S_T}{\alpha} \right)^{1,29};$$

где  $t_s$  – мгновенное значение точки росы водяных паров, определяемое по выражению (3.2);

$S_T$  – содержание серы в топливе, %.

Точка росы паров серной кислоты возрастает с увеличением ее концентрации и давления газов в цилиндре. В дизелях точка росы при положении поршня в верхней мертвой точке (ВМТ) достигает величин 150...180 °С и снижается примерно до 60 °С к концу хода расширения [109]. На рис. 3.6 показано влияние температуры стенок цилиндра на величину относительного износа деталей ЦПГ [110].

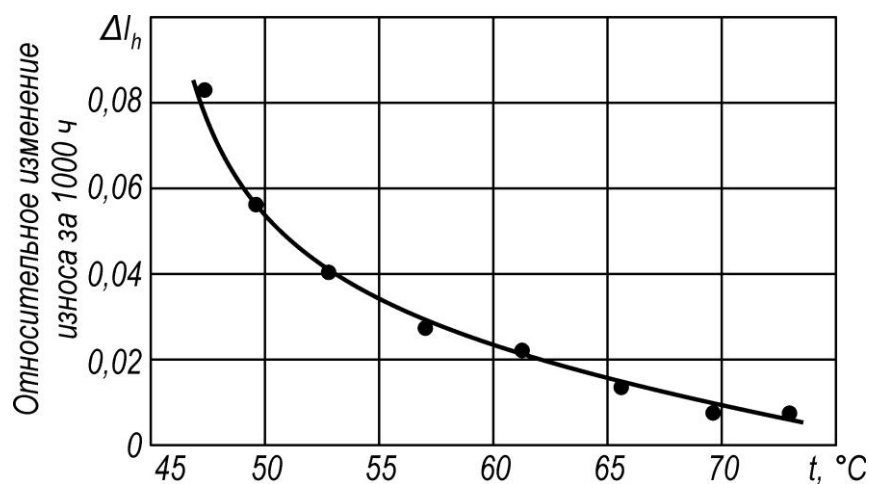


Рис. 3.6. Влияние температуры стенок цилиндра на величину относительного износа деталей ЦПГ

Очевидно, что наряду с электрохимической коррозией нельзя отрицать наличия абразивного изнашивания деталей при работе на сернистом топливе. Однако, поддержание температуры охлаждающей воды и масла в рекомендуемых пределах позволяет уменьшить вредное слияние сернистых примесей на детали ДВС.

### 3.5. Методы десульфуризации топлива в судовых условиях

Исходя из анализа состава тяжелых топлив для судовых СОД и способов их очистки в процессе топливоподготовки, можно сделать заключение, что основными побочными продуктами, оказывающими существенное влияние на долговечность и экономичность работы судового дизеля, являются находящиеся в топливе: механические примеси, смолисто-асфальтеновые вещества, сера и сернистые соединения, вода.

Как отмечалось ранее, повышенное содержание сернистых составляющих в топливе существенно сказывается на надежности и экономичности дизеля, а их удаление позволяет значительно повысить эффективность использования тяжелых сортов топлива в СОД.

Решение задач по десульфуризации топлива, как правило, относится к стационарной энергетике и выполняется на береговых нефтеперерабатывающих комбинатах [110]. Это только подчеркивает актуальность поиска оптимальных вариантов удаления серы из топлива в условиях эксплуатации морского судна.

В качестве способов десульфуризации топлива в судовых условиях могут быть использованы:

- тонкая фильтрация;
- гидроочистка;

- смешивание топлива со связующими реагентами с последующей отстаиванием, фильтрацией или сепарацией осадка;
- окислительное восстановление;
- ультразвуковая кавитационная обработка.

Трудности тонкой фильтрации, как способа прямого удаления серы из топлива, связаны с малыми размерами серосодержащих компонентов по сравнению с другими примесями (в частности со всеми металлическими составляющими и органическими соединениями). Использование тонкой фильтрации в данном случае способствует увеличению гидравлического сопротивления в топливной системе и, как следствие, повышению энергетических потерь на процесс топливоподготовки. Одним из решений задачи в таком варианте является дополнительное повышение температуры топлива. Однако, данный вариант может быть рекомендован лишь для дистиллятных сортов топлива. Дополнительный нагрев тяжелых сортов топлива способствует «парафинизации» углеводородов, а кроме того, повышает энергоемкость процесса.

Процесс гидроочистки требует предварительного добавления в топливо специально подготовленной воды, после чего полученная водотопливная смесь пропускается через гидродинамический аппарат с мягким режимом обработки. Полученная смесь либо отстаивается, либо направляется в центрифугу, где часть серы, связанной с водой осаждается и сливается. Центрифуги, как любые роторные аппараты отличаются высокой степенью обработки топлива, но из-за высокой и энергоемкости и повышенного износа движущихся частей приводов и электромоторов, могут быть рекомендованы в качестве дополнительного способа подготовки на судах с большой мощностью вспомогательной энергетической установки, характеризующимися частыми заходами в морские порты (например, грузопассажирские). Кроме того, получение требуемого содержания серы в

высоковязких топливах этим методом зачастую экономически не выгодно. Это связано с высокой стоимостью активных и селективных катализаторов, водородсодержащего газа, оборудования. Причем стоимость технологии возрастает с увеличением степени сероочистки.

Более простым методом в аппаратном исполнении является адсорбционное удаление сераорганических соединений. В транспортных энергетических установках десульфуризация, как правило, проводится адсорбционным или каталитическо-адсорбционным методами. В последнем, соединения серы преобразовываются в  $H_2S$  каталитическим восстановлением водорода или же в элементарную серу и/или  $SO_x$  селективным (избирательным) каталитическим окислением, с последующей их адсорбцией [111].

Десульфуризация топлива также возможна с помощью водорода, однако необходимость хранения сжатого водорода и затраты энергии на его сжатие ограничивают применение данного способа и возможна лишь для судов, использующих водородное топливо (например, для некоторых типов газозавозов).

Окислительное обессеривание позволяет снизить содержание серы в дизельном топливе с 3...3,5 % до 0,1...0,5%, однако для судовых условий также имеет свои ограничительные особенности.

Значительное распространение для удаления сернистых соединений из моторных топлив получили гетерогенные системы, состоящие из разнообразных твердых носителей (соли, оксиды, активированный уголь, цеолиты) и пероксидных окислителей (пероксид водорода или алкилгидропероксиды) [112, 113].

Эффективность окислительного обессеривания углеводородного топлива существенно повышается, когда за процессом окисления следует адсорбция продуктов окисления на твердом адсорбенте, например молибденсодержащих компонентах, активированном угле, алюмосиликатах



[114]. Однако, использование подобных способов может быть рекомендовано лишь для топливных систем небольшого объема.

В последние годы для обессеривания различных видов моторных топлив был предложен метод экстракции сернистых соединений ионными жидкостями [115]. Особенно эффективны ионные жидкости, которые содержат ионы  $\text{Cu(I)}$  и  $\text{Ag(I)}$ , а также безводные порошкообразные  $\text{CuCl}$ , содержащие в качестве анионов частицы  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{Cl}_3$  и  $\text{Cu}_3\text{Cl}_4$ . Однако, эти системы обеспечивают высокую обессеривающую способность лишь для маловязких топлив.

Среди других методов окислительного обессеривания топлива следует отметить его озонирование [116]. Этот метод позволяет не только разрушить конденсированные сернистые соединения, но и получать на их основе высокоэффективные эмульгаторы. Предварительное озонирование может интенсифицировать процесс гидроочистки топлива. При этом применение данного способа требует дополнительного генератора озона, который используются только на нефтеналивных судах.

Методом десульфуризации топлива, применимым на всех типах морских судов и СЕУ является ультразвуковая кавитационная обработка топлива, особенности которой рассмотрены ниже.

### 3.6. Особенности кавитационной обработки судового топлива

Судовое моторное топливо – высокомолекулярная, гетерогенная жидкость, молекулы которой при атмосферном давлении и нормальной температуре сложно ориентированы. При приложении к нефти внешнего давления в несколько сот атмосфер молекулы поляризуются,

противодействуя внешним силам и сохраняя равновесие системы. Если внешнее давление резко снять, то внутренние силы начнут разрывать макромолекулы на более мелкие составляющие, причем, плотность продукта уменьшается. Этот принцип положен в основу обработки нефти и ее производных с целью изменения ее структуры [117].

Идея дробить длинные органические цепочки топлива на более короткие для получения свободных радикалов, образующих новые соединения, не нова. При этом, исследования в этом направлении выполнялись, в основном, для стационарной энергетики и нефтеперерабатывающих комплексов, а их задачей являлся разрыв С–С связей в молекулах парафина, в следствии чего происходило изменение физико-химического состава топлива (уменьшение молекулярного веса, температуры кристаллизации и др.). Одним из вариантов осуществления задачи разрыва межмолекулярных связей в топливе является использование кавитации – образования разрывов сплошности топлива в результате местного спада давления. Если снижение давления происходит вследствие больших локальных скоростей в потоке движущегося топлива, то кавитация считается гидродинамической, а если вследствие прохождения в топливе акустических волн, – акустической или ультразвуковой [118, 119].

Эффект кавитации сопровождается микровзрывами, ультразвуком, а также механическими срезами и соударениями при воздействии сотен режущих пар,двигающихся навстречу друг другу с высокой линейной скоростью. Величина этой скорости составляет несколько десятков метров в секунду, что дает возможность разрезать диспергируемые вещества на мельчайшие микрочастицы [120].

При распространении ультразвуковой волны даже сравнительно небольшой интенсивности (всего несколько ватт на квадратный сантиметр) в топливе, как и в любой жидкости, возникает переменное звуковое давление, амплитуда которого не превышает 1 МПа. Под действием этого давления

топливо попеременно испытывает сжатие и растяжение. Топливо, являясь несжимаемой жидкостью, практически не изменяет своих свойств при увеличении давления. Однако, в случае создания разрежения внутри топлива или даже на его поверхности, его агрегатное состояние изменяется, в частности возможно появление газообразования в его объеме. При распространении ультразвуковой волны в топливе растягивающие усилия в области разрежения волны приводят к образованию в нем разрывов, т.е. мельчайших кавитационных пузырьков, заполненных газом и паром. Данное явление способствует возникновению ультразвуковой кавитации топлива [121].

Кавитационные пузырьки в некоторой области топлива возникают в тот момент, когда до этой области доходит фаза разрежения ультразвуковой волны. Как правило, кавитационные пузырьки не стойки во времени: уже следующая за разрежением фаза сжатия приводит к захлопыванию большей их части. Поэтому кавитационные пузырьки исчезают практически сразу вслед за прекращением облучения жидкости ультразвуком.

Рядом исследований установлено, что ультразвуковые колебания способны изменять агрегатное состояние топлива, диспергировать, эмульгировать его, изменять скорость диффузии, кристаллизации и растворение веществ, активизировать реакции, интенсифицировать технологические процессы [122].

Распространение волн большой интенсивности (ультразвука) сопровождается нелинейными эффектами. Волны большой амплитуды, проходя через топливо, создают области существенного сжатия и разрежения. При существенном разрежении возникают «отрицательные давления», приводящие к разрыву топлива. Пустоты при этом, как правило, заполняются газами, которые проникают в них в следствии диффузии из окружающего топлива, а также с парами топлива. Поскольку в волне за разрежением наступает сжатие, давление на пузырек со стороны топлива

резко возрастает, что приводит к «схлопыванию» пузырьков. При этом возникают волны большой интенсивности [123].

Ультразвуковая кавитация является эффективным способом концентрации энергии звуковых волн низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями кавитационных пузырьков и уменьшением их радиуса  $R$  до минимально возможного  $R_{\min}$  (схлопывания). Образование кавитационных зон (кавитационных пузырьков) в топливной среде происходит в следующей последовательности. В фазе разрежения акустической волны в топливе образуются разрывы в виде полостей, которые заполняются насыщенными парами топлива. В фазе сжатия под действием повышенного давления и сил поверхностного натяжения полость захлопывается, а пары топлива конденсируются на границе раздела фаз. Через стенки полости в нее диффундирует растворенный в топливе газ, который затем подвергается сильному адиабатическому сжатию. В момент схлопывания, давление и температура газа достигают значительных величин (по некоторым данным до 100 МПа и 10000 °С). После схлопывания полости в окружающем ее объеме топлива распространяется сферическая ударная звуковая волна, быстро затухающая в пространстве [124].

### 3.7. Математическое описание процессов, происходящих при кавитационной обработке топлива

Для образования в топливе акустической полости, необходимо раздвинуть его соседние молекулы на расстояние не менее удвоенной длины промежутка между ними. Топливо может выдерживать максимальное растягивающее напряжение, рассчитываемое по формуле [120]

$$P \approx \frac{2\sigma}{R},$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;

$R$  – радиус пузырька кавитации, м.

В топливе, вследствие броуновского движения, имеют место флуктуации внутренней структуры – области пространства с молекулами низкой энергии и молекулами высокой энергии. В областях с молекулами высокой энергии, которые называют областями повышенной микро-температуры, звуковые волны могут обеспечить значения напряжений, достаточных для разрыва сплошности жидкости [125]. Стабильное существование парогазовых пузырьков объясняется тем, что на поверхности пузырька имеются равномерно распределенные одноименные заряды, обусловленные находящимися в жидкости ионами. Отталкивание этих зарядов предотвращает смыкание пузырька [126, 127].

Условие равновесия парогазового пузырька в жидкости записывается в виде

$$P_r = P_\infty + P_\pi + \frac{2\sigma}{R},$$

где  $P_r$ ,  $P_\infty$ ,  $P_\pi$  – давление в парогазовом пузырьке, статическое давление в жидкости, давление насыщенных паров топлива, соответственно, Па.

При нанесении на топливо ультразвуковых гармонических колебаний уравнение равновесия записывается как [128]

$$P_0 - P_a = \left( P_\infty - P_\pi + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2\sigma}{R_0} + P_\pi,$$

где  $P_0$  – начальное давление в пузырьке при наложении ультразвуковой кавитационной волны, Па;

$P_a$  – акустическое давление, создаваемое при ультразвуковой кавитации, Па;

$R_0$  – начальный радиус пузырька кавитации, м;

Пузырек устойчив, пока  $P_a$  не достигает критического значения  $P_{кр}$ . При  $P_a > P_{кр}$  пузырек начинает быстро расти, что приводит к разрыву сплошности топлива.

Значение критического радиуса определяется по формуле

$$R_{кр} = \sqrt{3}R_0 \sqrt{\frac{R_0}{2\sigma} \left( P_{\infty} - P_{п} + \frac{2\sigma}{R} \right)}.$$

С учетом того, что давление насыщенных паров значительно меньше гидростатического давления, уравнение для кавитационной прочности жидкости в зависимости от начального радиуса пузырька записывается в виде

$$R_0^3 + R_0^2 \frac{2\sigma}{P_{\infty}} - \frac{32\sigma^3}{27P(P_{\infty} - P_{кр})^2} \cong 0.$$

Нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее простую модель сферически-симметричной пульсации газовой полости радиусом  $r=R(t)$  в поле плоской звуковой волны, имеет вид:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} (P_{\infty} - P(R)) = 0, \quad (3.3)$$

где  $\rho$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup> [129].

Аналитическое решение этого уравнения, получено Рэлеем при простейших условиях:  $P_{\infty} = P_a$ ;  $P(R) = 0$ . В этом случае уравнение (3.3) переходит в уравнение схлопывания пустой полости под действием гидростатического давления:

$$\left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{2}{3} \frac{P_{\infty}}{\rho} \left( \frac{R_{\max}^3}{R^3} - 1 \right). \quad (3.4)$$

где  $R_{\max}$  – максимальный радиус парогазового пузырька, м.

Время захлопывания пустой полости определяется из формулы Рэлея (3.4) [128]:

$$t_c = 0,915 R_{\max} \sqrt{\frac{\rho}{P_{\infty}}}.$$

Уравнение, описывающее изменения радиуса кавитационной полости в поле ультразвуковой волны известно как уравнение Нолтинга- Неппайреса:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[ P_{\infty} - P_{\text{н}} - P_a \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} - \left( P_{\infty} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0. \quad (3.5)$$

Уравнение (3.5) достаточно хорошо описывает поведение кавитационного пузырька в поле ультразвуковой волны, но допущения о несжимаемости жидкости не позволяют правильно оценить конечную стадию захлопывания кавитационного пузырька.

Динамику кавитационного пузырька с учетом сжимаемости описывает уравнение Херринга-Флинна

$$\begin{aligned} & R \left( 1 - \frac{2}{c_0} \cdot \frac{dR}{dt} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{c_0} \cdot \frac{dR}{dt} \right) \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \\ & + \frac{1}{\rho} \left[ P_{\infty} - P_{\text{н}} - P_a \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \cdot \frac{dR}{dt} - \left( P_{\infty} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] + \\ & + \frac{R}{\rho} \cdot \frac{1}{c_0} \cdot \frac{dR}{dt} \left( 1 - \frac{1}{c_0} \cdot \frac{dR}{dt} \right) \frac{dP(R)}{dR} = 0. \end{aligned} \quad (3.6)$$

где  $c_0$  – скорость распространения ультразвуковой волны в топливе, м/с;

$\mu$  – динамическая вязкость топлива, Па·с;

$\gamma = c_p/c_v$  – соотношение удельных теплоемкостей для газа.

Уравнения (3.5) и (3.6) не решаются в общем виде. Их численные решения получают для конкретных частных случаев с определенными значениями частоты и амплитуды звукового поля и величиной начального размера пузырька. Исследование этих уравнений сделано подробно в [126, 130] и показывает, что при амплитудах звукового давления  $P_a < P_{кр}$  газовые пузырьки не захлопываются и пульсируют линейно. Пузырьки с  $R < R_{кр}$  пульсируют с частотой акустической волны, а при размере пузырька  $R > R_{кр}$  период пульсации близок к периоду собственных колебаний. При  $P_a > P_{кр}$  движение полости становится неустойчивым и она захлопывается в первом положительном полупериоде. При дальнейшем увеличении  $P_a$  инерционные силы препятствуют захлопыванию пузырька, и он совершает одно или несколько колебаний, а затем схлопывается.

Таким образом, одной из задач ультразвуковой кавитационной обработки топлива является нахождение и поддержание оптимальной частоты акустического сигнала, способствующей образованию и увеличению количества кавитационных пузырьков.

В большинстве исследований кавитации, особенно теоретических, рассматривают поведение единичного пузырька. В реальных условиях необходим целый комплекс мер, чтобы добиться существования одиночного пузырька. Даже при давлении, не намного превышающем порог кавитации, сразу появляется множество кавитационных пузырьков, занимающих определенную часть пространства, которую называют кавитационной областью [131]. При импульсных растягивающих напряжениях в жидкости зародыши кавитации начинают расти, образуя кавитационный кластер, форма и длина которого определяются начальным спектром размеров кавитационных зародышей, характером прикладываемого напряжения и граничными условиями. Все зародыши достигают максимального размера одновременно, и среда может считаться практически монодисперсной, содержащей пузырьки только одного размера [132].



При малых расстояниях между пузырьками в плотном кавитационном кластере кавитационные пузырьки взаимодействуют друг с другом в процессе пульсаций. В этом случае в уравнение (3.5) необходимо ввести слагаемое, выражающее давление, генерируемое соседними пузырьками. Запишем уравнение (3.5), учитывая давление, генерируемое всеми кавитационными пузырьками  $P_{\text{кав}}$ :

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[ P_{\infty} - P_{\text{п}} - P_{\text{а}} + P_{\text{кав}} + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \cdot \frac{dR}{dt} - \left( P_{\infty} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0.$$

Процесс развития кавитационной области представляется следующим образом. При захлопывании кавитационный пузырек может терять устойчивость и распадаться на части, а так как давление и температура в этот момент в пузырьке максимальны, то давление и температура парогазовой смеси в образовавшихся «осколках» тоже повышены. В фазе растяжения они легко расширяются и становятся новыми зародышами кавитации, менее прочными, чем постоянно имеющиеся в жидкости. Кавитационные полости, возникшие на этих зародышах, порождают новые. Внутри кавитационной области идет непрерывный процесс размножения и коагуляции кавитационных пузырьков, причем кавитационный порог несколько уменьшается, так как в установившемся режиме роль кавитационных зародышей начинают выполнять равновесные пузырьки, объем и газосодержание у которых больше, чем у зародышей [129, 131].

В качестве величины, характеризующей степень развитости кавитации, Л. Д. Розенберг предложил использовать индекс кавитации

$$K = \Delta v / v,$$

где  $v$  – выделенный объем,  $\text{м}^3$ ;

$\Delta v$  – объем всех кавитационных пузырьков,  $\text{м}^3$ .

Выделенный объем  $v$  должен удовлетворять следующим двум требованиям:

1) линейные размеры этого объема должны быть малы по сравнению с длиной волны, чтобы первичное возбуждающее кавитацию звуковое давление можно было считать внутри этого объема постоянным по величине и синфазным;

2) линейные размеры этого объема должны быть намного больше размеров кавитационного пузырька [131].

Индекс кавитации есть мера пространственной плотности энергии, а величина  $\Delta v$  пропорциональна потенциальной энергии, запасенной всеми содержащимися в объеме  $v$  пузырьками. Работа, совершаемая  $n$  пузырьками с одинаковыми максимальными размерами, записывается в виде

$$A_k \approx \frac{4}{3} \pi R_{\max}^3 P_{\infty} n = P_{\infty} \Delta v.$$

В установившемся режиме, при неизменных внешних условиях (статическое давление, температура, газосодержание и т.п.) индекс кавитации есть функция координат поля. Величина  $K$  лежит в пределах  $0 < K < 1$ . Нижний предел соответствует отсутствию кавитации, верхний предел достижим только в локальном объеме. Усреднять индекс кавитации можно не только по области, но и по какому-либо сечению.

В настоящее время разработано большое количество математических моделей, описывающих процесс ультразвуковой кавитационной обработки топлива. Однако, среди них нет удовлетворительной модели кавитационной области, адекватно описывающей ее поведение и поведение принадлежащего к ней отдельного кавитационного пузырька. Поведение кавитационной

области зависит от многих явлений и факторов: размножение и коагуляция (коалесценция) пузырьков, их взаимодействие, изменение характера пульсаций пузырька за счет ударных волн и звукового излучения соседних пузырьков, изменение средних акустических свойств среды, микропотоки внутри кавитационной области и на границе пузырька, распределение зародышей кавитации, газосодержание и т.д.

Для создания кавитационной области используется определенная часть энергии первичного звукового поля. Отношение затраченной энергии к полной энергии первичного поля характеризуется коэффициентом кавитационного использования акустической энергии:

$$\eta_{\text{аэ}} = \frac{E_{\text{к}}}{E}.$$

Энергия звукового поля, идущая на образование кавитационной области, затрачивается в течение всей фазы расширения кавитационного пузырька. Это время несколько меньше периода первичного звука  $T_0$ . Приняв это время равным  $T_0$ , средняя за период, мощность, которая затрачивается на образование всей кавитационной области, равна:

$$N_{\text{к}} = \frac{E_{\text{к}}}{T_0} = \eta_{\text{аэ}} \frac{E}{T_0} = N \eta_{\text{аэ}},$$

где  $N$  – мощность первичного звука, Вт.

Таким образом, кавитационная область представляет собой своеобразный трансформатор мощности, в котором сравнительно медленно накапливаемая энергия освобождается в течение очень короткого времени, в результате чего мгновенная мощность во много раз превосходит среднюю, вводимую ультразвуковым излучателем в кавитационную область [131].

На развитие и интенсивность кавитации большое влияние оказывают внешние условия и свойства топлива. При кавитации в дегазированном

топливе в кавитационные пузырьки поступает меньшее количества воздуха, чем в отстоявшейся, что приводит к уменьшению демпфирующего эффекта парогазовой смеси в пузырьке при его смыкании и возрастании давления в ударной волне. Дегазация жидкости приводит к уменьшению области кавитации с одновременным увеличением интенсивности ударной волны, создаваемой кавитационными пузырьками [127]. При повышении температуры давление внутри пузырька, определенное давлением пара и газа, увеличивается, и ударная волна ослабляется, но это также приводит к росту кавитационной области [133]. Таким образом, в связи с тем, что любое перемещение топлива вызывает его дегазацию, ультразвуковую обработку топлива, способствующую его десульфуризации, наиболее целесообразно проводить в малоподвижном объеме топлива, что характерно для расходной цистерны.

### 3.8. Экспериментальное определение оптимальной частоты ультразвуковой кавитационной обработки судового моторного топлива

Методы исследования кавитации можно разделить на прямые и косвенные. К прямым методам относятся:

- 1) визуальные – фото-, кино- и видеосъемка кавитационных образований;
- 2) акустические – измерение давления в ударной волне, излучаемой одним или совокупностью кавитационных пузырьков при пульсациях и схлопывании.

Косвенные методы включают в себя такие методы как:

- 1) фотоэлектрический – регистрация сонолюминесценции при кавитации;

2) химические – исследование изменения массы, концентрации или объема химических реагентов за счет звукохимических реакций в кавитационном поле;

3) гидродинамические – изменение гидродинамических параметров потока жидкости, связанных с интенсивностью кавитации;

4) механические – измерение величины кавитационной эрозии, которую обычно выражают через убыль веса образцов в виде алюминиевых цилиндров или через площадь вырывов в алюминиевой фольге;

5) технологические – изменения качественных показателей обрабатываемой среды, связанных с интенсивностью кавитации (в качестве обрабатываемой среды используют эмульсии, суспензии и т.п., в которых протекают гидромеханические и тепломассообменные процессы).

Рассматривая более детально влияние ультразвука на жидкие среды, можно выделить четыре главных направления применения ультразвуковой кавитационной обработки, направленные на повышение эффективности использования топлива:

1) интенсификация процесса сгорания тяжелого топлива;

2) снижение потерь горючей массы топлива при его подготовке;

3) приготовление высокостабильных топливных смесей;

4) удаление из топлива серы с применением продувки воздуха в зоне кавитации.

Первое направление достаточно широко освещено в литературе [50, 81, 121] и свидетельствует о значительной интенсификации процесса сгорания путем кавитационной обработки топлива непосредственно перед впрыском в цилиндры.

По второму направлению основной эффект достигается за счет исключения из процесса топливоподготовки сепарации, путем ее замены ультразвуковой кавитационной гомогенизацией. Для гомогенизации тяжелых топлив и мазутов как правило используются роторные и плунжерные

гомогенизаторы, а также гомогенизаторы, работающие на принципе сопла Лавала. Последний вид ультразвукового гомогенизатора прост по конструкции, дешевле в производстве и в эксплуатации. Кроме того, ультразвуковая кавитация, возникающая при выходе топлива из сопла, диспергирует смолисто-асфальтеновые вещества и практически не влияет на дисперсный состав механических примесей, удаляемых фильтрами [15, 121].

Главным требованием третьего направления ультразвуковой обработки высоковязких топлив является создание устойчивой эмульсии типа «вода в топливе» с размерами глобул воды меньшими, чем зазоры в плунжерных парах топливной аппаратуры дизеля. При этом эмульсия должна быть не только стойкой в течении нескольких суток, но и однородной. Л. Бергман, рассматривая диспергирующее действие ультразвука [124], указывает, что эмульгирование наиболее эффективно протекает на границе раздела между жидкостью и источником колебаний, а также между жидкостью и твердыми стенками. Помимо этого большое влияние на эмульгирование ультразвуковыми волнами оказывают растворенные в жидкости газы и газовые пузырьки. Выполненные в диссертационной работе исследования [134, 135] хорошо согласуются с концепцией Л. Бергмана [128] и результатами подобных работ [127, 133] об усилении эмульгирования при подаче в зону кавитации небольшого количества воздуха.

Четвертое направление представляет собой совокупность двух технологических процессов, главным из которых является использование ультразвуковой обработки топлива с одновременной продувкой воздухом для удаления из него серы. В качестве сопутствующего технологического процесса в данном случае выступает операция по подготовки высокостабильных и высококачественных топливных смесей (особенно при большом содержании в топливе воды).

Таким образом, все четыре рассмотренные метода наряду с удалением серы из топлива обеспечивают подготовку топлива для впрыска в цилиндр дизеля.

Для удаления серы из топлива наиболее оптимальным является физико-химический метод, который представляет собой ультразвуковую обработку топлива с целью разрыва связи C–S в гетероциклических соединениях с последующим проведением химической реакции для выведения серы из топлива в составе газовой фазы [112, 122].

Возникновение химических реакций в поле ультразвуковых волн тесно связано с явлением кавитации. Образование кавитации зависит от вязкости, т.к. при ее увеличении возрастает прочность жидкости. Чем больше вязкость жидкости, тем больше интенсивность ультразвуковых волн, которая обуславливает появление кавитационных пузырьков. Величина переменного акустического давления, необходимого для возбуждения кавитаций на одной и той же частоте, будет зависеть от вязкости топлива [125]. Химические процессы в топливе возникают при такой интенсивности ультразвуковых волн, при которой неизбежным становится образование кавитационных полостей. Имеет определенный порог интенсивности ультразвуковых волн, ниже которого химические процессы не наступают. Химические процессы, протекающие в поле ультразвуковых волн, весьма разнообразны. В том числе к ним относится процесс распада органических веществ, которые необходимы для дальнейшего извлечения серы из топлива.

Для судового моторного топлива, характеризующегося повышенной вязкостью, подбор оптимальных условий ультразвуковой обработки имеет первостепенное значение. В качестве критерия выбора оптимальной частоты ультразвуковой кавитационной обработки топлива может быть принято условие снижения содержания серы в топливе, а также содержание серосодержащих компонентов в газах, выделяемых топливом после его обработки [136, 137].

При проведении исследований в качестве постулатов принимались следующие утверждения:

- 1) ультразвуковая кавитационная обработка топлива способствует снижению содержания сернистых примесей в топливе;
- 2) при ультразвуковой кавитационной обработке топлива в связи с термическим разложением серосодержащих соединений происходит выделение сульфида водорода  $H_2S$  с открытой поверхности топлива.

Подтверждение данных высказываний было выполнено экспериментально и заключалось в следующем. Исследуемая порция топлива помещалась в стеклянную емкость и подвергалась ультразвуковой обработке при разной частоте генерируемого звукового излучения. В емкости с топливом находился температурный датчик, позволявший контролировать уровень температуры, что, впоследствии, позволяло определять энергию, поглощенную топливом при ультразвуковой обработке, а также избегать перегрева топлива до температур, близких к температуре самовоспламенения его паров. Непосредственно над емкостью с топливом размещался портативный газоанализатор Dräger X-am 2000 (производства Германии), с помощью которого определялась концентрация сульфида водорода  $H_2S$  и оксидов серы  $SO_x$  в выделяющихся из топлива газах.

Экспериментальная установка (рис. 3.7) располагалась в автономном химическом шкафу, при этом на протяжении всего эксперимента циркуляция воздушных потоков в нем не производилась. В пробе топлива, подвергающегося ультразвуковой кавитационной обработке, производилось определение содержания сернистых примесей. С этой целью выполнялся анализ спектров горения топлива. С помощью плазменной спектрофотометрии определялись линейчатые спектры поглощения серы, как одной из составляющей топлива. Зная первоначальное содержание сернистых соединений в топливе, по интенсивности данных спектров возможно определить изменение количества сернистых примесей в топливе после его ультразвуковой обработки.



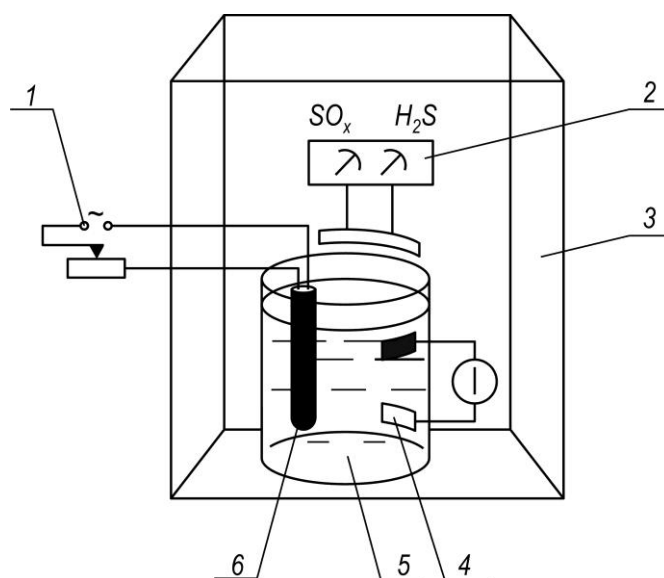


Рис. 3.7. Схема экспериментальной установки для определения структурного изменения топлива при ультразвуковой обработке

1 – ультразвуковой генератор; 2 – портативный газоанализатор Dräger X-am 2000 (Германия); 3 – автономный химический шкаф; 4 – температурный датчик; 5 – стеклянная емкость с исследуемым топливом;  
6 – магнитострикционный излучатель ультразвуковой установки

В качестве ультразвукового генератора использовался модульный генератор многофазного ультразвукового поля УЗГ-5-М с фазовой коррекцией и магнитострикционным излучателем. Генератор состоит из нескольких силовых ячеек УЗГ-5 и общей системы управления. Система позволяет регулировать разность фаз выходного напряжения ячеек, добиваясь требуемого распределения картины ультразвукового поля. При синфазной работе генератор позволяет набрать модульно любую мощность в диапазоне 20...5000 Вт, а также обеспечить выходную частоту ультразвукового сигнала в диапазоне 7...30 кГц с точность задания частоты до 1 Гц.

Мощность ультразвукового генератора  $N_{\text{уз}}$  позволяет оценить величину амплитуды ультразвуковой звуковой волны  $a$ . Согласно выражению для вектора Умова–Пойтинга [138]

$$N_{\text{уз}} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 v a^2, \quad (3.7)$$

где  $\rho$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega = 2\pi\nu_{\text{уз}}$  – частота ультразвукового сигнала;  $\nu$

$\nu$  – скорость распространения ультразвуковой волны, м/с (в случае распространения ультразвуковой волны в топливе  $\nu = 1000$  м/с);

$a$  – амплитуда ультразвуковой волны, м.

Из уравнения (3.7) амплитуда ультразвуковой волны определяется как

$$a = \frac{1}{2\pi\nu_{\text{уз}}} \sqrt{\frac{2N_{\text{уз}}}{\rho\nu}}.$$

Диапазон значений амплитуды ультразвуковой волны  $a$  в зависимости от мощности ультразвукового генератора  $N_{\text{уз}}$  и частоты ультразвукового сигнала  $\nu_{\text{уз}}$  для высоковязкого топлива НФО380 с плотностью  $\rho = 920$  кг/м<sup>3</sup> приведен в табл. 3.3.

Результаты, приведенные в табл. 3.3, подтверждают, что мощность ультразвукового генератора, а также ультразвуковые волны выбранной частоты воздействуют на частицы микронных размеров, к которым относится молекулярная структура топлива.

Таблица 3.3.

Диапазон значений амплитуды ультразвуковой волны  $a$ , мкм, в зависимости от мощности ультразвукового генератора  $N_{уз}$  и частоты ультразвукового сигнала  $\nu_{уз}$  для топлива НФО380

|                                                   |      | Частота ультразвукового сигнала, $\nu_{уз}$ , кГц |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                   |      | 20                                                | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    |
| Мощность генератора<br>ультразвука, $N_{уз}$ , Вт | 1000 | 0,393                                             | 0,357 | 0,328 | 0,302 | 0,281 | 0,262 |
|                                                   | 2000 | 0,556                                             | 0,506 | 0,463 | 0,428 | 0,397 | 0,371 |
|                                                   | 3000 | 0,681                                             | 0,619 | 0,568 | 0,524 | 0,486 | 0,454 |
|                                                   | 4000 | 0,786                                             | 0,715 | 0,655 | 0,605 | 0,562 | 0,524 |
|                                                   | 5000 | 0,879                                             | 0,799 | 0,733 | 0,676 | 0,628 | 0,586 |

По приведенной методике выполнялось определение содержания сернистых примесей в топливах, прошедшем ультразвуковую кавитационную обработку, различным первоначальным содержанием серы S: 2,7 %, 3,0 % и 3,2 %.

Изменение содержания сернистых примесей в различных топливах S в зависимости от частоты ультразвукового сигнала  $\nu_{уз}$  представлена массивом кривых на рис. 3.8, а. Зависимость содержания сульфида водорода  $H_2S$  в парах различных топлив над его поверхностью в функции от частоты генерируемого звука показано на рис. 3.8, б. Обе зависимости имеют ярко выраженный экстремум, соответствующий определенной частоте звукового сигнала  $\nu_{уз}^{опт}$ .

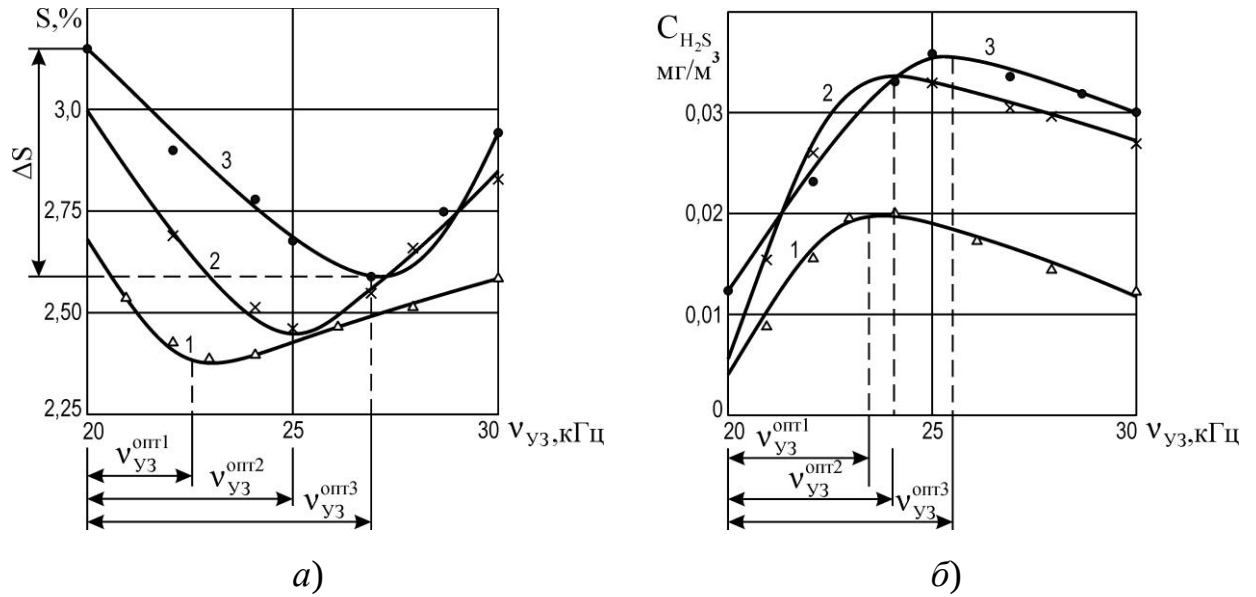


Рис. 3.8. Изменение содержания сернистых примесей в топливе  $S$  (а) и концентрации сульфида водорода  $C_{H_2S}$  в парах топлива (б) для топлив с различным содержанием серы (1 –  $S=2,7\%$ , 2 –  $S=3,0\%$ , 3 –  $S=3,2\%$ ) в зависимости от частоты ультразвукового сигнала  $\nu_{y3}$

Совмещение данных зависимостей на одной координатной сетке позволяет определить диапазон частот, обеспечивающих максимальное снижение сернистых примесей в топливе и максимальное количество сероводорода в парах топлива, рис. 3.9.

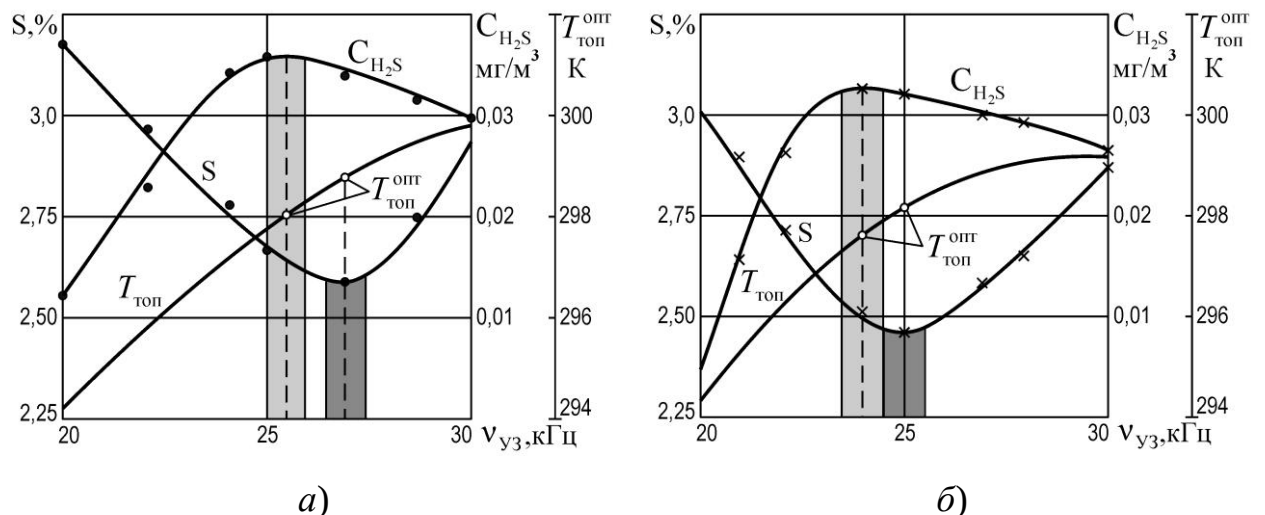


Рис. 3.9. Изменение содержания сернистых примесей в топливе  $S$ , концентрации сульфида водорода  $C_{H_2S}$  в парах топлива и температуры топлива  $T_{top}$  в зависимости от частоты ультразвукового сигнала  $\nu_{y3}$ : а) топливо HFO380 ( $S=3,2\%$ ); б) топливо HFO180 ( $S=3,0\%$ )

Еще одним критерием выбора оптимальной частоты ультразвукового сигнала является температура топлива, подвергающегося облучению. Зависимость  $T_{\text{топ}} = f(v_{\text{уз}})$  носит слабо выраженный экспоненциальный характер (рис. 3.9). Для минимизации энергетических затрат выбор частоты ультразвукового сигнала должен обеспечивать температуру топлива  $T_{\text{топ}}^{\text{опт}}$  максимально приближенному к ближайшему оптимум кривых  $S = f(v_{\text{уз}})$  и  $C_{\text{H}_2\text{S}} = f(v_{\text{уз}})$ .

На рис. 3.10 представлены зависимости  $S = f(v_{\text{уз}})$  и  $C_{\text{H}_2\text{S}} = f(v_{\text{уз}})$  для различного времени ультразвуковой обработки топлива. Обе зависимости имеют экспоненциальный вид и позволяют определить оптимальное время ультразвуковой обработки, которое, с одной стороны, обеспечивает максимальное удаление сернистых примесей из топлива, а с другой – способствует минимизации энергозатрат на проведение такой обработки.

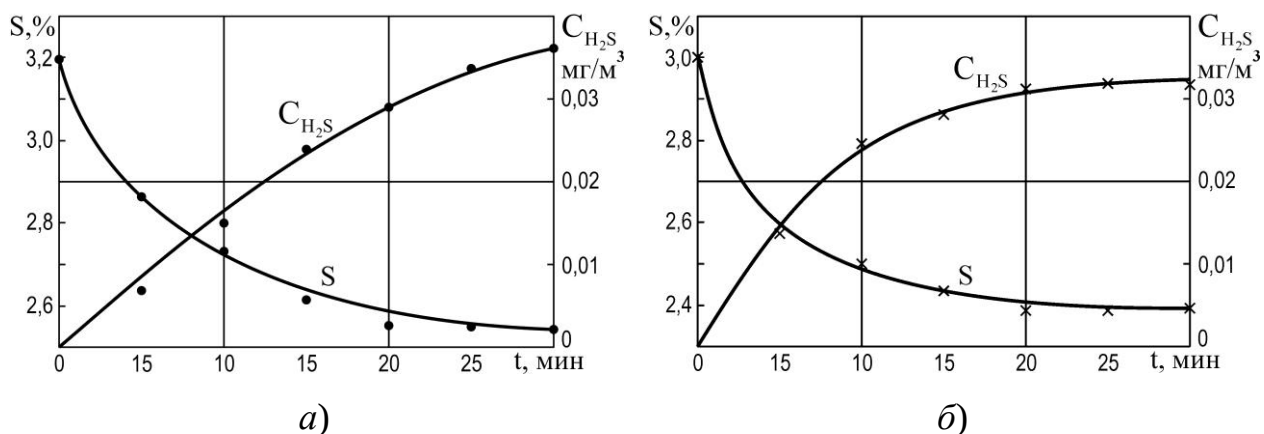


Рис. 3.10. Определение оптимального времени ультразвуковой обработки различных топлив:

а) топливо NFO380 ( $S=3.2\%$ ); б) топливо NFO180 ( $S=3.0\%$ )

Удаление сернистых примесей в составе газовой фазы приводит к изменению структурного состава топлива, влияющего на низшую теплотворную способность топлива –  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ . Для оценки этого изменения

калориметрическим методом производилось определение величины  $Q_H^p$  для топлива, прошедшего ультразвуковую кавитационную обработку. При этом, несмотря на удаление из топлива горючих составляющих (водорода H и серы S в составе сульфида водорода  $H_2S$ ) максимальное изменение  $Q_H^p$  не превышало 1,2 % (с учетом погрешности эксперимента). Это подтверждает высказывание о том, что при ультразвуковой обработке происходит диссоциация и разрыв не только C–S, но и C–H и C–C связей в топливе. В результате протекания этих процессов в топливе увеличивается количество активированных частиц: радикалов, ионов, ионно-радикальных образований, интенсифицирующих процесс сгорания топлива и способствующих повышению его теплотворной способности [139, 140].

### 3.9. Выводы по разделу 3

В качестве основных выводов по разделу отметим следующее.

1. Показателем, комплексно характеризующим эксплуатационные характеристики топлива и влияющим на энергетические параметры и технические характеристики судового СОД, является содержание сернистых примесей в топливе.

2. Оптимальным способом десульфуризации топлива в условиях морского судна является его ультразвуковая обработка, проведение которой необходимо выполнять в малоподвижном объеме топлива для чего наиболее подходит расходная топливная цистерна.

3. Процесс десульфуризации топлива с помощью ультразвуковой обработки сопровождается выделением сульфида водорода  $H_2S$  в составе газовой фазы, образующейся над поверхностью топлива. Концентрация  $H_2S$  в составе газовой фазы для топлива с исходным содержанием сернистых

примесей до 3,5% не превышает  $0,04 \text{ мг/м}^3$ , что позволяет применять блок ультразвуковой обработки топлива в составе судовых систем топливоподготовки.

4. Обеспечение энергетической эффективности ультразвуковой обработки топлива достигается на частотах ультразвукового сигнала  $\nu_{\text{уз}}$  соответствующих оптимуму кривых  $S = f(\nu_{\text{уз}})$  и  $C_{\text{H}_2\text{S}} = f(\nu_{\text{уз}})$ , где  $S$  – концентрация сернистых примесей в топливе,  $C_{\text{H}_2\text{S}}$  – концентрация сульфида водорода над поверхностью топлива. Значение этой частоты при обработке топлив с вязкостью до  $380 \text{ мм}^2/\text{с}$  и содержанием сернистых примесей до 3,5 % лежит в пределах 22...26 кГц при амплитуде ультразвуковой волны 0,36...0,68 мкм и определяется экспериментально.

5. Для минимизации энергетических затрат на ультразвуковую обработку топлива частота ультразвукового сигнала должна обеспечивать температуру топлива  $T_{\text{топ}}^{\text{опт}}$  максимально приближенному к ближайшему оптимум кривых  $S = f(\nu_{\text{уз}})$  и  $C_{\text{H}_2\text{S}} = f(\nu_{\text{уз}})$ .

6. Усовершенствованный метод ультразвуковой обработки топлива позволяет определить оптимальное время этого процесса как синергетическое решение зависимостей  $S = f(t) \cap C_{\text{H}_2\text{S}} = f(t)$ .

## РАЗДЕЛ 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ТОПЛИВА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДОВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В четвертом разделе выполнено решение третьей и четвертой вспомогательных задач диссертационного исследования, которыми являются:

установление диапазона оптимальных характеристик ультразвукового генератора при удалении серы из топлива;

анализ изменения коррозионного состояния ЦПГ судового СОД от серосодержания высоковязкого топлива.

#### 4.1. Технологическое обеспечение исследований по ультразвуковой кавитационной обработке топлива в судовых условиях

Как было установлено в предыдущих главах, одним из дополнительных методов топливоподготовки, способствующим уменьшению вредного воздействия серы на детали цилиндровой группы дизеля, является кавитационная обработка топлива ультразвуком. В судовых условиях эта задача технологически может быть осуществлена путем дооборудования штатных систем топливоподготовки дополнительными модулями, осуществляющими данный процесс. Подобные вопросы рассматривались, изучались и выполнялись для двигателей относительно невысокой мощности, использующихся в автомобильном и железнодорожном



транспорте [141], а также для топлив с массовым содержанием серы до 1 % [142]. Аналогичные исследования для судовой энергетики, характеризующейся высокой агрегатной мощностью, широким спектром используемых топлив и автономностью работы СЭУ практически отсутствуют. Кроме того, при определении актуальности подобных разработок для систем топливоподготовки ДВС морских судов необходимо учитывать уровень рисков возможных отказов и сложность выполнения технологических работ в случае нарушения работоспособного состояния узла или элемента двигателя. Если доставка запасных частей и их замена при аварии стационарных двигателей может быть выполнена в течении нескольких часов, то для двигателей, используемых на морских судах, подобные мероприятия с учетом дальности и автономности плавания судна могут достигать нескольких десятков дней. Статистика нештатных ситуаций, связанных с авариями топливных систем и их элементов, располагает данными об использовании морских буксиров для транспортировки аварийного судна в ближайший порт. Таким образом, внедрение положительного опыта эксплуатации систем дополнительной ультразвуковой обработки топлива может способствовать не только повышению экономичности работы судовых дизелей, но и надежности работы всего судового пропульсивного комплекса.

Топливо для судовых дизелей с точки зрения дисперсной системы обладает вязкостью, не подчиняющейся законам Ньютона, Пуазейля, Стокса, т.к. входящие в ее состав длинные беспорядочно расположенные молекулы парафина и смол образуют гибкую решетку. Поэтому система оказывает значительное сопротивление силам сдвига. Кавитация разрушает непрерывную цепочку, разрывая связи между отдельными частями молекул. Таким образом, кавитация влияет на изменение структурной вязкости, т.е. на разрыв Ван-дер-ваальсовых связей внутри топлива. Дополнительная ультразвуковая обработка топлива, прежде всего, способствует улучшению

дисперсных качеств топлива, а явление кавитации, сопровождающее этот процесс, приводит к дополнительной активации его углеводородных составляющих и расщеплению C–C и C–S связей.

Для кавитационного воздействия на жидкость используются гидродинамические, электродинамические, пьезоэлектрические, магнитострикционные и механические генераторы кавитации. В ультразвуковом диапазоне наиболее распространены пьезоэлектрические и магнитострикционные генераторы кавитации. В этих электроакустических преобразователях используется прямой магнитострикционный и пьезоэлектрический эффект в переменных магнитных и электрических полях. Диапазон частот возбуждения преобразователей является очень широким (от 8 до 44 кГц и выше). Ультразвуковые колебания от преобразователя передаются к обрабатываемым веществам через специальные трансформирующие и согласующие устройства (концентраторы, пластины и др.), заканчивающиеся излучающей поверхностью [124, 128, 142, 143]. На практике классифицируют три диапазона ультразвукового поля: высокие частоты (2...10 МГц); средние частоты или сонохимия (300...100 кГц) и традиционный низкочастотный диапазон (<300 кГц). Высокочастотные диапазоны вызывают кавитацию, нагревание, создают турбулентность, сжимают-разряжают жидкость, разрушают молекулы, меняют структуру жидкости. Высокочастотная ультразвуковая обработка топлива применяется для обработки больших объемов топлива, содержание сернистых примесей в которых превышает 4%. Ее использование характерно для первоначальной переработки нефтепродуктов. Низкочастотный диапазон также вызывает кавитацию в жидкости, создает растягивающие напряжения, при этом относится к слабоэнергетическому воздействию, вызывающему в основном изменение свойств структурной жидкости. Именно этот диапазон ультразвуковых волн наиболее полно подходит для обработки топлива в судовых условиях.

Исследования влияния ультразвуковой кавитационной обработки топлива на сернистый износ ЦПГ и параметры работы судового двигателя проводилось для ряда судовых СОД, одним из которых являлся дизель S6A2 фирмы «Mitsubishi» со следующими характеристиками:

диаметр цилиндра – 0,15 м;

ход поршня – 0,19 м;

номинальная мощность – 360 кВт;

частота вращения коленчатого вала 1000 об/мин.

Названные дизели в количестве трех штук входили в состав судовой вспомогательной энергетической установки. Дизели имели каждый свою автономную систему топливоподачи, что давало возможность проводить исследования для отдельного дизеля с топливом, прошедшим разные этапы подготовки. Топливная система одного из двигателей не подвергалась перекомплектации и эксплуатировалась в «штатном» состоянии, при этом данный дизель принимался за «контрольный». Топливо к двум другим дизелям подавалось после дополнительной кавитационной обработки, для чего топливная система этих дизелей была доукомплектована модулем ультразвуковой кавитационной обработки. Фрагмент участка по дооборудованию топливной системы дизелей показан на рис. 4.1 [134, 144].

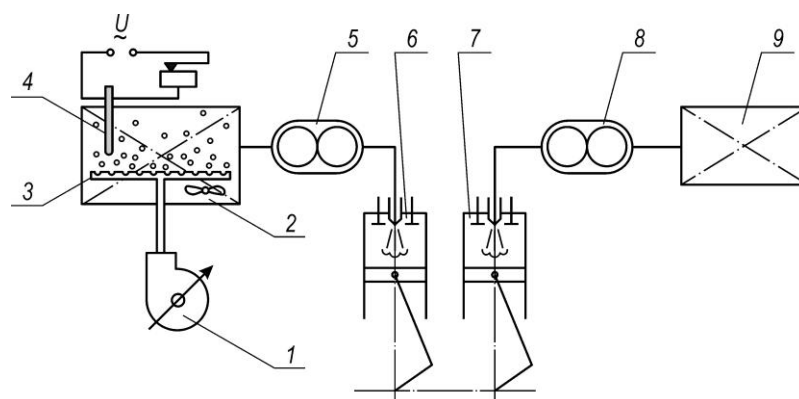


Рис. 4.1. Схема дооборудования системы подачи топлива к двигателю (фрагмент): 1 – воздушный компрессор; 2, 9 – топливные цистерны; 3 – воздушная магистраль; 4 – ультразвуковая установка; 5, 8 – топливные насосы; 6, 7 – двигатели

Двигатель 7 являлся контрольным» и эксплуатировался в «штатном» режиме, при этом топливо, пройдя стандартную процедуру подготовки, подавалось к нему насосом 8 из цистерны 9. Двигатели 6 являлись «экспериментальными». Топливо к двигателям подавалось насосом 5 из цистерны 2 (объемом  $1,8 \text{ м}^3$ ), в которой топливо подвергалось воздействию ультразвуковых волн с помощью модульного генератора многофазного ультразвукового поля УЗГ-5-М с фазовой коррекцией и магнитострикционным излучателем. Как указывалось в п. 3.8, генератор состоит из нескольких силовых ячеек УЗГ-5 и общей системы управления. Система позволяет регулировать разность фаз выходного напряжения ячеек, добиваясь требуемого распределения картины ультразвукового поля. Генератор обеспечивал любую мощность в диапазоне  $20 \dots 5000 \text{ Вт}$  и выходную частоту ультразвукового сигнала в диапазоне  $7 \dots 30 \text{ кГц}$  с точность задания частоты до  $1 \text{ Гц}$ .

Для усиления кавитационных явлений в нижней цистерны 2 была проложена дополнительная воздушная магистраль 3, нагнетание воздуха в которую осуществлялось воздушным компрессором 1. Пузырьки воздуха, попадающие в объем топлива, являлись дополнительными источниками кавитационных зон. При этом отношение мощности ультразвукового генератора  $N_{\text{УЗГ}}$  к объему расходной цистерны  $V_{\text{рас}}$  находилось в пределах  $N_{\text{УЗГ}}/V_{\text{рас}} = 0,5 \dots 3,0 \text{ кВт/м}^3$ , а отношение расхода воздуха  $G_{\text{воз}}$  к объему топлива в расходной цистерне  $V_{\text{рас}}$  в пределах  $G_{\text{воз}}/V_{\text{рас}} = 0,04 \dots 0,05 \text{ (м}^3/\text{час)}/\text{м}^3$ .

Ультразвуковая установка 4 эксплуатировалась в режиме  $I = 0,4 \text{ А}$  с применением магнитострикционного излучателя в диапазоне  $20 \dots 30 \text{ кГц}$ . Выбор данных величин обоснован в разделе 3 и определен путем лабораторных исследований по методике, изложенной в п. 3.8, где подтверждено, что именно этот интервал значений обеспечивает наилучшие дисперсные показатели топлива и максимальное удаление сернистых соединений [135-137]. В топливной цистерне 2, в которой происходила ультразвуковая обработка топлива, дополнительно устанавливался

лопаточный смеситель, что обеспечивало однородность топлива во всем объеме. Во время проведения эксперимента дизели эксплуатировались на топливе HFO380.

Для обеспечения идентичности эксперимента для всех дизелей проводилась их предварительная подготовка к испытаниям. Условия эксплуатации позволяли последовательно в течении 40 часов выполнить полную моточистку указанных дизелей, тем самым подготовить их к эксперименту. При этом на всех дизелях заменялась поршневая группа (поршни и поршневые кольца) и основные элементы топливной системы высокого давления (прецизионные пары топливного насоса высокого давления плунжер – втулка и игла – распылитель форсунки). Кроме того, перед началом экспериментов для обоих двигателей производился контроль и регулирование топливной аппаратуры. При этом топливные насосы высокого давления регулировались на одинаковый угол опережения подачи топлива, а форсунки двигателей настраивались на одинаковые давления подъема иглы. В течение всего времени проведения эксперимента осуществлялся контроль времени работы и эксплуатационной нагрузки на дизели. Для достижения равномерного распределения времени работы дизелей, двигатели последовательно переводились в режим stand-by. Согласно технологии проведения эксперимента разница во времени работы дизелей, а также в эксплуатационных нагрузках на двигатели не превышала 4 %, что, учитывая энергоемкость объектов, позволяло считать условия их работы идентичными. Эксплуатация двигателей проводилась на одном и том же сорте топлива. При этом средства автоматического контроля поддерживали вязкость топлива неизменной в течении всего эксперимента. Также идентичными поддерживался сорт циркуляционного масла, обеспечивающего режимы смазывания и его эксплуатационные характеристики. Данные мероприятия позволили считать, что выполнение эксперимента проходит в одинаковых условиях.

Задачей исследования было определение износа цилиндрических втулок и верхнего поршневого кольца для «стандартного» топлива, и топлива, подвергнувшегося дополнительной ультразвуковой авиационной обработке.

Определение износа цилиндрических втулок производилось в районе верхнего поршневого кольца, как места, наиболее подвергнувшегося сернистому износу и сернистой коррозии, а также еще в двух произвольных сечениях по длине втулки. Для повышения точности и достоверности измерений, определение износа цилиндрических втулок производилось методом искусственных баз и методом обмера индикатором (с точностью 0,01 мм). Схема и результаты проведения измерений по определению износа цилиндрических втулок судового дизеля S6A2 приведены в Приложении В. Отклонение в определении износа данными методами не превышало 7 %, что подтверждало корректность измерений [83, 106].

Определение износа поршневых колец выполнялось с помощью взвешивания на электронных весах модели PS 3500/C/1, имеющих следующие основные характеристики:

наименьший предел взвешивания – 0,5 г;

наибольший предел взвешивания – 3500 г;

дискретность – 0,01 г;

класс точности ГОСТ 24104-88 – 3;

класс точности ДСТУ EN 45501 – II;

номер у Державному реєстрі України – У 1821-13.

Перед проведением обмера и взвешивания цилиндрические втулки и поршневые кольца подвергались предварительной очистке от образовавшихся на их поверхностях частиц нагара, для чего их поверхности промывались дизельным топливом марки MDO.

Измерения износа проводилось для двух крайних цилиндров, которые, как известно, более чем другие (центральные цилиндры) подвержены этому явлению. Полученные при этом значения усреднялись. Кроме того, исследование только двух цилиндров существенно сокращало время

монтажных работ, которое ограничивалось условиями эксплуатации. По этим же причинам исследования выполнялись после 180, 390, 590, 810, 1030 часов работы двигателей.

В качестве эксплуатационных характеристик работы дизелей определялись температура газов перед газотурбонагнетателем и максимальное давление сгорания, которые измерялись с помощью судовых средств диагностики и контроля. Эти параметры относятся к основным, по которым происходит регулирование рабочего процесса дизеля и определение рассогласования нагрузки по цилиндрам. Кроме того, данные величины определяют тепловую и механическую напряженность дизеля.

#### 4.2. Исследования влияния ультразвуковой обработки топлива на сернистый износ деталей цилиндровой группы

При сгорании топлива в цилиндре дизеля все содержащиеся в нем сернистые соединения образуют двуокись  $\text{SO}_2$  и трехокись  $\text{SO}_3$  серы [145]. Одновременно в цилиндре образуется большое количество водяных паров и, таким образом, в продуктах сгорания появляется система из двух конденсирующихся компонентов  $\text{H}_2\text{O}$  –  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , обуславливающая возможность интенсивной сернистой коррозии, которая может быть газовой или жидкостной. Чувствительность дизелей к сернистой коррозии зависит от тепловой напряженности ЦПГ и удельной мощности. При избытке кислорода и высокой температуре повышается тепловая напряженность, а вместе с ней интенсивность газовой коррозии. Это приводит к газовой коррозии тарелок выпускных клапанов, верхней части цилиндровой втулки, первого поршневого кольца, а также газовыпускного тракта. При уменьшении температуры в цилиндре дизеля данный вид коррозии и связанного с ней

износа снижается. При резком понижении теплового режима преобладает жидкостная коррозия, повышенная интенсивность которой наблюдается во время пуска двигателя. Как газовая, так и жидкостная сернистая коррозия является причиной наличия серы в составе топлива.

В случае кавитационной обработки топлива происходит разрыв его молекулярных цепочек под действием растягивающих напряжений, эпицентром которых является так называемая «кавитационная каверна». В момент разрыва кавитационной каверны, давление и температура газа локально могут достичь значительных величин (по расчетным данным до 100 МПа и до 10000 К соответственно). После разрыва каверны в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве. При генерировании импульсных растягивающих напряжений в жидкости, присутствующие в ней зародыши кавитации (устойчивые паровые и газовые пузырьки малых размеров) начинают расти, образуя кавитационный кластер, форма и размеры которого определяются начальным спектром размеров кавитационных зародышей, характером прикладываемого напряжения и граничными условиями [146]. В кавитационную каверну могут проникать пары жидкости, растворенные газы, а также вещества с высокой упругостью пара и не могут проникать ионы или молекулы нелетучих растворенных веществ [118, 120]. Выделяющейся в процессе схлопывания каверны энергии достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул серы, что, впоследствии, приводит к разрыву C–S связей.

Влияние кавитационной обработки топлива на сернистую коррозию цилиндропоршневой группы может быть проанализировано на примере определения износа цилиндровой втулки и верхнего поршневого кольца судового СОД S6A2 фирмы «Mitsubishi». Результаты измерения линейного износа цилиндрических втулок  $I_h$  и массового износа поршневых колец  $I_m$  приведены на рис. 4.2 и 4.3 [134].



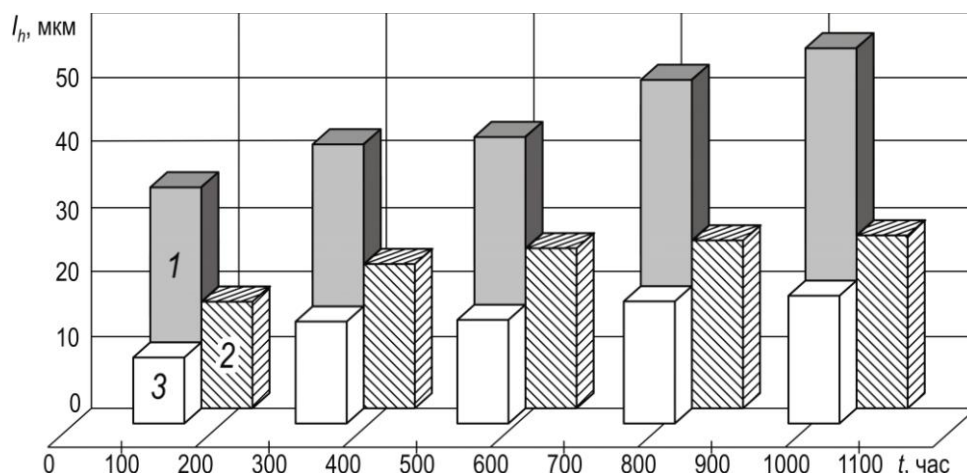


Рис. 4.2. Коррозионный износ цилиндрических втулок судового СОД S6A2 фирмы «Mitsubishi» при разных условиях проведения эксперимента:  
 1– топливо без дополнительной обработки (при эксплуатации системы топливоподготовки дизеля в «штатном» режиме);  
 2– топливо, прошедшее дополнительную кавитационную обработку (при дополнительном использовании в системе топливоподготовки только ультразвукового кавитатора);  
 3– топливо, прошедшее дополнительную кавитационную обработку (при использовании ультразвукового кавитатора и дополнительной подаче воздуха в зону кавитации)

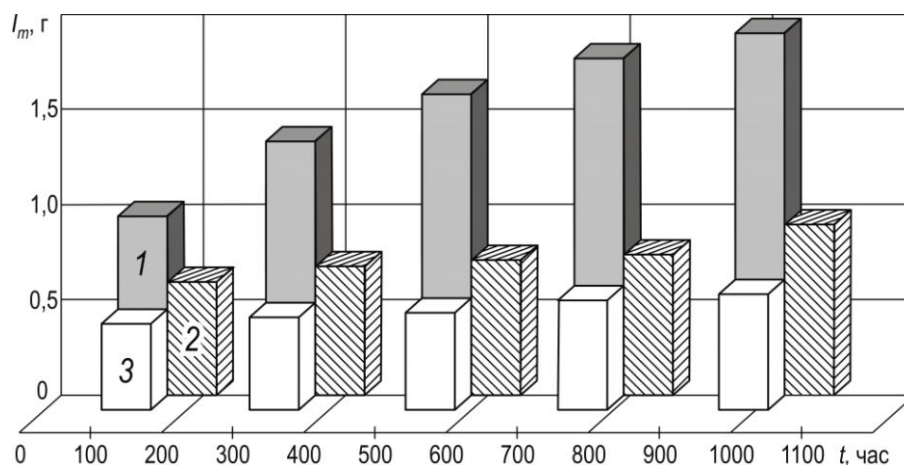


Рис. 4.3. Коррозионный износ поршневых колец судового СОД S6A2 фирмы «Mitsubishi» при разных условиях проведения эксперимента:  
 1– топливо без дополнительной обработки (при эксплуатации системы топливоподготовки дизеля в «штатном» режиме);  
 2– топливо, прошедшее дополнительную кавитационную обработку (при дополнительном использовании в системе топливоподготовки только ультразвукового кавитатора);  
 3– топливо, прошедшее дополнительную кавитационную обработку (при использовании ультразвукового кавитатора и дополнительной подаче воздуха в зону кавитации)

Результаты измерения износа цилиндрических втулок и поршневых колец приведены в табл. 4.1.

По полученным данным построены графические зависимости (рис.4.4 и 4.5), характеризующие снижение износа рассмотренных деталей при применении дополнительной кавитационной обработки топлива.

Табл. 4.1

Результаты экспериментальных исследований по определению износа деталей дизеля при различных условиях эксплуатации

|                                             | Условия эксплуатации | Время эксплуатации, час |      |      |      |      |
|---------------------------------------------|----------------------|-------------------------|------|------|------|------|
|                                             |                      | 180                     | 390  | 590  | 810  | 1030 |
| Износ цилиндрической втулки, $I_h$ , мкм    | 1                    | 32                      | 39   | 41   | 50   | 57   |
|                                             | 2                    | 18                      | 22   | 26   | 27   | 28   |
|                                             | 3                    | 10                      | 13   | 14   | 18   | 19   |
| Износ верхнего поршневого кольца, $I_m$ , г | 1                    | 0,95                    | 1,43 | 1,58 | 1,73 | 1,86 |
|                                             | 2                    | 0,63                    | 0,72 | 0,81 | 0,87 | 0,96 |
|                                             | 3                    | 0,41                    | 0,44 | 0,48 | 0,50 | 0,53 |

В табл.4.1 под условиями эксплуатации 1, 2, 3 понимается:

1– топливо без дополнительной обработки (при эксплуатации системы топливоподготовки дизеля в «штатном» режиме);

2– топливо, прошедшее дополнительную кавитационную обработку (при дополнительном использовании в системе топливоподготовки только ультразвукового кавитатора);

3– топливо, прошедшее дополнительную кавитационную обработку (при использовании ультразвукового кавитатора и дополнительной подаче воздуха в зону кавитации)

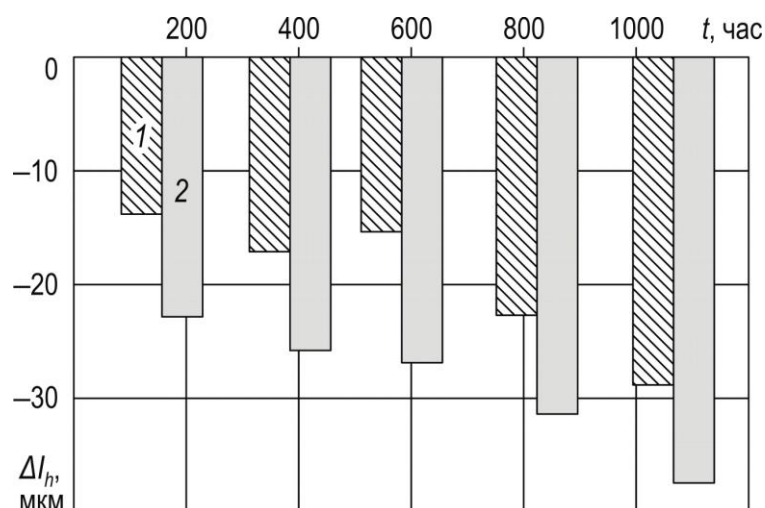


Рис. 4.4. Снижение коррозионного износа цилиндрических втулок судового дизеля S6A2 фирмы «Mitsubishi» при разных условиях эксплуатации:

1 – топливо, прошедшее дополнительную ультразвуковую обработку (при использовании только ультразвукового кавитатора);

2 – топливо, прошедшее дополнительную кавитационную обработку (при использовании ультразвукового кавитатора и дополнительной подаче воздуха в зону кавитации).

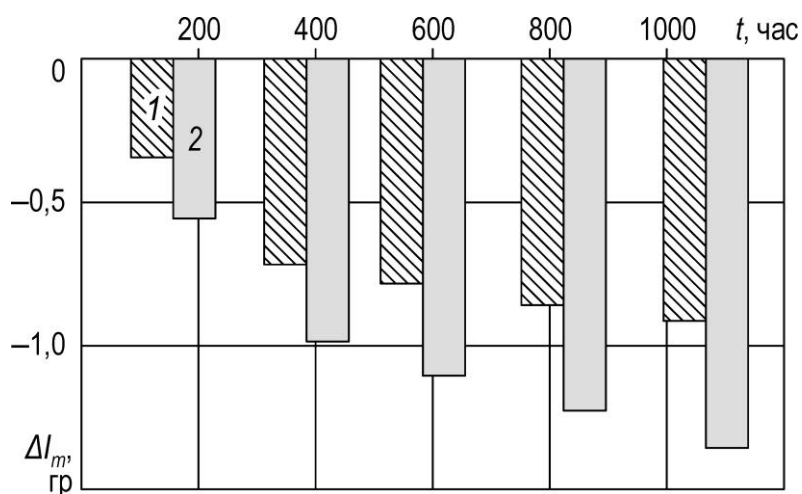


Рис. 4.5. Снижение коррозионного износа поршневых колец судового дизеля S6A2 фирмы «Mitsubishi» при разных условиях эксплуатации:

1 – топливо, прошедшее дополнительную ультразвуковую обработку (при использовании только ультразвукового кавитатора);

2 – топливо, прошедшее дополнительную кавитационную обработку (при использовании ультразвукового кавитатора и дополнительной подаче воздуха в зону кавитации).

Проведенные экспериментальные исследования свидетельствует о том, ультразвуковая кавитационная обработка топлива приводит к снижению сернистого износа деталей ЦПГ, при этом наибольшее снижение этого параметра наблюдается для поршневых колец, что особенно актуально, учитывая важность данного узла в обеспечении как качественного протекания процессов сжатия, сгорания и расширения, так и надежности работы сопряжения поршень – втулка цилиндра.

Комплекс аналогичных экспериментальных исследований выполнялся на судовых СОД 6VDS18, имеющих номинальную мощностью 350 кВт при частоте вращения коленчатого вала 750 об/мин, входящих в количестве трех штук в состав судовой вспомогательной энергетической установки.

Аналогично вышеизложенной методике в эксперименте были использованы три дизеля. Один из них являлся контрольным, а топливо для двух других подвергалось ультразвуковой обработке. При этом один из двигателей переводился в режим эксплуатации с критическими параметрами системы охлаждения. Для дизеля, эксплуатируемого на топливе, прошедшем стандартную технологию топливоподготовки, подобные условия спровоцировали бы резкое увеличение сернистой коррозии ЦПГ. Именно поэтому дополнительной задачей исследования была оценка возможности использования ультразвуковой обработки в критических условиях эксплуатации ЦПГ ДВС [106].

Условия эксплуатации позволяли выполнять вскрытие ЦПГ дизеля и контроль его состояния (по указанной выше технологии) после 170, 360, 580, 780 и 990 часов работы двигателей. Результаты измерения износа цилиндрических втулок и поршневых колец приведены на рис. 4.6 и 4.7.

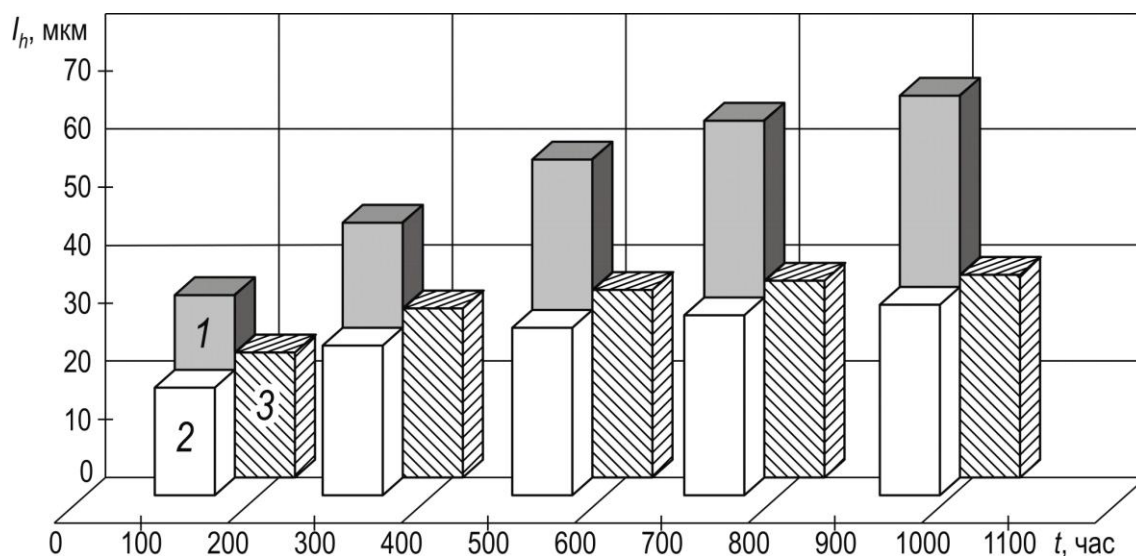


Рис. 4.6. Коррозионный износ цилиндрических втулок судового дизеля 6VDS18 при разных условиях эксплуатации:

- 1 – топливо без дополнительной обработки (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля в «штатном» режиме);
- 2 – топливо, прошедшее дополнительную ультразвуковую обработку (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля в «штатном» режиме);
- 3 – топливо, прошедшее дополнительную ультразвуковую обработку (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля на минимально допустимых температурных режимах)

Результаты экспериментов идентичны выполненным на дизелях S6A2. Однако, необходимо отметить, что даже в условиях, способствующих повышенному коррозионному износу (работа системы охлаждения и смазывания дизеля на минимально допустимых температурных режимах), значения как линейного износа цилиндрических втулок, так и массового износа поршневых колец на 63...65 % меньше аналогичных величин, полученных для дизеля, работающего на топливе без дополнительной подготовки.

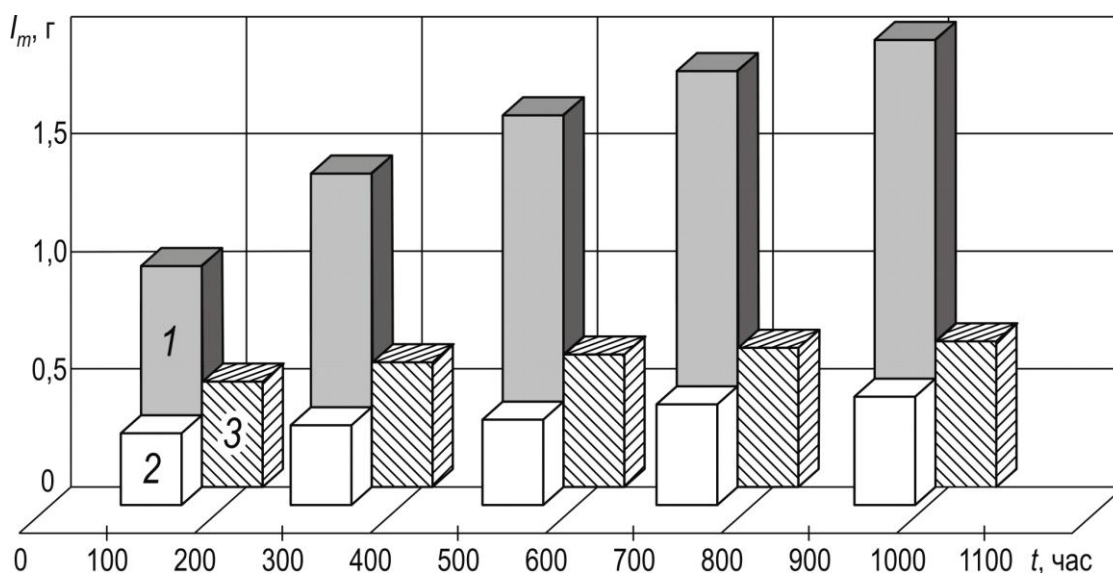


Рис. 4.7. Коррозионный износ поршневых колец судового дизеля 6VDS18 при разных условиях эксплуатации:

- 1 – топливо без дополнительной обработки (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля в «штатном» режиме);
- 2 – топливо, прошедшее дополнительную ультразвуковую обработку (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля в «штатном» режиме);
- 3 – топливо, прошедшее дополнительную ультразвуковую обработку (при эксплуатации системы охлаждения и смазывания дизеля на минимально допустимых температурных режимах)

Третий комплекс подобных исследований выполнялись на судовых СОД 6Г74 фирмы «Русский дизель», имеющих следующие основные характеристики: номинальная эффективная мощность  $N_e = 1150$  кВт, частота вращения вала  $n = 500$  об/мин, удельный эффективный расход топлива  $b_e = 0,196$  кг/(кВт·ч) и входящих в состав главной дизель энергетической установки морского теплохода среднего водоизмещения [83, 136].

В состав судовой энергетической установки входили два подобных дизеля. Двигатели имели разделенную друг относительно друга систему топливоподачи, что допускало эксплуатацию каждого дизеля на «своем» сорте топлива. Учитывая эту возможность, один из дизелей эксплуатировался на топливе, содержащем серы 0,8 %, а второй – 1,3 % серы. Топливная

система первого дизеля (использующего топлива с 0,8 % содержанием серы) эксплуатировалась без дополнительной ультразвуковой обработки топлива, а в топливную систему второго дизеля (использующего топливо с 1,3 % содержанием серы), был включен дополнительный блок ультразвуковой обработки топлива. Как и в предыдущих сериях исследований, время работы дизелей в течении всего эксперимента, а также среднестатистические нагрузки на дизели не превышали 4 %. Влияние содержания серы в топливе на коррозионный износ деталей ЦПГ (втулок и поршневых колец) продемонстрировано диаграммами, показанными на рис. 4.8 и 4.9.

Особенно подчеркнем, что износ как цилиндрических втулок, так и поршневых колец дизеля, работающего на топливе с повышенным содержанием серы, но подвергшемся дополнительной ультразвуковой обработке, характеризуется меньшими значениями, чем износ у дизеля, работающего на топливе с меньшим содержанием серы, но без проведения дополнительной ультразвуковой обработки.

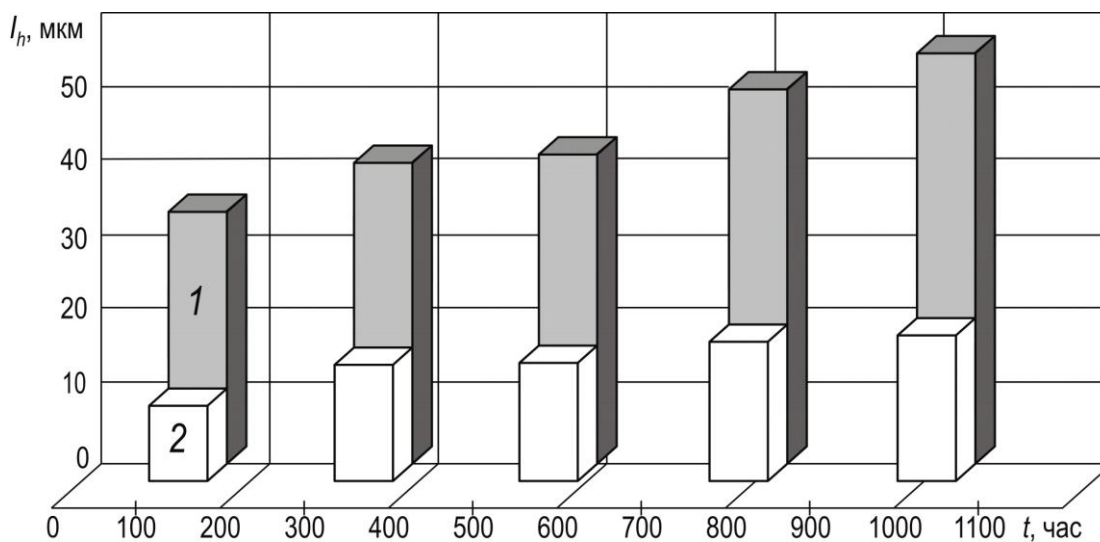


Рис. 4.8. Износ цилиндрических втулок судового СОД Г74:

- 1 – работа на «чистом» топливе с содержанием серы 0,8 %;
- 2 – работа на топливе с содержанием серы 1,3 % предварительно прошедшем ультразвуковую подготовку

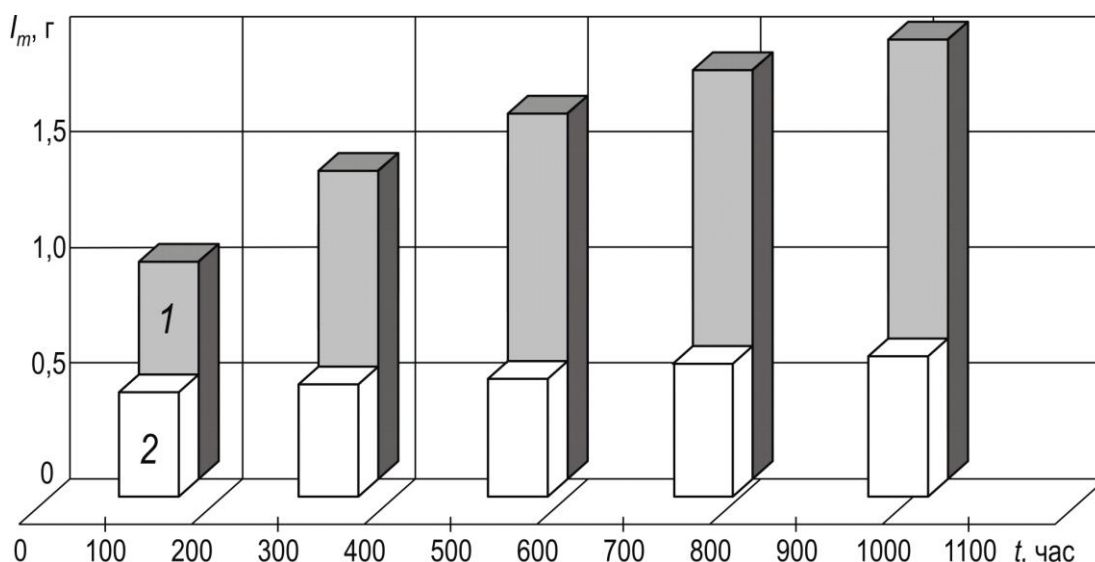


Рис. 4.9. Износ поршневых колец судового СОД Г74:

- 1 – работа на «чистом» топливе с содержанием серы 0,8 %;  
 2 – работа на топливе с содержанием серы 1,3 %, предварительно прошедшем ультразвуковую подготовку

#### 4.3. Исследование влияния ультразвуковой обработки топлива на эксплуатационные параметры работы дизеля

Фракционный и элементарный состав топлива, его эксплуатационные характеристики и качество подготовки влияют не только на техническое состояние деталей дизеля (в частности на коррозионный износ ЦПГ), но и на показатели рабочего процесса ДВС. Поэтому при проведении экспериментальных исследований контролировались и определялись не только состояние ЦПГ дизеля, но и такие показатели как максимальное давление цикла и температура газов в выпускном коллекторе. Характер изменения данных величин показан на рис. 4.10 и 4.11 [134].



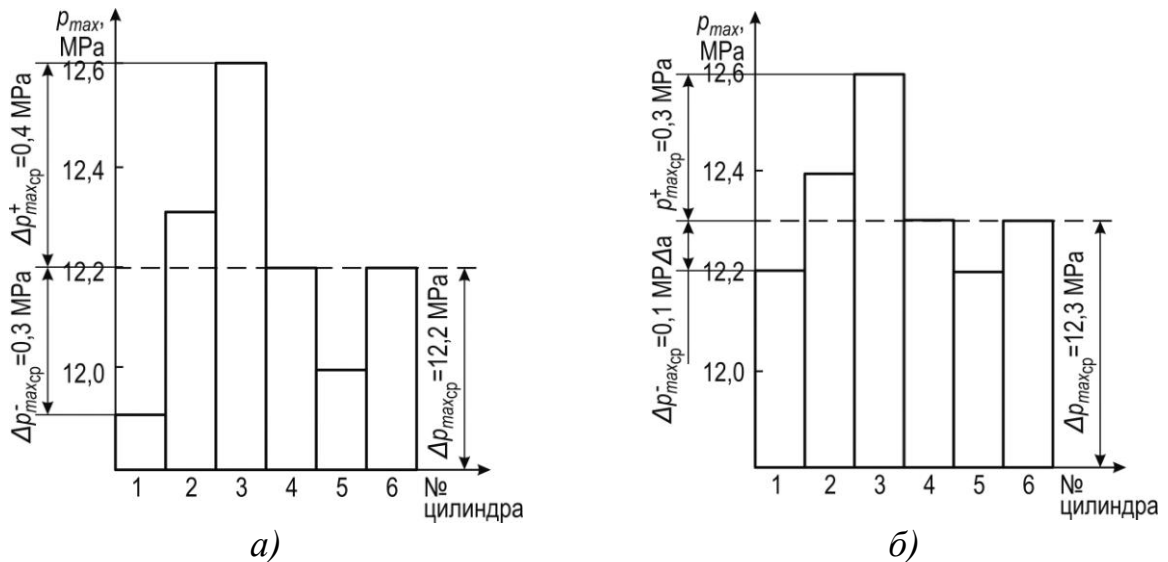


Рис. 4.10. Рассогласование максимального давления цикла по цилиндрам судового среднеоборотного дизеля S6A2 фирмы «Mitsubishi» при разных условиях проведения эксперимента:

- а) топливо без дополнительной обработки (при эксплуатации системы топливоподготовки дизеля в «штатном» режиме);
- б) топливо, прошедшее дополнительную кавитационную обработку (при использовании ультразвукового кавитатора и дополнительной подаче воздуха в зону кавитации)

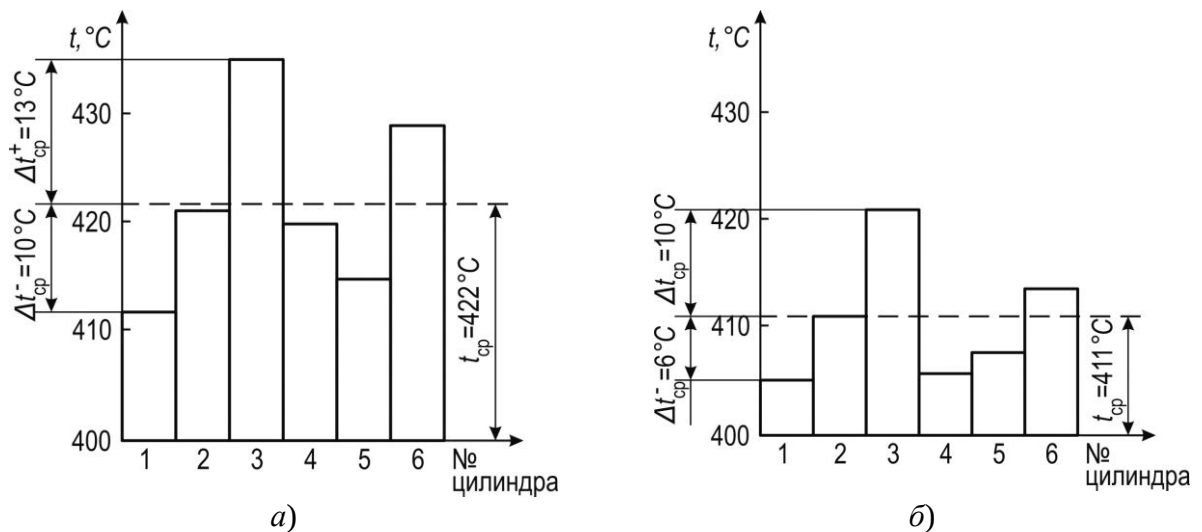


Рис. 4.11. Рассогласование температуры выпускных газов по цилиндрам судового среднеоборотного дизеля S6A2 фирмы «Mitsubishi» при разных условиях проведения эксперимента:

- а) топливо без дополнительной обработки (при эксплуатации системы топливоподготовки дизеля в «штатном» режиме);
- б) топливо, прошедшее дополнительную кавитационную обработку (при использовании ультразвукового кавитатора и дополнительной подаче воздуха в зону кавитации)

Результаты, полученные при определении эксплуатационных параметров работы дизеля (максимального давления цикла и температуры газов в выпускном коллекторе) свидетельствуют о снижении как механических, так и тепловых нагрузок на дизель при использовании высоковязкого сернистого топлива, прошедшего предварительную кавитационную обработку. Согласно требованиям Правил технической эксплуатации судовых технических средств рассогласование данных величин по цилиндрам дизеля от среднего значения не должно превышать  $\pm 3,5\% \Delta p_{\max}$  и  $\pm 10^\circ\text{C}$ . Уменьшение данного интервала в случае использования кавитационной обработки топлива способствует снижению динамических нагрузок на КШМ дизеля и уменьшения неравномерности частоты вращения дизеля. Оба этих параметра, в свою очередь, снижают изгибающие и скручивающие моменты на коленчатом валу дизеля. Кроме того, возрастание степени рассогласования величины максимального давления цикла по цилиндрам дизеля (что характерно для использования топлива без дополнительной кавитационной обработки) свидетельствует как о повышении триботехнических потерь в элементах топливной аппаратуры дизеля, так и худшем распыливании топлива.

#### 4.4. Влияние ультразвуковой обработки топлива на состояние прецизионных пар топливной аппаратуры высокого давления

Высокая энергоемкость и насыщенность топливной системы судовых дизелей характеризуется самым ответственным, с точки зрения обеспечения надежности, трибоузлом – парой трения плунжер–втулка топливного насоса высокого давления и парой трения игла форсунки–корпус распылителя. Поэтому, при проведении экспериментов оценивалось техническое состояние

топливной аппаратуры дизеля и, в частности, состояние поверхности плунжера топливного насоса высокого давления. Основным видом дефектов данного узла является его износ. При этом, учитывая степень фильтрации топлива можно утверждать, что, детали топливной аппаратуры высокого давления более подвержены коррозионному износу, чем механическому или абразивному. Так, наличие воды в топливе вызывает коррозионное разрушение поверхностей деталей прецизионных пар, причем оно значительно интенсифицируется при возрастании количества сернистых соединений в топливе.

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 (что характерно для топливной аппаратуры), когда происходит местный контакт поверхностей, сопровождающийся пластической деформацией и насыщением поверхностных слоев металла кислородом, растворенным в топливе. 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 [40].

Оценка износа поверхности плунжера топливного насоса высокого давления выполнялась путем определения площади пятен видимого износа  $S_{in}$ . Для этого в интервале работы дизелей, позволяющим их кратковременный вывод из эксплуатации и равном 220, 410, 640, 830 и 1060 часов, проводился демонтаж плунжеров из двух крайних топливных насосов (обеспечивающих работу 1-го и 6-го цилиндра). После этого в судовой

лаборатории с помощью микроскопических исследований выполнялось определение величины  $S_{Ih}$ . Технология проведения обмера поверхностей плунжеров соответствовала описанной ранее технологии по определению износа цилиндрических втулок. При этом дополнительно выполнялась очистка поверхностей с помощью эфира или хладона, что обеспечивало отсутствие на поверхности окисных пленок и повышало точность измерений. Динамика износа прецизионной пары плунжер–втулка топливного насоса высокого давления показана на рис. 4.12 [40, 134].

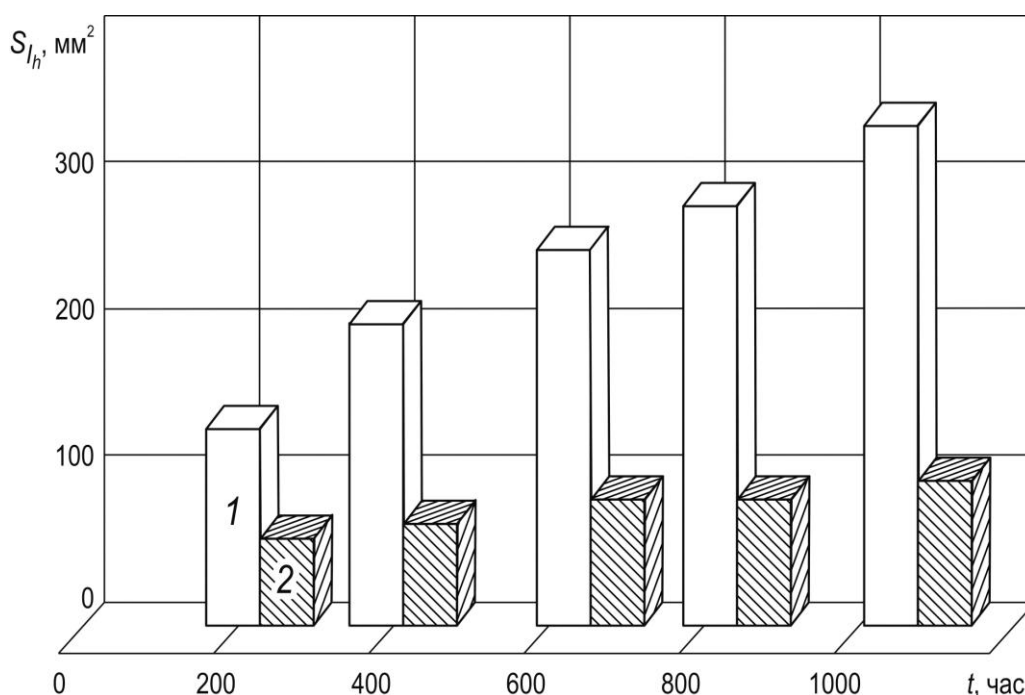


Рис. 4.12. Изменение износа прецизионной пары плунжер–втулка топливного насоса высокого давления судового СОД S6A2 фирмы «Mitsubishi» при разных условиях проведения эксперимента:

- 1 – топливо без дополнительной обработки (при эксплуатации системы топливоподготовки дизеля в «штатном» режиме);
- 2 – топливо, прошедшее дополнительную кавитационную обработку (при использовании ультразвукового кавитатора и дополнительной подаче воздуха в зону кавитации)

#### 4.5 Влияние ультразвуковой обработки топлив на экологические параметры работы дизеля

Ежегодно международные и национальные надзорные организации ужесточают требования к экологическим характеристикам тепловых двигателей и качеству используемого в них топлива. Так, например, Международная морская организация выдвигает специальные требования к морским сортам топлива относительно содержания в них серы. Согласно этим требованиям с 01 января 2011 г. максимальное содержание серы в топливе не должно превышать 3,5 % по массе. Кроме того, при работе тепловых двигателей в особых районах разрешается использовать топливо с содержанием серы 1,0 % по массе, а при работе в этих же районах с 01 января 2015 г. – не более 0,1 % [21, 22]. К таким районам относится прилегающая к территориальным водам Украины акватория Средиземного моря, а также северо-западная акватория Европы. Эксплуатация судовых ДВС (как главных, так и вспомогательных) в таких районах возможна только на дистиллятных топливах, например DMX, DMA, DMZ (Marine Gas Oil – MGO) или DMB (Marine Diesel Oil – MDO).

В связи с этим актуальной является задача повышения качества подготовки топлива перед вхождением судна в подобные акватории не только с целью снижения сернистого износа деталей двигателя, но и для снижения выбросов соединений серы в выпускных газах.

Снижение эмиссии окислов серы  $SO_x$  в выпускных газах осуществляется, как правило, с помощью использования скрубберной очистки. Широкого распространения на транспортных судах данный метод не получил, прежде всего из-за больших габаритов самих скрубберов, неизбежной дополнительной потери энергии с выпускными газами на преодоление дополнительного аэро- и гидродинамического сопротивления при

прохождении скрубберов, а также ввиду необходимости сбора и накопления промывочной воды, что требует дополнительных грузовых объемов (танков или цистерн) в случае большой автономности работы судна и его энергетической установки. В применении к судовым ДВС этот метод используется для транспортных и пассажирских судов каботажного плавания, порты заходов которых могут обеспечить прием и дальнейшую утилизацию воды, использующейся в контурах скрубберной очистки. Кроме того, снижение эмиссии  $SO_x$  в выпускных газах способствует лишь улучшению экологических параметров ДВС и не влияет на техническое состояние деталей дизеля и протекание процесса сгорания топлива.

Учитывая изложенное, параллельно с определением энергетических и теплотехнических параметров работы дизеля и его технического состояния при экспериментальных исследованиях оценивались экологические параметры его работы.

Измерения количества оксидов серы  $SO_x$  в выпускных газах проводилось для отдельно взятого дизеля 6Г74, последовательно работающего на топливе с различным содержанием серы. При этом, использовались топлива, содержащие следующее количество серы: 2,1; 1,6; 1,3; 0,8% по массе. Результаты исследований приведены на рис. 4.13 [136].

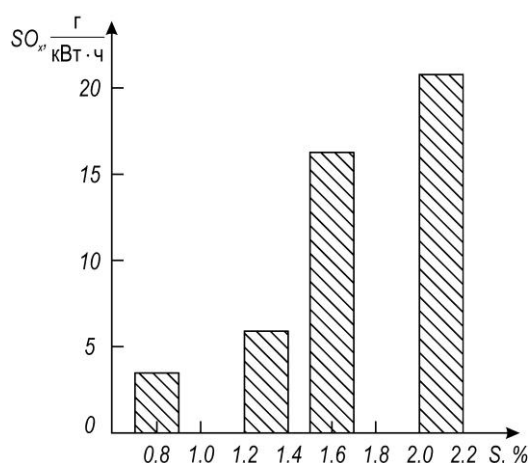


Рис. 4.13. Зависимость содержания  $SO_x$  в выпускных газах судового дизеля 6Г74 при его работе на топливе с различным содержанием серы

Зависимость  $SO_x$  от содержания серы в топливе  $S$  не имеет строгой графической зависимости и может быть аппроксимирована полиномом сложной степени, однако очевидно, что снижения массовой доли серы в топливе способствует улучшению экологических параметров работы дизеля.

Современные требования судовладельцев и фрахтователей судов вынуждают судовой экипаж минимизировать расходы на топливо. Одним из вариантов решения данной задачи является эксплуатация судового пропульсивного комплекса на режимах экономичного хода ECR (Economy Continuous Rating). При этом мощность экономичного хода определяется из интервала  $N_{\text{ээх}} = (0,5 \dots 0,7)N_{\text{ном}}$ . Данные режимы, безусловно, позволяют существенно снизить затраты на топливо, однако способствуют ухудшению экологических параметров работы дизеля. В связи с этим во время эксперимента также определялось изменение уровня выбросов  $SO_x$  в функции от нагрузки дизеля при его работе на топливе с различным содержанием серы. Полученные зависимости приведены на рис. 4.14.

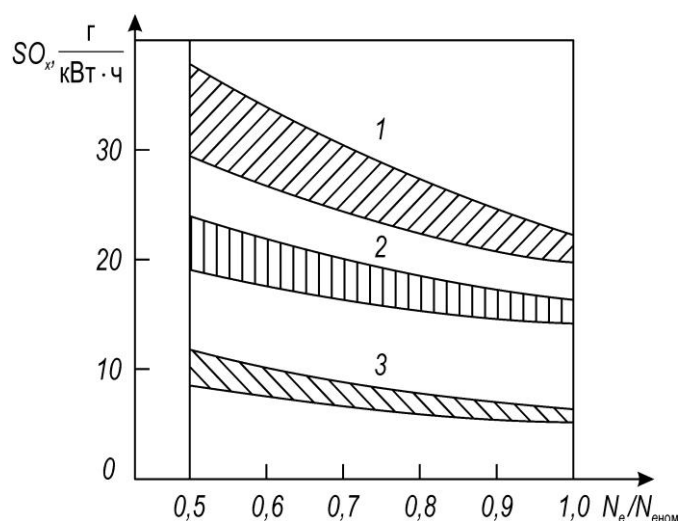


Рис. 4.14. Области изменения содержания  $SO_x$  в выпускных газах судового дизеля 6Г74 при его работе на топливе с различным содержанием серы:

1 –  $S = 2,1 \%$ ; 2 –  $S = 1,6 \%$ ; 3 –  $S = 1,3 \%$

Результаты изменения концентрации  $SO_x$  в выпускных газах судовых дизелей 6Г74, использующих топливо без и с ультразвуковой обработкой показаны на рис. 4.15 и свидетельствуют об улучшении экологических показателей дизелей при ее проведении.

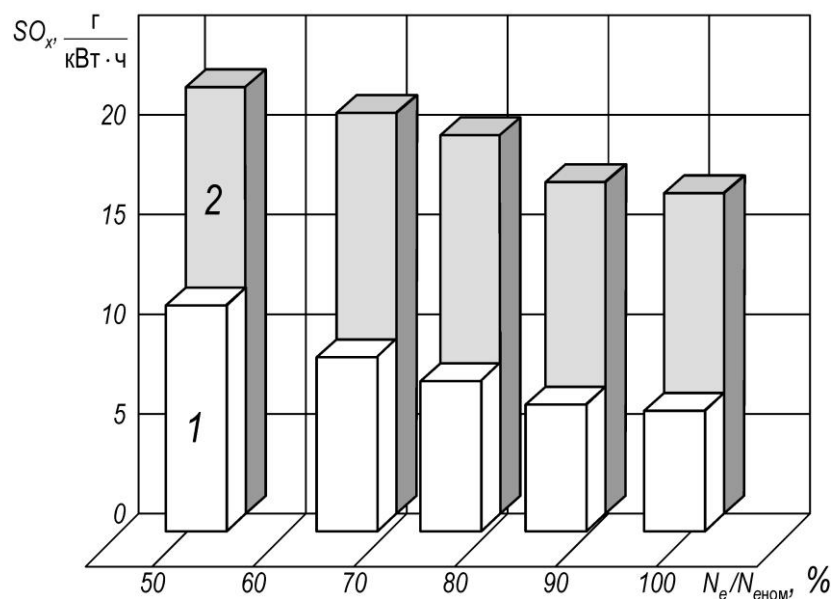


Рис. 4.15. Изменение содержания  $SO_x$  в выпускных газах дизелей 6Г74 при их работе на топливе без дополнительной обработки (1) и при использовании дополнительной ультразвуковой обработки топлива (2)

Обобщенные экспериментальные данные, отражающие влияние ультразвуковой кавитационной обработки топлива на энергетические, экономические и экологические параметры работы судовых СД приведены в табл. 4.2.



Таблица 4.2

Влияние ультразвуковой кавитационной обработки топлива на  
энергетические, экономические и экологические параметры работы  
судовых СОД

| Наименование контролируемого параметра                              | Работа дизеля на «базовом» топливе | Работа дизеля на топливе, прошедшем ультразвуковую обработку |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Снижение износа, %:                                                 | —                                  | 37,6                                                         |
| цилиндровой втулки                                                  | —                                  | 54,3                                                         |
| поршневого кольца                                                   |                                    |                                                              |
| Общее отклонение от максимального давления цикла, %                 | 5,47                               | 3,13                                                         |
| Общее отклонение от средней величины температуры выпускных газов, % | 5,45                               | 3,89                                                         |
| Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·час)                    | 206±1,8                            | 198±1,8                                                      |
| Концентрация $SO_x$ в выпускных газах, кг/(кВт·час)                 | 31,3±0,12                          | 13,6±0,12                                                    |

#### 4.6. Выводы по разделу 4

В качестве основных выводов по представленным в разделе 4 результатам отметим следующее.

1. Ультразвуковая кавитационная обработка топлива приводит к снижению сернистого износа деталей цилиндропоршневой группы, при этом наибольшее снижение этого параметра наблюдается для поршневых колец, что особенно актуально, учитывая важность данного узла в обеспечении как качественных процессов сжатия, сгорания и расширения, и надежности работы сопряжения поршень – втулка цилиндра.

2. При отношении мощности ультразвукового генератора  $N_{\text{узг}}$  к объему расходной цистерны  $V_{\text{рас}}$  в пределах  $N_{\text{узг}}/V_{\text{рас}}=0,55...2,78$  кВт/м<sup>3</sup> происходит снижение концентрации серосодержащих компонентов топлива в 1,15...1,35 раза, что совместно с интенсификацией процесса ультразвуковой обработки путем принудительной подачи воздуха в объем обрабатываемого топлива приводит к 3,2...3,5 кратному снижению коррозионного износа деталей судового СОД. Использование при кавитационной обработки дополнительной подачи сжатого воздуха в зону кавитации способствует интенсификации этого процесса.

3. Использование кавитационной обработки топлива (как подтверждается экспериментально) способствует также снижению износа прецизионной пары плунжер–втулка топливного насоса высокого давления. В условиях эксплуатации это способствует уменьшению протечек топлива через это трибосопряжение и интенсификации процесса впрыскивания топлива в цилиндр дизеля.

4. Применение ультразвуковой обработки топлива способствует улучшению:

экономических показателей работы судовых СОД (в частности приводит к снижению на 1,5...2,7 % удельного эффективного расхода топлива и соответствующего повышения эффективного КПД дизеля);

энергетических показателей работы судовых СОД (в частности способствует повышению эффективного давления цикла);

экологических показателей работы дизеля, в частности снижению на 18...32 % концентрации  $\text{SO}_x$  в выпускных газах;

тепловых нагрузок на элементы дизеля, в частности способствует уменьшению на 1,6...2,1 % общего отклонения от средней величины температуры выпускных газов и на 2,3...2,6 % общего отклонения от максимального давления цикла по цилиндрам дизеля.

## РАЗДЕЛ 5

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУДОВЫХ СИСТЕМ ТОПЛИВОПОДГОТОВКИ

Пятый раздел посвящен решению главной задачи диссертационного исследования – на основе синтеза научных результатов решения вспомогательных задач и обобщения опыта эксплуатации ДВС морских судов создать систему топливоподготовки судовых СОД, способствующей максимальной десульфуризации топлива при минимально неизбежных затратах энергии.

#### 5.1 Определение энергетической эффективности топливных систем судовых СОД, работающих на высоковязких сортах тяжелых топлив

В современных рыночных условиях морские и речные судоходные компании, основную материальную базу которых составляет транспортный флот, испытывают серьезные экономические и финансовые трудности в конкурентной борьбе на мировом рынке транспортных услуг. Большинство транспортных судов эксплуатируются судоходными компаниями 10...20 лет.

Для сохранения своего присутствия на рынке судовладельцы вынуждены искать пути существенного сокращения собственных затрат с тем, чтобы не только конкурировать с другими представителями морской индустрии, но и обеспечить уровень доходов, который бы создавал условия для расширенного воспроизводства. Судоходные компании реализуют сокращения собственных финансовых затрат различными путями. К их числу относятся: сокращение количества экипажа на судне, снижение основных эксплуатационных затрат за счет перехода на дешевые сорта высоковязких

топлив вязкостью выше 380 мм<sup>2</sup>/с. Один из перспективных методов снижения финансовых затрат является переход на путь оптимизирования энергопотребления и повышения энергетической эффективности судов [148].

С 1 января 2013 года в соответствии с положениями Резолюции ИМО МЕРС.203(62) вступили в силу новые правила Конвенции МАРПОЛ, направленные на повышение энергетической эффективности судов. На все новые суда, построенные после 1 января 2013 года, распространяются требования по расчету Конструктивного коэффициента энергетической эффективности судна (ККЭЭ) или Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI), а для судов, находящихся в эксплуатации, с этой даты вводится требование по наличию на борту Судового плана управления энергетической эффективностью судна (СПУЭС) или Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP).

Для определения энергетических затрат на обеспечение процесса топливоподготовки выполнялись исследования с компонентами СЭУ судна, предназначенного для перевозки генеральных грузов дедвейтом 7650 тонн, оснащенный ГД с мощностью 3440 кВт. При этом определялось количество непрерывно затрачиваемой энергии на дополнительную подготовку высоковязкого топлива RMG 380 в топливной системе судового СОД, а также определялись возможности минимизации этих затрат.

Анализ функционирования топливной системы показал, что на судне используется общепринятая стандартная система топливоподготовки двигателя, рекомендованная международным советом по двигателям внутреннего сгорания (СІМАС). Данная система состоит из последовательно включенных активных и пассивных элементов с двукратным резервированием, управляющих эксплуатационными характеристиками топлива.

Основные процессы, которые в ней протекают: отстаивание, фильтрация, сепарация, нагревание, распыливание топлива, дозирование

подачи и синхронизация с движением поршня. В настоящее время при эксплуатации этой системы нет общепринятой концепции номинирования параметров работы ее элементов. Документы, регламентирующие подготовку топлива на судне, обычно состоят из нормативных документов классификационных обществ, инструкций завода строителя двигателя, изготовителя элементов топливной системы (насосов, фильтров, подогревателей и т.п.), анализов топлива, а также рекомендаций по поддержанию температуры топлива в танках запаса, элементах системы и перед ТНВД.

В научно-технической литературе межмолекулярные процессы, протекающие в высоковязких топливах при изменении их функциональных характеристик в системах топливоподготовки СДВС, обычно для упрощения считаются имеющими линейную зависимость, т.е. описываются при помощи ньютоновской модели поведения. При этом следует учитывать, что в ряде случаев сдвиговый характер течения топлива определяется законами граничного трения, а иногда (при взаимодействиях молекул топлива с твердой металлической поверхностью топливной аппаратуры и деталями топливоперекачивающих и топливо подкачивающих насосов) могут быть представлены как системы углеродных нанотрубок в матрице эпитропных жидких кристаллов [149]. Пространственное размещение молекул в матрице эпитропного жидкого кристалла тяжелого топлива должно следовать термодинамическому закону, выражающему стремление системы к минимуму свободной энергии [150]. Целенаправленное регулирование молекулярной структуры высоковязких топлив, полярности, а также количества дефектов дисперсной фазы путем воздействия внешними параметрами, такими, как температура, давление, ультразвуковые и электрические поля, позволяют в ряде случаев добиться таких эксплуатационных свойств топлив, которые наиболее благоприятны для их сжигания в дизелях.

Для определения непрерывно затрачиваемой энергии на доподготовку высоковязкого топлива RMG 380 в топливной системе судового СОД, данная топливная система СИМАС была условно разделена на шесть последовательно включенных блоков, связанных короткими трубопроводами. Блоки топливоподготовки включали в себя следующие основные компоненты: I-ый блок – танк запаса тяжелого топлива, топливный подогреватель, топливоперекачивающий насос, отстойная цистерна; II-ой блок – топливоподкачивающий насос сепаратора топлива, топливный подогреватель сепаратора топлива; III-ий блок – сепаратор топлива, расходная цистерна; IV-ый блок – бустерный насос, бустерная цистерна; V-ый блок – топливный подогреватель, регулятор вязкости, фильтр грубой очистки топлива; VI-блок – топливный фильтр тонкой очистки, ТНВД, форсунка.

Процессы, протекающие в каждом из блоков топливной системы могут быть описаны известными физическими уравнениями [39, 41, 148]:

- уравнение неразрывности (сплошности) потока:

$$Q = V_i S_i = \text{const},$$

- уравнение Бернулли:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + h_f + \Sigma h_w,$$

- уравнение Дарси (потери напора по длине трубопровода):

$$h_w = \zeta \frac{V_i^2}{2g},$$

где  $Q$  – объемный расход топлива, м<sup>3</sup>/с;

$V_i$  – скорость движения топлива в  $i$ -ом блока, м/с;

$S_i$  – сечение трубопровода в  $i$ -ом блоке, м<sup>2</sup>;

$\gamma$  – удельный вес топлива, м<sup>3</sup>/кг;

$p_1, p_2$  – давления топлива в последовательных сечениях трубопровода, кПа;

$z_1, z_2$  – геометрическая высота всасывания в последовательных сечениях трубопровода, м;

$V_1, V_2$  – средняя скорость топлива в последовательных сечениях трубопровода, м/с;

$\alpha$  – коэффициент кинетической энергии;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$h_w$  – общие потери напора в гидравлической системе, кПа;

$\nu$  – кинематическая вязкость топлива, мм<sup>2</sup>/с;

$T$  – температура топлива, К;

$h_f$  – коэффициент Кориолиса;

$\zeta$  – местные потери напора в топливной системе.

Уравнения, определяющие энергетические затраты на процесс топливоподготовки:

- количество тепла подведенного к топливу на  $i$ -ом участке:

$$W_{ti} = c_i m_i \Delta T_i,$$

- количество электрической энергии, подведенное к элементам участка:

$$W_{эi} = U_i I_i \cos \varphi,$$

- суммарные энергетические затраты на подготовку топлива, состоящие из затрат энергии, подведённой к электродвигателю насосов или сепараторов тяжелого топлива, и количества тепла подведенного к топливу в  $i$ -ом блоке:

$$W_{\Sigma} = W_{ti} + W_{эi}.$$

В приведенных выражениях

$c$  – удельная теплоемкость топлива, кДж/(кг·К);

$m$  – масса топлива, кг;

$\Delta T$  – разность температуры топлива до и после обработки, К;

$U$  – напряжение, В;

$I$  – сила тока, А;

$\cos \varphi$  – угол сдвига между током и напряжением.

На следующем этапе для определения энергетических затрат на топливоподготовку тяжелого топлива были проведены экспериментальные исследования рабочих параметров топливной системы (температуры и давления тяжелого топлива RMG 380 относительно длины трубопровода). Для этого система топливоподготовки была оборудована дополнительными контрольно-измерительными приборами – манометрами и термометрами. Дополнительные измерительные приборы были установлены в максимально приближенных местах к рассматриваемым сечениям.

Снятые параметры системы топливоподготовки давления, температуры, вязкости тяжелого топлива в реальном времени при постоянной нагрузке ГД использовались в разработанной программе (на базе пакета MATLAB R2011b) по расчету энергетических затрат на процесс топливоподготовки для шести блоков топливной системы. Результаты расчета суммарных энергетических затрат на подготовку тяжелого топлива RMG 380: I блок –  $\Sigma W_I = 21,6$  кВт; II блок –  $\Sigma W_{II} = 17,6$  кВт; III блок –  $\Sigma W_{III} = 6,85$  кВт; IV блок –  $\Sigma W_{IV} = 0,72$  кВт; V блок –  $\Sigma W_V = 4,73$  кВт; VI блок –  $\Sigma W_{VI} = 6,82$  кВт;  $\Sigma W_{I-VI} = 59,32$  кВт (1,72 % от мощности главного двигателя).

Проверка погрешности разработанного метода выполнена на основании сравнения расчетных и экспериментальных данных определения энергозатрат на топливоподготовку тяжелого топлива в топливной системе двигателя и не превышает 6 % [148].

Следующим этапом исследований была оптимизация работы системы топливоподготовки судовых СОД.



В качестве целевой функции была выбрана величина энергетических затрат на процесс топливоподготовки. Решение, позволяющее минимизировать энергетические затраты на топливоподготовку, заключалось в назначении соответствующих рабочих параметров топливной системы – давления и температуры, которые удовлетворяют минимальному решению целевой функции. Минимальные затраты на процесс топливоподготовки были определены для дизельного топлива DMA, имеющего вязкость  $5...8 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $20^\circ\text{C}$ . Данные сорта топлива не требуют дополнительных затрат энергии на увеличение температуры, а кроме того, на процесс их сепарации потребляется меньшее количество энергии.

В результате расчета минимизирования энергетических затрат на топливоподготовку дизельного топлива DMA были получены следующие результаты: I блок –  $\Sigma W_I = 12,3 \text{ кВт}$ ; II блок –  $\Sigma W_{II} = 8,6 \text{ кВт}$ ; III блок –  $\Sigma W_{III} = 3,42 \text{ кВт}$ ; IV блок –  $\Sigma W_{IV} = 0,65 \text{ кВт}$ ; V блок –  $\Sigma W_V = 2,18 \text{ кВт}$ ; VI блок –  $\Sigma W_{VI} = 6,54 \text{ кВт}$ ;  $\Sigma W_{I-VI} = 33,69 \text{ кВт}$  (0,98 % от мощности главного двигателя).

Минимизация энергетических затрат на подготовку тяжелого топлива в VI-ом блоке системы топливоподготовки не рациональна. Причиной этого является ничтожно малое изменение давления в сечении топливного трубопровода на выходе из ТНВД, а также отсутствие штатных манометров и невозможность установки экспериментальных в сечениях перед и после ТНВД, что не позволяло определить параметры изменения давления при его регулировке в этих сечениях.

Суммарные минимальные энергетические затраты на топливоподготовку всей топливной системы, при возможности регулировки основных параметров топливной системы согласно заданным пределам  $p$  и  $T$  для дизельного топлива DMA составляет –  $33,69 \text{ кВт}$ . Снижение мощности, потребляемой в данном случае системой топливоподготовки составляет  $25,63 \text{ кВт}$  (43,2 % от базового значения необходимой мощности).

Совершенствование системы топливоподготовки судового СОД может быть выполнена как за счет выбора оптимальных параметров в системе, так и за счет выведения из соответствующих блоков системы отдельных элементов с последующей их заменой на альтернативные, обеспечивающие поддержание заданных эксплуатационных показателей топлива и параметров в топливной системе.

Для осуществления поставленной задачи выполнялось следующее:

в I-ом блоке, была произведена только настройка температур подогрева тяжелого топлива по танкам запаса;

во II-ом блоке, была произведена настройка температур подогрева тяжелого топлива в отстойных танках тяжелого топлива, сепаратор тяжелого топлива был первоначально продублирован, а в последствии заменен установкой, обеспечивающей ультразвуковую подготовку топлива;

в III-ем блоке, была произведена настройка температур тяжелого топлива в расходной цистерне согласно выбранным пределам минимизации;

в IV-ом блока была произведена настройка давления всасывания и нагнетания бустерного насоса согласно выбранным пределам минимизации;

в V-ом блоке, была произведена настройка температур подогрева тяжелого топлива в подогревателе тяжелого топлива главного двигателя, а также давления всасывания и нагнетания циркуляционного насоса тяжелого топлива главного двигателя согласно выбранным пределам минимизации.

После перенастройки основных параметров топливной системы  $p$  и  $T$  согласно выбранным пределам минимизации, замены сепаратора топлива на ультразвуковую установку были сняты параметры системы топливоподготовки в реальном времени на постоянной нагрузке ГД и произведен расчет энергозатрат топливной системы.

В результате расчета энергетических затрат на топливоподготовку тяжелого топлива RMG 380 в системе топливоподготовки, использующей вместо сепарации ультразвуковую обработку были получены следующие

результаты: I блок –  $\Sigma W_I = 18,3$  кВт; II блок –  $\Sigma W_{II} = 6,4$  кВт; III блок –  $\Sigma W_{III} = 2,86$  кВт; IV блок –  $\Sigma W_{IV} = 0,68$  кВт; V блок –  $\Sigma W_V = 3,64$  кВт; VI блок –  $\Sigma W_{VI} = 6,68$  кВт;  $\Sigma W_{I-VI} = 38,56$  кВт (1,12 % от мощности главного двигателя).

Суммарное снижение энергетических затрат на топливоподготовку всей топливной системы при использовании ультразвуковой обработки топлива вместо процесса его сепарации для тяжелого топлива RMG 380 составляет 20,76 кВт (35,0 % от базового значения необходимой мощности).

Обобщенные диаграммы энергетических затрат в разных блоках на подготовку тяжелого топлива RMG 380 до регулировки основных параметров топливной системы, зависимость минимальных энергетических затрат на подготовку дизельного топлива DMA и зависимость энергетических затрат после регулировки основных параметров топливной системы и использования ультразвуковой обработки топлива показаны на рис. 5.1.

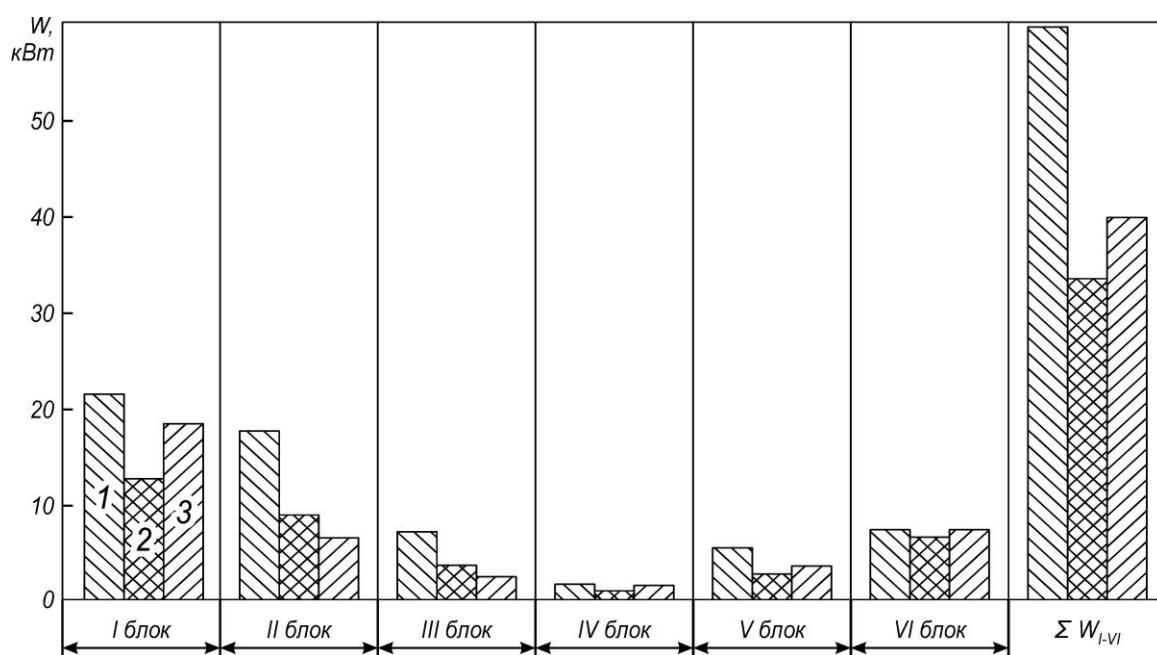


Рис. 5.1. Зависимость энергетических затрат в судовой системе топливоподготовки: 1– тяжелое топливо RMG 380; 2 – дизельное топливо DMA; 3– тяжелое топливо RMG 380 при использовании ультразвуковой подготовки вместо сепарации топлива

Отметим, что при использовании ультразвуковой обработки тяжелого топлива вместо его сепарации суммарные энергетические затраты становятся сопоставимыми с энергетическими затратами, требуемыми на подготовку дизельного топлива.

## 5.2. Разработка модульных схем построения судовых систем топливоподготовки

В настоящее время существует тенденция изготовления судового оборудования в виде модулей [151]. Примером такого модуля подготовки топлива служит система Fuel Completed System (FCS) фирмы «Alfa Laval» (Швеция), приведенная на рис. 5.2. Система создана с учетом многолетнего опыта в области изготовления модульных установок предварительной обработки и смешивания топлива [152]. Основной функцией системы является обеспечение надежности подготовки тяжелого топлива от приемного танка и до двигателей. Система обеспечивает подачу топлива с учетом необходимого расхода, давления и вязкости. Модули данной системы отличаются по своему целевому назначению, а также по способу преобразования энергии.

Модуль очистки обеспечивает требуемый структурный состав топлива и используется как в комплексе с другими модулями подготовки системы, так и для автономного режима работы. В последнем случае происходит «внутренняя» циркуляция топлива, в результате которой достигается требуемое качество его очистки. Данный модуль подготовки топлива является самым энергоемким, поскольку включает в свой состав такие элементы, как отстойно-расходные цистерны, топливо перекачивающие насосы, топливные подогреватели и топливные сепараторы. При этом само

топливо, находясь в данном модуле, имеет наихудшие во всем своем «жизненном» цикле характеристики – высокую вязкость, механические примеси, шламовые включения. Именно в этом модуле происходит максимальный подвод тепловой энергии от внешних источников (паровых или электрических подогревателей) к топливу и качественное изменение его структуры. Температура топлива в этом модуле изменяется от 20...30°С до 90...100 °С, вязкость от 750 сСт (для сверх тяжелых топлив) до 20...50 сСт, содержание механических примесей снижается до минимального значения, из топлива практически полностью выводится вода.

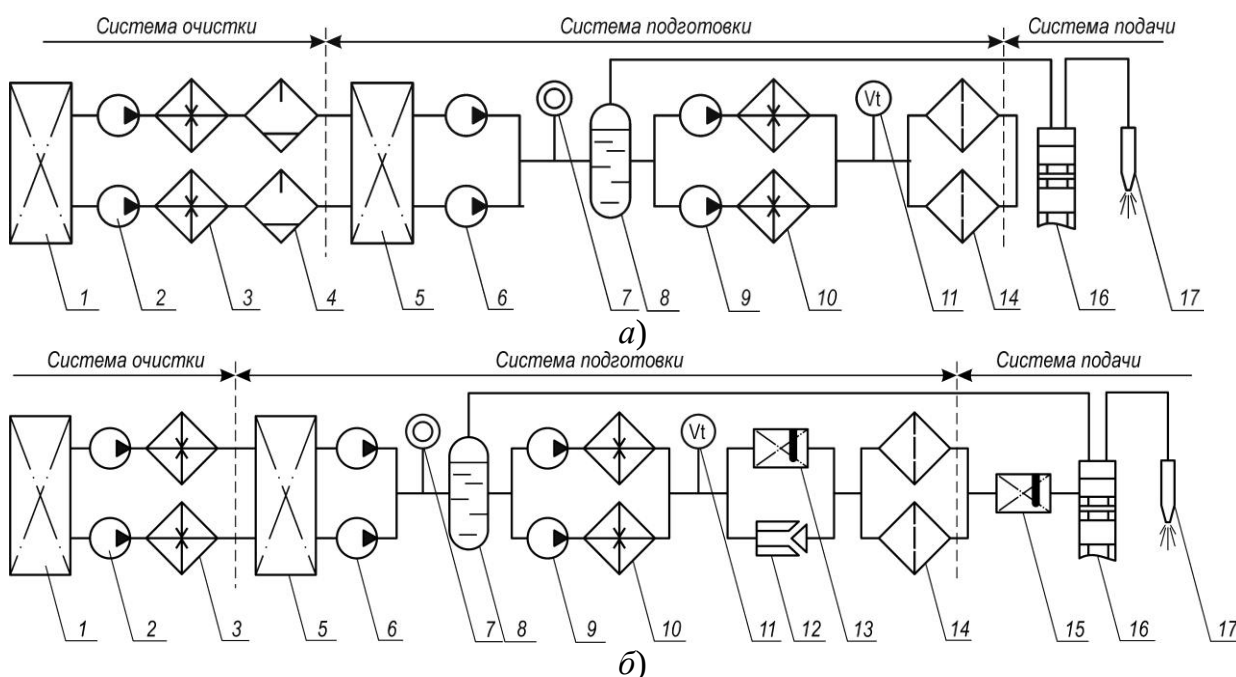


Рис. 5.2. Модульная схема построения топливной системы подготовки топлива: а) стандартная; б) при использовании ультразвуковой обработки и гидродинамической активации топлива:

- 1 – отстойно-расходные цистерны; 2 – топливо перекачивающие насосы;
- 3 – подогреватели топлива 1-ой ступени; 4 – сепараторы топлива; 5 – расходная цистерна; 6 – топливо подкачивающие насосы; 7 – расходомер; 8 – деаэрационный резервуар; 9 – циркуляционные насосы; 10 – подогреватели топлива 2-ой ступени;
- 11 – датчик вязкости; 12 – гидродинамический активатор топлива;
- 13 – ультразвуковая установка 1-ой ступени; 14 – автоматический фильтр;
- 15 – ультразвуковая установка 2-ой ступени; 16 – ТНВД; 17 – форсунка

Второй модуль (система подготовки) обеспечивает окончательную подготовку топлива перед его непосредственной подачей в цилиндр дизеля. Основными составляющими данного модуля являются топливо подкачивающие и циркуляционные насосы, подогреватели топлива 2-ой ступени, фильтрационные установки, автоматические устройства, обеспечивающие контроль сплошности потока и регулирование вязкости топлива. В данный модуль также входит бустерная установка, с помощью которой поддерживается требуемое давление в системе, а также деаэрационные и дегазационные резервуары, очищающие топливо от воздушных и газовых примесей. Топливо в этот модуль поступает в предварительно подогретом состоянии, что снижает затраты энергии на его подготовку.

Данные два модуля составляют основу подсистемы низкого давления. Работа данных модулей должна обеспечить требуемые эксплуатационные параметры топлива – отсутствие в нем механических примесей, размер которых превышает зазор в прецезионных парах топливной аппаратуры высокого давления.

Третий модуль представляет собой топливную систему высокого давления и обеспечивает подачу топлива в цилиндр дизеля. Энергия в данном модуле производится самим дизелем и передается топливу через кинематическую схему коленчатый вал – распределительный вал – толкатель ТНВД. Энергоемкость данного процесса относится к механическим потерям дизеля и может достигать 5...7% его мощности. В конечном счете, в данном модуле за счет химической реакции окисления топлива кислородом воздуха потенциальная энергия топлива превращается в тепловую энергию газов и, в следствие, в полезную работу поршня дизеля.

В результате проведенных в исследований предлагается перекомпоновка модулей подготовки топлива. При этом основной акцент направляется на использование ультразвуковой обработки топлива с

возможным отказом от процесса сепарации топлива, который не только относится к одному из самых энергоемких, но и снижает теплотворную способность топлива (за счет отвода в шлам горючих составляющих). Измененная система топливоподготовки показана на рис. 5.2, б. при этом в данной схеме отсутствует узел сепарации топлива в системе очистки, а система подготовки дополнительно укомплектована блоками ультразвуковой подготовки 1-ой и 2-ой ступени, целесообразность использование которых была показана в п. 4.7. Кроме того, блок ультразвуковой подготовки 1-ой ступени предусматривает как непосредственно использование процесса ультразвуковой кавитации, осуществляемом с помощью генератора 13, так и гидродинамическую активацию, выполняемую в активаторе 12.

В процессе своего «жизненного цикла» от приемных цистерн до сгорания в цилиндре дизеля, топливо последовательно проходит целый ряд технологических процессов, позволяющих реализовать все основные функции топливной системы. Структурная схема такой системы показана на рис. 5.3.

Процесс очистки топлива обеспечивается за счет его гравитационного отстаивания, грубой и тонкой фильтрации, а также сепарации.



Рис. 5.3. Последовательность протекания технологических процессов в топливной системе судового СОД

Стабилизация вязкости осуществляется за счет подогрева топлива, а ее контроль и регулирование выполняется с помощью автоматической системы регулирования топливосжигания.

Данные технологические процессы осуществляются в модулях очистки и подготовки топлива (см. рис. 5.2).

Сжатие топлива в ТНВД и впрыск через распылитель форсунки происходит с помощью топливной аппаратуры высокого давления, при этом необходима синхронизация с ходом поршня с учетом угла поворота коленчатого вала и угла между последовательными вспышками в цилиндре, а также формирование закона подачи топлива.

Параллельно с подачей топлива в цилиндр происходят триботехнические процессы в топливной аппаратуре высокого давления, которые непосредственно влияют на качество распыливания и дальнейшего воспламенения топлива. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре высокого давления (в модуле подачи топлива) возможно за счет улучшения качества ее изготовления, а также за счет интенсификации процессов в модулях очистки и подготовки.

Комплектация и работа современных топливных систем судовых МОД происходит в строгом согласовании технологических процессов и рабочих характеристик всех составляющих их модулей.

### 5.3. Разработка вариантов перекомпоновки судовых систем топливоподготовки

Процесс подготовки топлива и поддержания его эксплуатационных характеристик в заданных пределах является энергоемким и по разным оценкам требует от 5 до 20 % эквивалентной мощности главной



энергетической установки [41, 148]. В связи с этим, внедрение в судовую практику новых методов топливоподготовки всегда рассматривается с позиции энергетической эффективности и эксэргии физических процессов, обеспечивающих улучшение эксплуатационных характеристик как топлива, так и теплового двигателя.

Понятие эксэргии теплового процесса особенно актуально для СЭУ, где (в отличие от стационарной энергетики) процессы топливоподготовки, топливоподдачи и топливоиспользования происходят в непрерывной последовательности, таким образом, представляя собой одно целостное явление. Для морского судна, совершающего автономный переход, не существует отдельных процессов транспортировки, хранения и использования энергетических ресурсов. Для главных судовых дизелей от момента поступления топлива из расходной цистерны до распылителя форсунки проходит интервал времени, равный 0,5...1 часа, а для вспомогательных дизелей, имеющих менее насыщенную систему топливоподготовки, еще меньше.

Это налагает на процесс топливоподготовки дополнительные задачи – скорость проведения и интенсивность очистки от составляющих, ухудшающих процесс использования топлива.

Решение данной задачи неоднократно осуществлялось с помощью гомогенизации топлива, причем этот процесс реализовывался как в качестве самостоятельного способа, так и в комплексе с существующими на судах вариантами подготовки топлива (отстаиванием, сепарацией, фильтрацией).

Основным элементом, обеспечивающим кавитационную обработку топлива в судовых условиях, являлся гомогенизатор, элементы которого двигаясь относительно друг друга с высокой линейной или угловой скоростью (до нескольких десятков метров в секунду) способствовали диспергированию вещества на мельчайшие микрочастицы. Гомогенизаторы за счет подвода к тяжелому топливу значительной энергии (порядка 4000

кДж/моль) обеспечивают тонкое диспергирование содержащихся в нем воды и механических примесей, поскольку глобулы воды при этом получаются меньше величины зазора в топливной аппаратуре, последняя работала нормально на очищенном топливе. Таким образом, гомогенизация, по сравнению с сепарацией, ликвидировала потери топлива при очистке и обеспечивала экологически чистую (безотходную) обработку топлива. При этом опыт эксплуатации гомогенизаторов показал, что из-за высокой прикладываемой к топливу энергии тонкое диспергирование абразивных механических примесей не обеспечивало задержание их фильтрами тонкой очистки. Это обуславливало резкое возрастание скоростей изнашивания деталей цилиндропоршневой группы. Кроме того, высокая потребляемая мощность гомогенизаторов снижала их энергетическую эффективность. Все это привело к отказу от кавитационной обработки топлива, при этом на значительное время были приостановлены исследования по ультразвуковой обработке топлива. Последние исследования [153, 154] подтвердили не только энергетическую эффективность данного метода, но и целесообразность его применения в системах топливоподготовки судовых дизелей, использующих топливо ухудшенного фракционного и структурного состава [136].

Приведенные в предыдущей главе результаты экспериментальных исследований проиллюстрировали эффективность ультразвуковой обработки топлива и возможность ее выполнения в условиях эксплуатации морского судна.

Статистические данные по составу СЭУ свидетельствуют о том, что наряду с ДВС, произведенными в последние годы, как зарубежные, так и отечественные судовые пропульсивные комплексы и их вспомогательные энергетические установки включают в свой состав большое количество двигателей, общий ресурс которых составляет 7...10 лет (при минимально запланированном заводом-изготовителем 15...25 летнем «жизненном» цикле

дизеля). Перевод ДВС подобных моделей на использование тяжелых сортов топлива вынудил к решению дилеммы: либо перекомплектация топливной системы высокого давления новой топливной аппаратурой, обеспечивающей надежную работу на таких сортах топлива, либо применение дополнительной обработки топлива, способствующей улучшению его структурных показателей и качества распыливания, воспламенения и сгорания.

Решение задачи по первому варианту сопряжено с изменением конструктивных характеристик дизеля и в любом случае невозможно без проведения дополнительных испытаний на действующих дизелях. Второй вариант решения поставленной задачи требует предварительных научных исследований или синтеза ранее полученных результатов и дооборудования штатных систем топливоподготовки дополнительными функциональными узлами.

Одним из способов его осуществления является использование ультразвуковой обработки топлива, вариант модернизированной системы топливоподготовки судового дизеля 6VDS18 и технология проведения эксперимента приведены на рис. 5.3.

В предлагаемой схеме топливоподготовки одновременно решались две задачи: улучшение качества предварительной подготовки топлива за счет воздействия на него ультразвуковыми колебаниями и снижение энергетических затрат в системе за счет замены энергоемкого метода центробежной сепарации на ультразвуковую обработку. Кроме того, ультразвуковая обработка топлива выполнялась дважды, причем второй раз – непосредственно перед впрыском топлива в цилиндр дизеля. Схема переоборудованной топливной системы показана на рис. 5.4 [155].

Из отстойной цистерны 1 топливо подается насосом 2 в топливную магистраль, где последовательно проходит расходную цистерну 3 с встроенным паровым подогревателем, ультразвуковой генератор 1-ой ступени 4, фильтр тонкой очистки 5, электрический подогреватель 6,

регулятор вязкости 7, ультразвуковой генератор 2-ой ступени 8 и посредством топливного насоса высокого давления 9 и форсунки впрыскивается в камеру сгорания дизеля 10.

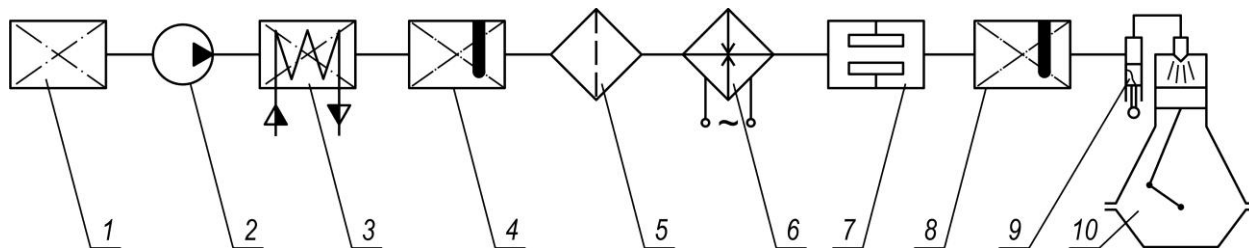


Рис. 5.4. Схема переоборудованной топливной системы:

1 – отстойная цистерна; 2 – топливный насос; 3 – расходная цистерна;  
4 – ультразвуковой генератор 1-ой ступени; 5 – фильтр тонкой очистки;  
6 – электрический подогреватель; 7 – регулятор вязкости; 8 – ультразвуковой генератор 2-ой ступени; 9 – топливный насос высокого давления; 10 – дизель

Ультразвуковая обработка топлива выполнялась на частоте 24 кГц как в первой, так и во второй ступенях ультразвукового генератора. Данное значение было определено в качестве оптимального на основе анализа подобных исследований, а также предшествующих экспериментов [134, 156]. Расположение фильтра тонкой очистки 5 после ультразвукового генератора 1-ой ступени способствовало отсеvu механических примесей из топливного потока. Дополнительная обработка топлива во 2-ой ступени ультразвукового генератора непосредственно перед топливной аппаратурой дизеля способствовало максимальному использованию эффекта раздробления молекулярных цепочек топлива.

В предлагаемой схеме поток топлива подвергается воздействию экстремальных ультразвуковых кавитационных полей, при этом во всем объеме обеспечивается диспергирование топлива, а в зонах разрыва кавитационных пузырьков этот процесс происходит до молекулярного уровня.

В результате двойной кавитационной обработки топлива снижается время прохождения химических реакций, связанное с наличием в дисперсной топливной системе межфазных границ (типа твердое тело – жидкость). Обрабатываемый поток топлива доводится до ультрадисперсного состояния, а в кавитационных полостях и на их периферии – до молекулярного [122, 149].

Преимущество предлагаемой системы топливоподготовки по сравнению со штатной системы заключается в практическом отсутствии потери горючих составляющих топлива, которое происходит в центробежном сепараторе. Кроме того, сочетание фильтра тонкой очистки с генераторами кавитации обеспечивают работу системы топливоподготовки не только почти без потерь топлива, но и с очень высокой эффективностью ультразвуковой обработки, при этом повышается интенсификация процесса горения топлива и тем самым обеспечивается снижение его удельного расхода.

Как было определено ранее, кавитационные явления в жидкостях наиболее эффективно происходят в случае наличия дополнительных кавитационных зон – зародышей кавитации [120, 131, 134]. В качестве таких зон могут выступать пузырьки воздуха, паров топлива или размельченные частички механических примесей.

В рассматриваемой схеме топливоподготовки ультразвуковой генератор 1-ой ступени не только способствует разрыву молекулярных цепочек топлива, но и приводит к дроблению механических примесей. Таким образом увеличивается количество кавитационных зон для ультразвукового генератора 2-ой ступени. Это способствует повышению эффективности процесса топливоподготовки с одновременным снижением энергетических затрат на ее проведение.

В системе была предусмотрена возможность переключения на штатный режим топливоподготовки. В этом случае топливо подвергалось очистке в центробежном сепараторе без использования ультразвуковых генераторов.

По такой же схеме работал другой подобный дизель, входящий в состав вспомогательной энергетической установки. Кроме того, параллельные эксперименты на одинаковых дизелях с разными системами топливоподготовки позволяли сделать соответствующие выводы о ее эффективности.

Для максимальной идентичности результатов эксперимента как сами дизели, задействованные в эксперименте, так и их топливные системы подвергались предварительной подготовке. Условия эксплуатации позволяли произвести замену фильтров тонкой очистки обоих дизелей, замену и отладку топливной аппаратуры высокого давления, а также выполнить моточистку дизелей с заменой комплекта поршневых колец и технического освидетельствования цилиндровых втулок. На протяжении всего эксперимента дизели работали на постоянном сорте топлива и циркуляционного масла. Кроме того, дизели работали либо параллельно, либо по отдельности, но с постоянным контролем времени эксплуатации и эксплуатационной нагрузки, разница в которой не превышала 10 кВт для каждого дизеля, что с учетом их эксплуатационной мощности 320...350 кВт не превышало 3 %. Это, учитывая энергоемкость объектов, а также длительность проведения эксперимента, позволяло считать условия работы дизелей идентичными.

Задачей исследования было определение износа верхнего поршневого кольца для дизеля, работу которого обеспечивала штатная система топливоподготовки, и дизеля, работающего на топливе, прошедшем двухступенчатую ультразвуковую обработку. Кроме того, для обоих случаев определялись удельный расход топлива и температура выпускных газов, как параметры, характеризующие качество процесса сгорания. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

## Результаты эксперимента

| Параметр                                                  | Величина                            |                                                                          |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                                                           | Стандартная схема топливоподготовки | Схема с использованием двухступенчатой ультразвуковой подготовки топлива |
| Износ верхнего поршневого кольца, г/(1000 ч)              | 2,14±0,04                           | 0,63±0,03                                                                |
| Удельный эффективный расход топлива, кг/(кВт·ч)           | 0,206...0,214                       | 0,199...0,207                                                            |
| Температура уходящих газов, °С                            | 405...430                           | 385...390                                                                |
| Концентрация SO <sub>x</sub> в выпускных газах кг/(кВт·ч) | 26,1...35,7                         | 12,4...13,2                                                              |

Приведенные результаты свидетельствуют об эффективности применения предлагаемого метода двухступенчатой ультразвуковой обработки топлива. В данном случае снижается износ верхнего поршневого кольца (на 70,5 %), что объясняется уменьшением его сернистой коррозии, а также на 3,3...4,4 % понижается удельный эффективный расход топлива (рис. 5.5) и температура уходящих газов, что характерно для более качественного процесса сгорания топлива. Кроме того, применение двухступенчатой обработки топлива способствует существенному улучшению экологических показателей работы дизеля, в частности приводит к снижению концентрации оксидов серы SO<sub>x</sub> в выпускных газах (рис. 5.6).

Кроме того, при проведении эксперимента было выполнено сравнения полученных результатов с аналогичными, выполненными на дизеле S6A2, система топливоподготовки которого включала одноступенчатый модуль ультразвуковой обработки топлива. Учитывая различия в энергетических показателях дизелей, а также условиях топливоподготовки, полученные значения приведены в процентном соотношении (рис. 5.7).

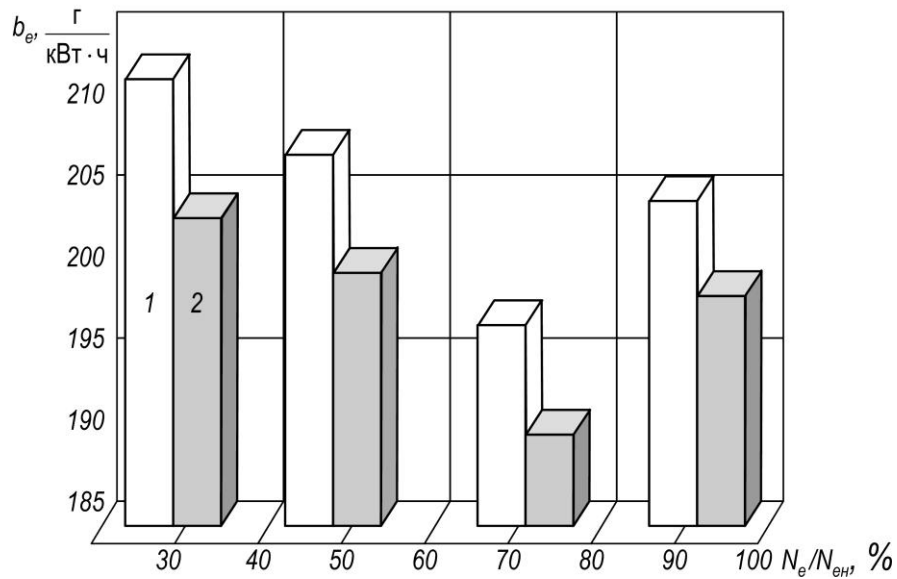


Рис. 5.5. Зависимость удельного эффективного расхода топлива от относительной мощности судового дизеля 6VDS18:

1 – работа на топливе без дополнительной обработки;

2 – работа на топливе, прошедшем двухступенчатую ультразвуковую обработку

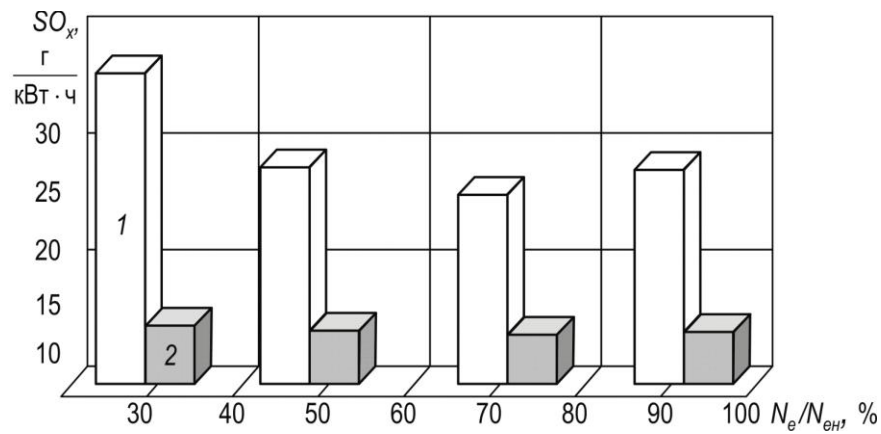


Рис. 5.6. Зависимость концентрации оксидов серы  $SO_x$  в выпускных газах от относительной мощности судового дизеля 6VDS18:

1 – работа на топливе без дополнительной обработки;

2 – работа на топливе, прошедшем двухступенчатую ультразвуковую обработку



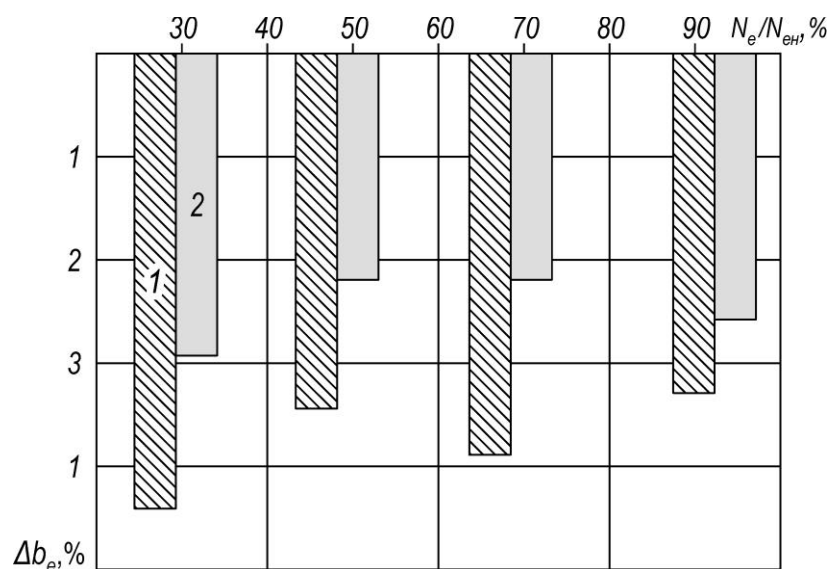


Рис. 5.7. Снижение удельного эффективного расхода топлива при проведении двухступенчатой (1) и одноступенчатой (2) ультразвуковой обработки топлива

#### 5.4. Применение в системе топливоподготовке гидродинамических активаторов топлива

Вариантом совершенствования систем топливоподготовки судовых СОД может считаться способ дополнительной гидродинамической активации топлива [157], целью которого является уменьшение энергетических затрат на измельчение сернистых примесей в топливе и придание таким образом топливу большей дисперсности и однородности.

Как определено в разделе 1 диссертационного исследования, удаление подобных примесей в судовых системах подготовки топлива производится с помощью сепараторов и фильтров, однако данные методы обеспечивают требуемое качество топлива лишь на определенных участках, а перенасыщение ими судовых систем приводит к повышению затрат энергии. В связи с этим, эффективным представляется способ, позволяющий с

помощью кавитационного воздействия размельчать сернистые примеси и тем самым активировать их к дальнейшему ультразвуковому воздействию и выводу из топлива в составе газовой фазы. Сущность метода такова.

Гидродинамический активатор (рис. 5.8, *а*) содержит разъемный корпус, в первой половине 1 которого находятся четыре параллельно включенных цилиндрических сопла 3, располагающихся под углом  $45^\circ$  относительно второй половины корпуса 2. Одним из вариантов его установки может быть принят участок топливной магистрали судового дизеля после вспомогательного топливоподкачивающего насоса. Топливо из расходной цистерны 4 (рис. 5.8, *б*) под давлением, создаваемым топливоподкачивающим насосом 5, поступает через гидродинамический активатор 6 к топливному насосу высокого давления дизеля. Топливо в гидродинамическом активаторе 6 выходит из сопел с такой скоростью, что при ударе о рабочую поверхность корпуса, находящегося под углом  $45^\circ$  к направлению потока, происходит разрушение механических составляющих и сернистых примесей топлива с одновременным увеличением его дисперсности. Силовое воздействие на поток топлива регулируется путем изменения давления насоса 5.

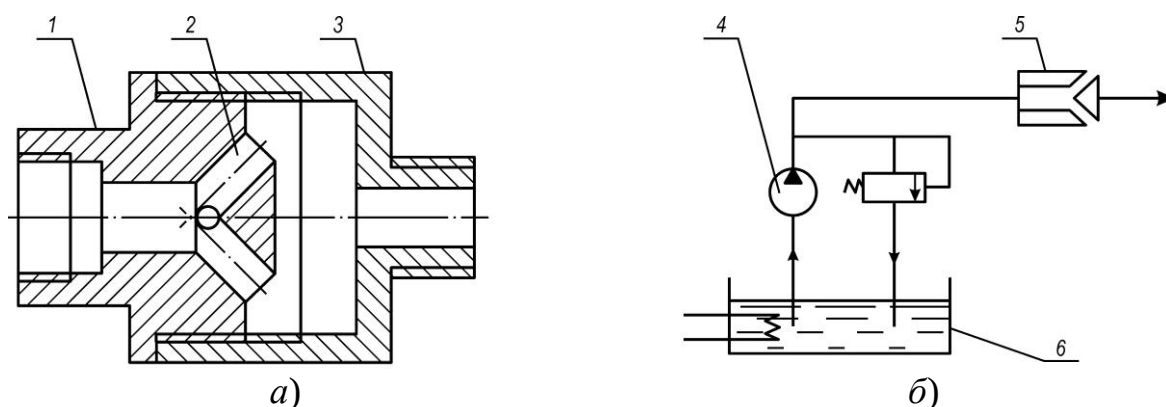


Рис. 5.8. Принципиальная схема устройства (*а*) и включения в судовую систему топливоподготовки (*б*) гидродинамического активатора топлива:  
1, 3—корпус; 2 — цилиндрические сопла; 4 — топливоподкачивающий насос;  
5 — гидродинамический активатор; 6 — расходная цистерна

Способ кавитационного воздействия с целью разрушения C–S связей, активации и дальнейшего высвобождения в составе газовой фазы сернистых примесей заключается в следующем:

- подача топлива, содержащего механические и сернистые примеси, к цилиндрическим соплам;
- сообщение твердым частицам при их прохождении через сопла необходимой кинетической энергии;
- генерирование сдвиговой волны в твердых частицах за счет ударного взаимодействия с рабочей поверхностью, повернутой под углом  $45^\circ$ ;
- разрушение C–S связей в топливе и подача топлива в следующий блок системы топливоподготовки в модуль ультразвуковой обработки).

Возможность осуществления предлагаемого способа улучшения дисперсного состояния и эксплуатационных свойств топлива основывается на том, что разрушение C–S связей в топливе осуществляется касательными усилиями, генерируемыми при ударном воздействии топлива с рабочей поверхностью, повернутой к потоку под углом  $45^\circ$ . При таком воздействии разрушение твердых частиц и C–S связей в топливе происходит за счет превышения прочности на сдвиг в 3...10 раз меньше, чем прочность на разрыв. Таким образом, установив энергию удара выше энергии связи, представляется возможным освободить молекулы топлива от посторонних C–S связей и тем самым активировать молекулы сернистых примесей к возможной дальнейшей обработке в поле ультразвуковых волн [40].

### 5.5. Оценка конструктивного коэффициента энергетической эффективности при совершенствовании топливной системы судового СОД

Международной морской организацией в докладе Комитета по защите морской среды МЕРС66/21 отмечено, что «...качество жидкого топлива оказывает влияние на безопасность судоходства и является важным фактором для охраны морской среды, включая контроль выбросов и энергоэффективность...».

Учитывая это, вопросы совершенствования систем топливоподготовки необходимо решать в соответствии с резолюциями ИМО, относящимися к правилам энергетической эффективности судна, в частности составления индивидуального Плана управления энергоэффективностью судна (ПУЭС) и определения достижимого конструктивного коэффициента энергоэффективности. Его значение не должно превышать требования, которые установлены Резолюцией МЕРС.203(62).

К основным элементам ПУЭС относятся: оптимизация скорости судна для обеспечения прихода «точно в срок»; проводка судна наивыгоднейшим путём в зависимости от погоды; оптимальные сроки докования; выбор оптимального соотношения частоты вращения главного двигателя и шага гребного винта; обеспечение оптимального дифферента судна при движении как в грузу, так и порожнём, а также надлежащее планирование количества балласта; использование современных авторулевых и их правильная настройка; повышение эффективности двигателей за счёт присадок к топливу, применения новых видов топлива, корректировки расхода смазочного масла, мониторинга рабочих процессов [158].

Значение ККЭЭ может быть оценено по выражению:

$$KKЭЭ = \frac{P_{ME} \cdot C_{F ME} \cdot SFC_{ME} + P_{AE} \cdot C_{F AE} \cdot SFC_{AE}}{v_{ref} \cdot DW},$$

где  $P_{ME}$  – нагрузка на главный двигатель, кВт,  $P_{ME}$  равна 75% номинальной установленной мощности (MCR) главного двигателя;

$C_F$  – безразмерный коэффициент преобразования расхода топлива, измеряемого в граммах, в выбросы  $CO_2$ , также измеряемые в граммах содержащегося в них углерода;  $C_{F ME}$ ,  $C_{F AE}$  – для главного и вспомогательных двигателей соответственно, (т  $CO_2$ /т топлива);

$SFC_{ME}$  – удельный эффективный расход топлива для главного двигателя, г/(кВт·ч);

$P_{AE}$  – требуемая мощность вспомогательных двигателей для питания обычной максимальной нагрузки в море, включая мощность, необходимую для гребных механизмов/систем и жилых помещений, в том числе для насосов главного двигателя, навигационных систем и оборудования и для удовлетворения потребностей пассажиров и экипажа, но исключая мощность, не используемую для гребных механизмов/систем, например, мощность, потребляемую подруливающими устройствами, грузовыми насосами, погрузочно-разгрузочными устройствами, балластными насосами, системами содержания груза, например, холодильными установками и вентиляторами грузовых трюмов, в ситуации, когда судно выполняет рейс со скоростью  $v_{ref}$ ;

значение  $P_{AE}$  определяется из выражения, кВт

$$P_{AE} = 0,025MCR_{ME} + 250;$$

где  $MCR_{ME}$  – номинальная установленная мощность главного двигателя, кВт;

$SFC_{AE}$  – удельный эффективный расход топлива для вспомогательного двигателя, г/(кВт·ч);

$v_{ref}$  – скорость хода судна, узлы;

$DW$  – дедвейт судна, тонны.

Определения ККЭЭ выполним для двух вариантов: для условий эксплуатации СЭУ с топливной системой, работающей в варианте обычной комплектации, и для варианта использования двухступенчатой ультразвуковой подготовки топлива. В первом случае работа главного двигателя осуществляется на тяжелом топливе, вспомогательного – на дизельном. При этом коэффициенты  $C_{F ME}$  и  $C_{F AE}$  согласно рекомендациям Резолюции ИМО МЕРС.245(66) принимаются:

$C_F=3,206$  (тонн  $CO_2$ /тонну топлива) – для дизельного топлива с содержанием углерода 0,8744;

$C_F=3,114$  (тонн  $CO_2$ /тонну топлива) – для дизельного топлива с содержанием углерода 0,8744.

Остальные данные принимаются следующими:

$$MCR_{ME} = 3400 \text{ кВт};$$

$$SFC_{ME} = 195 \text{ г/(кВт·ч)};$$

$SFC_{AE-1} = 206 \text{ г/(кВт·ч)}$  – при эксплуатации СЭУ с топливной системой, работающей в варианте обычной комплектации;

$SFC_{AE-2} = 198 \text{ г/(кВт·ч)}$  – при эксплуатации СЭУ с топливной системой, использующей двухступенчатую ультразвуковую подготовку топлива;

$$v_{ref}=15,3 \text{ узла};$$

$$DW = 7650 \text{ тонн.}$$

Согласно приведенных выше выражений получим:

$$P_{ME}=0,75 \cdot 3400 = 2550 \text{ кВт};$$

$$P_{AE} = 0,025 \cdot 3400 + 250 = 335 \text{ кВт};$$

Конструктивный коэффициент энергетической эффективности при эксплуатации СЭУ с топливной системой, работающей в варианте обычной комплектации

$$KKЭЭ_1 = \frac{2550 \cdot 3,114 \cdot 195 + 335 \cdot 3,206 \cdot 206}{15,2 \cdot 7650} = 15,219 \frac{\text{гСО}_2}{\text{т}} \text{мор.миллю.}$$

Конструктивный коэффициент энергетической эффективности при эксплуатации СЭУ с топливной системой, использующей двухступенчатую ультразвуковую подготовку топлива

$$KKЭЭ_2 = \frac{2550 \cdot 3,114 \cdot 195 + 335 \cdot 3,114 \cdot 198}{15,2 \cdot 7650} = 15,093 \frac{\text{гСО}_2}{\text{т}} \text{мор.миллю.}$$

Требуемый ККЭЭ определяется для каждого нового судна, а также для существующего судна, подвергшегося значительному переоборудованию. Его значение определяется как

$$\text{Требуемый ККЭЭ} = \left(1 - \frac{X}{100}\right) \cdot \text{величина базовой линии},$$

где  $X$  – редуционный коэффициент, принимаемый в зависимости от типа и дедвейта судна, а также от этапа внедрения плана энергоэффективности судна. Для судов, предназначенных для перевозки генеральных грузов с дедвейтом 3000...15000 тонн на этапе с 1 января 2015 г. по 31 декабря 2019 г. принимается  $X = 0...10$  % (нижнее значение редуционного коэффициента применяется к судам меньших размеров).

Величина базовой линии рассчитываются следующим образом:

$$\text{величина базовой линии} = a \cdot b^{-c};$$

где  $a, c$  – параметры, зависящие от назначения судна;

$b$  – дедвейт судна, тонны.

Для судна, предназначенного для перевозки генеральных грузов, согласно рекомендациям ИМО, изложенным в Резолюции МЕРС.203(62)

$$a = 107,48; c = 0,216.$$

Тогда

$$\text{величина базовой линии} = 107,48 \cdot 7650^{-0,216} = 15,576.$$

Приняв  $X = 3$ , получим

$$\text{Требуемый ККЭЭ} = \left(1 - \frac{3}{100}\right) \cdot 15,576 = 15,109 \frac{\text{гСО}_2}{\text{т}} \text{ мор.миллю.}$$

Приведенные расчеты демонстрируют снижение ККЭЭ для случая эксплуатации СЭУ с использованием системы топливоподготовки с ультразвуковой обработкой топлива и подтверждают целесообразность создания подобных систем.

## 5.6. Выводы по разделу 5

В результате исследований, проведенных в разделе 5, сделаем следующие выводы.

1. Улучшение качества предварительной подготовки топлива может быть достигнуто за счет воздействия на него ультразвуковыми колебаниями, при этом снижение энергетических затрат в системе обеспечивается за счет замены энергоемкого метода центробежной сепарации на ультразвуковую обработку. В этом случае энергетические затраты на процесс подготовки тяжелого топлива с вязкостью до  $380 \text{ мм}^2/\text{с}$  уменьшаются на 32...35 % и становятся сопоставимы с энергетическими затратами на подготовку дизельного топлива с вязкостью  $5...8 \text{ мм}^2/\text{с}$ .

2. Разработанная система топливоподготовки судовых среднеоборотных дизелей, дополнительно включающая в свой состав узлы ультразвуковой



воздействия и гидродинамической активации топлива, может производить как одно-, так и двухступенчатую обработку топлива. При этом компоновка системы возможна с использованием как только ультразвукового, так и комплексного (гидродинамическая активация и ультразвуковая обработка) модуля топливopодготовки.

3. Использование тяжелого топлива, прошедшего дополнительную ультразвуковую обработку, приводит к снижению на 2,1...4,3 % его удельного эффективного расхода (в зависимости от режима работы дизеля).

4. Разработанная система топливopодготовки судовых СОД, дополнительно включающая в свой состав узлы, обеспечивающие ультразвуковую кавитационную обработку и гидродинамическую активацию высоковязкого топлива (позволяющие выполнять как одно-, так и двухступенчатую обработку топлива) до 3,9% снижает удельный расход топлива и до 2,7 раза снижает концентрацию  $SO_x$  в выпускных газах, что существенно улучшает экологические показатели работы дизеля.

5. Использование модуля ультразвуковой обработки топлива в системе топливopодготовки судового СОД способствует снижению конструктивного коэффициента энергетической эффективности судна (с 15,219 г $CO_2$ /т·ММ до 15,093 г $CO_2$ /т·ММ), что особенно актуально в связи с необходимостью выполнения требований соответствующих резолюций ИМО.

6. Разработанный метод совершенствования систем топливopодготовки судовых СОД является примером внедрения нанотехнологий в судовой энергетике.

## ВЫВОДЫ

Диссертационное исследование направлено на решение научно-прикладной задачи – повышению экологической эффективности и сохранению работоспособности судовых среднеоборотных дизелей путем совершенствования их систем топливоподготовки.

Среднеоборотные дизели входят в состав всех СЭУ. Важную роль в комплексе преобразования потенциальной энергии топлива в эффективную мощность дизеля выполняет система топливоподготовки, эффективность работы которой определяется изменением структурных характеристик и эксплуатационных свойств топлива до и после процесса его обработки. Наибольшие энергетические затраты в системе топливоподготовке связаны с удалением из топлива различных примесей, в том числе сернистых. Одним из способов повышения экологической эффективности СЭУ в целом и системы топливоподготовки в частности является эффективная десульфуризация топлива, которую предлагается выполнять с помощью ультразвуковой обработки топлива. Использование ультразвука в судовых системах топливоподготовки применялось, как правило, для создания топливных смесей и водотопливных эмульсий, а единичные работы по исследованию ультразвукового воздействия на структурные компоненты топлива не определяли оптимальных с точки зрения энергетических затрат и удаления сернистых примесей частот и режимов работы такого оборудования.

Главным научным результатом диссертационной работы является разработка способа десульфуризации топлива в судовых условиях, обеспечивающего снижение коррозионного износа ЦПГ и уменьшение концентрации  $SO_x$  в выпускных газах судового СОД при его работе на высокосернистых топливах.

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования.

1. Показателем, комплексно характеризующим эксплуатационные характеристики топлива и влияющим на энергетические параметры и технические характеристики судового СОД, является содержание сернистых примесей в топливе.

2. Определено, что оптимальным способом десульфуризации топлива в условиях морского судна является его ультразвуковая обработка, проведение которой необходимо выполнять в малоподвижном объеме топлива для чего наиболее подходит расходная топливная цистерна.

3. Экспериментально установлено, что процесс десульфуризации топлива с помощью ультразвуковой обработки сопровождается выделением сульфида водорода  $H_2S$  в составе газовой фазы, образующейся над поверхностью топлива. Концентрация  $H_2S$  в составе газовой фазы для топлива с исходным содержанием сернистых примесей до 3,5% не превышает  $0,04 \text{ мг/м}^3$ , что позволяет применять блок ультразвуковой обработки топлива в составе судовых систем топливоподготовки.

4. Обеспечение энергетической эффективности ультразвуковой обработки топлива достигается на частотах ультразвукового сигнала  $\nu_{уз}$  соответствующих экстремуму кривых  $S = f(\nu_{уз})$  и  $C_{H_2S} = f(\nu_{уз})$ , где  $S$  – концентрация сернистых примесей в топливе,  $C_{H_2S}$  – концентрация сульфида водорода над поверхностью топлива. Значение этой частоты при обработке топлив с вязкостью до  $380 \text{ мм}^2/\text{с}$  и содержанием сернистых примесей до 3,5% лежит в пределах 22...26 кГц при амплитуде ультразвуковой волны 0,36...0,68 мкм и определяется экспериментально.

5. При отношении мощности ультразвукового генератора  $N_{узГ}$  к объему расходной цистерны  $V_{рас}$  в пределах  $N_{узГ}/V_{рас} = 0,55...2,78 \text{ кВт/м}^3$  происходит снижение концентрации серосодержащих компонентов топлива в 1,15...1,35

раза, что совместно с интенсификацией процесса ультразвуковой обработки путем принудительной подачи воздуха в объем обрабатываемого топлива приводит к 3,2...3,5 кратному снижению коррозионного износа деталей судового СОД и к 2,2...2,8 кратного уменьшения концентрации  $SO_x$  в выпускных газах.

6. Усовершенствованный метод ультразвуковой обработки топлива позволяет определить оптимальное время этого процесса как синергетическое решение зависимостей  $S = f(t) \cap C_{H_2S} = f(t)$ .

7. Разработана система топливоподготовки судовых СОД, дополнительно включающая в свой состав узлы ультразвукового воздействия и гидродинамической активации топлива, которые могут производить как одно-, так и двухступенчатую обработку топлива. что до 3,9% снижает удельный расход топлива и в 2,7 раза снижает концентрацию  $SO_x$  в выпускных газах.

8. Приведенные в диссертации теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные научные результаты имеют существенное практическое значение. Дооборудование системы подготовки топлива дополнительным блоком, выполняющим его ультразвуковую обработку (на т/х «Ocean Voyager»), использование в судовой топливной системе низкого давления дополнительной системы ультразвуковой подготовки топлива (на т/х «SOCOL-6», внедрение системы ультразвуковой обработки и гидродинамической активации тяжелого топлива, а также двухступенчатого модуля ультразвуковой подготовки топлива (на судах, обслуживаемых производственной фирмой «Судоремонт») способствуют снижению сернистого износа поршневых колец и цилиндрических втулок дизеля до 2,3...3,7 раза; в 2,3...2,7 раза снижают содержание оксидов серы в выпускных газах дизеля, а также приводят к улучшению на 3,5...4,8 % экономических и 7,3...9,6 % энергетических показателей работы судовых

СОД в широком диапазоне эксплуатационных режимов, способствуют улучшению технического состояния цилиндропоршневой группы дизеля и его газовыпускной системы и на 35...40 % снижают трудоемкость работ по проведению моточистки дизеля.

Разработанный метод совершенствования систем топливоподготовки судовых СОД является примером внедрения современных технологий в судовой энергетике, а возможность его использования подтверждена авторским свидетельством.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сизых В. А. Судовые энергетические установки / В.А. Сизых. – М.: РКонсульт, 2002. – 264 с.
2. Васькевич Ф. А. Двигатели внутреннего сгорания. Теория, эксплуатация, обслуживание / Ф. А. Васькевич. – Новороссийск, МГА, 2009. – 266 с.
3. Конкс Г. А. Мировое судовое дизелестроение.: концепции конструирования, анализ международного опыта / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. – М. : Машиностроение, 2005. – 512 с.
4. Сорокин В. А. Производство современных среднеоборотных судовых дизелей / В. А. Сорокин // Двигателестроение. – 2013. – № 3. – С. 3-8.
5. Мельник Г. В. Развитие двигателестроения за рубежом (по материалам конгресса СИМАС 2013) / Г. В. Мельник // Двигателестроение. – 2013. – № 3. – С. 39-53.
6. Diesel Directory // Marine Propulsion Perspective in association with MER. – 2013. – № 1. – Р. 10-23.
7. Пахомов Ю. А. Судовые энергетические установки с двигателями внутреннего сгорания / Ю. А. Пахомов. – М. : ТрансЛит, 2007. – 528 с.
8. Овсянников М. К. Судовые автоматизированные энергетические установки / М. К. Овсянников, В. А. Петухов. – М. : Транспорт, 1989. – 256 с.
9. Чиняев И. А. Судовые системы / И. А. Чиняев. – М. : Транспорт, 1984. – 216 с.
10. ISO 8217 Fuel Standart : Quality Specification for Marine Bunker Fuels.
11. Топливо и топливные системы судовых дизелей / Ю. А. Пахомов, Ю. П. Коробков, Д. В. Дмитриевский. – М. : РКонсульт, 2004. – 496 с.
12. Standards guaranteed? // Marine Propulsion Perspective in association with MER. – 2007. – № 1. – Р. 12-16.

13. Contamination of fuel oils // Shipping world & shipbuilder. – 2004. – № 1. –Р. 16-17.
14. Солодовников В. Г. Использование в судовых дизелях топлив различного фракционного и структурного состава / В. Г. Солодовников // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2014. – № 33. – Одесса: ОНМА. – С. 110-117.
15. Эксплуатация судовых дизельных энергетических установок / С. В. Камкин, И. В. Возницкий, В. Ф. Большаков и др. – М.: Транспорт, 1996. – 432 с.
16. Судовые двигатели внутреннего сгорания: учебник для вузов/ Ю. Я. Фомин, А. И. Горбань, В. В. Добровольский, А. И. Лукин и др. – Л.: Судостроение, 1989. – 344 с.
17. Мельник Г. В. Развитие среднеоборотных дизелей / Г. В. Мельник. – Двигателестроение, № 1 (239), 2010. – С. 41–53.
18. Суворов П. С. Управление режимами работы главных судовых дизелей / П. С. Суворов. – Одесса : ЛАТСТАР, 2000. – 238 с.
19. Суворов П. С. Динамика дизеля в судовом пропульсивном комплексе / П. С. Суворов. – Одесса : ОНМА, 2004. – 304 с.
20. Обеспечение надежности судовых дизелей на эксплуатационных и особых режимах работы / М. А. Малиновский, А. А. Фока, В. И. Ролинский. – Одесса : Феникс, 2007. – 152 с.
21. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ), Книга III, пересмотренное издание – International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), Book III, revised edition. – СПб.: ЦНИИМФ, 2009. – 304 с.
22. Directive 2005/33/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005 amending Directive 1999/32/EC. – Official Journal of the European Union, 22.07.2005 EN L 191/59-69.

23. Моновян А. К. Технология переработки природных энергоносителей / А. К. Моновян. – М. : Химия, КолосС, 2004. – 456 с.
24. Технология переработки нефти / О. Ф. Глаголева, В. М. Каустин и др. – в 2 ч. – Ч. 1 : Первичная переработка нефти. – М. : КолосС, 2006. – 400 с.
25. Man's inhumanity to machines / MER, October 2010 – P. 44-45.
26. A preliminary laboratory study of the remediation of organotin-contamination sediments and water // Marine Science and Environment, 2004. – № 2. – P.3-10.
27. Шишкин В. А. Анализ неисправностей и предотвращение повреждений судовых дизелей / В. А. Шишкин. – М. : Транспорт, 1986. – 192 с.
28. Большаков В. Ф. Судовые малооборотные дизели. Топливо и цилиндрическое масло / В. Ф. Большаков, Л. Г. Гинзбург. – Л. : Судостроение, 1971. – 192 с.
29. Большаков В. Ф. Применение топлив и масел в судовых дизелях / В. Ф. Большаков, Л. Г. Гинзбург. – М. : Транспорт, 1976. – 216 с.
30. Носовский А. Н. Основы эксплуатации судовых энергетических установок / А. Н. Носовский. – Николаев : Изд-во НКИ, 2010. – 384 с.
31. Боровлев Е. М. Бункеровка судов / Е. М. Боровлев. – Одесса, Феникс, 2008. – 48 с.
32. Чулков П. В. Топлива и смазочные материалы: ассортимент, качество, применение, экономия, экология : справочное издание / П. В. Чулков. – М. : Политехника, 1996. – 304 с.
33. Le Petrol: raffinage et Genie Chimique / sous la direction de P. Wuitheir. – Paris : Editions Technip, 1972. – Vol. 1 et 2. – 1710 p.
34. Возницкий И. В. Практика использования морских топлив на судах / И. В. Возницкий. – СПб.: Изд-во ГМА, 2005. – 124 с.



35. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости : ассортимент и применение : справочник / под. ред. В. М. Школьников. – 2-е изд. – М. : Техинформ, 1999. – 596 с.

36. Шмелев В. П. Опыт исследований и эксплуатации топливной аппаратуры судовых дизелей / В. П. Шмелев, А. Л. Лемещенко, А. Е. Пилецкий. – СПб. : Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. – 348 с.

37. Агабеков В. Е. Нефть и газ : добыча, комплексная переработка и использование / В. Е. Агабеков, В. К. Косяков, В. М. Ложкин. – Минск : Изд. БГТУ, 2003. – 376 с.

38. Александров И. А. Перегонка и ректификация в нефтепереработке. – М. : Химия, 1981. – 352 с.

39. Добровольский В. В. Подготовка вязких топлив судовых малооборотных двигателей / В. В. Добровольский, С. А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 26. – Одесса: ОНМА. – С.46-54.

40. 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.

41. Ханмамедов С. А. Минимизация энергетических затрат на топливоподготовку высоковязких топлив малооборотных ДВС системы СИМАС / С. А. Ханмамедов, В. В. Добровольский, Н. Л. Добровольская // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2011. – № 28. – Одесса: ОНМА. – С.111-119.

42. Агабеков В. Е. Нефть и газ : технология и продукты переработки / В. Е. Агабеков. – Ростов н/Д : Феникс, 2014. – 458 с.

43. Солодовников В. Г. Использование топлив с повышенным содержанием серы при эксплуатации судовых среднеоборотных дизелей / В.

Г. Солодовников // Проблеми техніки: науково-виробничий журнал. – 2014. – № 2. – С. 65-71.

44. Гулин Е. И. Справочник по горюче-смазочным материалам в судовой технике / Е. И. Гулин, Д. П. Якубо. – Л.: Судостроение, 1987. – 224 с.

45. Обольницкий А. М. Топливо и смазочные материалы / А. М. Обольницкий. – М.: Высшая школа, 1982. – 342 с.

46. Чертков Я. Б. Неуглеводородные соединения в нефтепродуктах / Я.Б. Чертков. – М. : Химия, 1984. – 264 с.

47. Марков С. В. Нефтяные топлива энергетических установок морских судов / С. В. Марков, Н. Л. Троеглазова. – Новороссийск : НГМА, 2004. – 122 с.

48. Decarbonising the maritime supply chain // MER. – 2010. – № 11. – Р.8.

49. Захаров Г. В. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок / Г. В. Захаров. – М. : Транслит, 2009. – 256 с.

50. Большаков В. Ф. Эксплуатация судовых среднеоборотных дизелей / В. Ф. Большаков, Ю. Я. Фомин, В. И. Павленко. – М.: Транспорт, 1983. – 160 с.

51. Емельянов М. Д. Анализ повреждаемости главных судовых дизелей / М. Д. Емельянов. – Двигателестроение, № 3 (245), 2011. – С. 35–39.

52. Корнилов Э. В. Аварии и аварийные повреждения судовых дизелей / Э. В. Корнилов, П. В. Бойко. – Одесса: Феникс, 2010. – 272 с.

53. Shell sulphur story // MER, March 2010. – Р.26-28

54. Камкин С. В. Повышение экономичности судовых дизелей / С. В. Камкин, А. Л. Лемещенко, А. С. Пунда. – СПб.: Судостроение, 1992. – 168 с.

55. Овсянников М. К. Судовые дизельные установки : справочник / М. К. Овсянников, В. А. Петухов. – Л. : Судостроение, 1986. – 424 с.

56. Конаков Г. А. Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация флота / Г. А. Конаков, Б. В. Васильев. – М. : Транспорт, 1980. – 428 с.

57. Training still fails to keep pace with complex control systems / MER, June 2006. – P. 20-23.

58. Пучков Н. Г. О рациональной системе оценки эксплуатационных свойств топлив и масел / Н. Г. Пучков, В. Д. Резников //Химия и технология топлив и масел. – 1986, № 9. – С. 32-39.

59. Корнилов Э. В. Судовые сепараторы фирмы «Лаваль», «Мицубиси», «Вестфалия»: основы теории, эксплуатация, конструкции, ремонт / Э. В. Корнилов, П. В. Бойко. – Одесса : Студия «Негоциант», 2005. – 236 с.

60. Кротенко Г. В. Опыт эксплуатации сепарационных систем фирмы Альфа Лаваль серии S / Г. В. Кротенко, В. М. Харин // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2011. – № 28. – Одесса: ОНМА. – С.104-110.

61. Dynamic response to tougher environ regime / MER. – 2011. – № 5. – P. 22-31.

62. Separating factors / MER. – 2006. – № 9. – P. 50-56

63. Иванов Б. Н. Эксплуатация судовых дизельных установок / Б. Н. Иванов, В. М. Пономаренко. – М. : Транспорт, 1982. – 224 с.

64. Residue review // MER. 2010. – № 3. – P.43

65. Tightening emissions regime drives new initiatives // MER. – 2010. – № 6. – P. 16-20

66. Decarbonising the maritime supply chain // MER. – 2010. – № 11. – P. 8.

67. Кринецкий И. И. Основы научных исследований: учебное пособие для вузов / И. И. Кринецкий. – К. ; Одесса : Вища школа, 1981. – 208 с.

68. Антонов А. В. Системный анализ: учебник для вузов / А. В. Антонов. – М. : Высшая школа, 2004. – 454 с.

69. Бусленко Н. П. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, Н. Н. Коваленко. – М. : Сов. радио, 1973. – 440 с.

70. Козьминых А. В. Основы системного анализа судовых энергетических установок: учебное пособие / А. В. Козьминых. – Одесса : ОГМА, 2000. – 192 с.

71. Месарович М. Общая теория систем : математические основы : пер. с англ. / М. Месарович, И. Тахара. – М. : Мир, 1978. – 311 с.

72. Голиков В. В. Системный подход к проблеме безопасного управления судном / Голиков В. В // Судовождение. – Одесса. – 2010. – Вып. 17. – С. 51-58.

73. Брагинский О. Б. Нефтегазовый комплекс мира / О. Б. Брагинский. – М. : Нефть и газ, 2006. – 592 с.

74. Скобло А. И. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров. – М. : Недра, 2000. – 676 с.

75. Сафиева Р. З. Химия нефти и газа. Нефтяные дисперсные системы: состав и свойства (часть 1) / Р.З. Сафиева. – М. : РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина. 2004. – 116 с.

76. Большаков Г. Ф. Сераорганические соединения нефти / Г. Ф. Большаков. – . Новосибирск : Наука, 1986.– 243 с.

77. Кутепов А. М. Общая химическая технология / А. М. Кутепов, Т. И. Бондарева, М. Г. Беренгартен. – М. : Академикнига, 2004. – 528 с.

78. Шрайер Л. Л. Коррозия / Л. Л. Шрайер. – М. : Metallurgia, 1981 . – 632 с.

79. Солодовников В. Г. Общая характеристика способов защиты деталей дизеля при работе на сернистых топливах / В. Г. Солодовников // 36. мат. науково-технічної конференції «Енергетика судна: експлуатація та ремонт», (26.03.14–28.03.14, м. Одеса). Частина II. – Одеса : ОНМА, 2014. – С. 26-27.

80. Солодовников В. Г. Использование сернистых топлив в судовых вспомогательных двигателях / В. Г. Солодовников // 36. ст. VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні

технології на транспорті – MINTT-2014» (27-29 травня 2014 р., м. Херсон). – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2014. – С. 304-306.

81. Фомин Ю. Я. Применение тяжелых топлив в судовых дизелях / Ю. Я. Фомин, Э. М. Половинка, В. И. Шестопапов. – М. : Транспорт, 1971. – 192 с.

82. Робертс Дж. Основы органической химии : пер. с англ. / Дж. Робертс, М. Касерио. – М. : Мир, 1978. – 888 с.

83. Солодовников В. Г. Влияние сернистых топлив на коррозионный износ цилиндропоршневой группы и экологические параметры работы судовых дизелей / В. Г. Солодовников // Сб. ст. по материалам XXXVIII междунар. науч.-практ. конф. № 9 (34). Новосибирск: СибАК, 2014. – С. 42-49.

84. Солодовников В. Г. Влияние сернистых соединений топлива на рабочий процесс судовых дизелей / В. Г. Солодовников // Сб.матер. III Міжнар. наук.-техніч. конфер. Сучасний стан та проблеми двигунобудування, 19-21 листопада 2014 р. – Миколаїв, НУК, 2014. – С.191-194.

85. Зефирова Н. С. Химическая энциклопедия: том 5 / Н. С. Зефирова, Н. Н. Кулов. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1999. – 784 с.

86. Раевски П. Снижение уровня эмиссии оксидов серы на судах морского флота / П. Раевски // Двигателестроение. – 2007. – № 1. – С. 43-45.

87. Добровольский В. В. Подготовка вязких топлив судовых малооборотных дизелей / В. В. Добровольский, С. А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 26. – Одесса: ОНМА. – С.46-54.

88. Черножуков Н. И. Очистка и разделение нефтяного сырья, производство товарных нефтепродуктов / под. ред. А. А. Гуреева / Н. И. Черножуков. – М. : Химия, 1978. – 424 с.

89. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов / Е. А. Новиков // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний, 2008. – №№ 1, 3, 4, 5.

90. Измерение массовой доли серы в нефти в нефтепродуктах / А.Д. Гоганов А. Д. и др. // Мир измерений, 2004. – № 12. – С. 28-36.
91. Field K. Low Sulfur Fuel Analysis – Chasing the Limits.// Petro Industry News, 2004. – № 2. – P. 8-12.
92. Nadkarni K. Determining Trace Amounts of Sulfur in Petroleum Products / K. Nadkarni // World Refining, 2000. – № 6. – P.24-30.
93. Nadkarni K. Trace Levels of Sulfur in the Fuels of the Future: Analytical Perspective / K. Nadkarni // Journal of ASTM International, 2005. – № 3. – Vol. 2. – № 3. P. 46-55.
94. Nadkarni K. Determination of Sulfur in Petroleum Products and Lubricants: A Critical Review of Test Performance / K. Nadkarni // American Laboratory, 2000. – № 11. – P.16-25.
95. ДСТУ 3868–99 Державний стандарт України : Паливо дизельне. Технічні умови. – Київ : Держстандарт України, 1993. – 16 с.
96. Фомин Г. С. Энциклопедия международных стандартов / Г. С. Фомин, О. Н. Фомина.– М. : Протектор, 2006. – 1040 с.
97. Тимохова О. М. Влияние сернистых соединений топлива на коррозионный износ деталей машин / О .М. Тимохова, Р. С. Тимохов // Вестник Ухтинского гос. техн. ун. – Ухта, 2004. – № 26. – С. 36-44.
98. Демидова Н. П. Контроль и оценка качества жидкого топлива / Н. П. Демидова // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2013. – № 32. – Одесса: ОНМА. – С.144-153.
99. Nero V.P. Oxidative process for ultra-low sulfur diesel / V.P. Nero, S.J. Decanio, A.S. Rappas, R.E. Levy, F.M. Lee // Preprints of Papers–American Chemical Society, Division of Petroleum Chemistry. – 2002. – № 47. – P. 41-54.
100. Ханмамедов С. А. Механика разрушения углеродных отложений в проточной части дизеля в контексте фрактального анализа / С. А. Ханмамедов, О. В. Бурлаченко // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2011. – № 28. – Одесса: ОНМА. – С.21-35.

101. Баланкин А. С. Упругие свойства фракталов, эффект поперечных деформаций и динамика свободного разрушения твердых тел / А. С. Баланкин // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 319. – № 5. – С. 1098-1101.

102. Аспель И. Б. Гидроочистка моторных топлив / И. Б. Аспель, Г. Г. Демкина. – Л. : Химия, 1977. – 160 с.

103. Никитин М. Д. Теплозащитные и износостойкие покрытия / М. Д. Никитин, Д. П. Кулик, Н. И. Захаров. – М. : Машиностроение, 1977. – 168 с.

104. Слободянюк И. М. Влияние износа сопряженных деталей ЦПГ на долговечность судовых дизелей после ремонта / И. М. Слободянюк, Н. С. Молодцов, В. Н. Голобородько // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 26. – Одесса: ОНМА. – С.136-144.

105. Сагин С. В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей / С. В. Сагин, Ю. В. Заблоцкий, Р. В. Перунов // Проблемы техники: науч.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.

106. Солодовников В. Г. Ультразвуковая обработка топлива для снижения сернистой коррозии в судовых среднеоборотных дизелях / В. Г. Солодовников // Автоматизация судовых технических средств: наук.-техн. сборник. – 2015. – Вып. 20. – С. 84-91.

107. Хандов З. А. Судовые среднеоборотные дизели / З. А. Хандов, М. И. Браславский. – Л. : Судостроение, 1975. – 316 с.

108. Семенов В. С. Долговечность цилиндропоршневой группы судовых дизелей / В. С. Семенов, П. С. Трофимов. – М. : Транспорт, 1989. – 84 с.

109. Овсянников М. К. Тепловая напряженность судовых дизелей / М. К. Овсянников, Г. А. Давыдов. – Л. : Судостроение, 1975. – 260 с.

110. Харлампиди Х. Э. Сераорганические соединения нефти, методы очистки и модификации / Х. Э. Харлампиди // Соросовский образовательный журнал, 2000. – № 7. – Т. 6. – С. 42-46

111. Горбов В. М. Анализ способов десульфуризации углеводородных топлив для судовых электрохимических генераторов / В. М. Горбов, М. А. Карпов // Сб. матер. VI Міжнар. наук.-техніч. конфер. «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні» 27.05.11–28.05.11. – Миколаїв, НУК, 2014. – С.191-194.

112. Анисимов А. В. Окислительное обессеривание углеводородного сырья / А. В. Анисимов, А. В. Тараканова // Рос. хим. журнал (Ж. Рос. хим. об-ва. им. Д. И. Менделеева, 2008. – № 4. – Т. LII. – С. 32-40.

113. Caero L. C., Hernandez E., Pedraza F., Murrieta F. Catal. Today, 2005. – Vol. 107-108. P. 564-569.

114. Shiraishi Y., Yamada A., Hirai T. Energy and Fuels, 2004. –№ 5 – Vol. 18. – P. 1400-1404.

115. Асланов Л. А. Обессеривание моторных методом экстракции сернистых соединений ионными жидкостями / Л. А. Асланов, А. В. Анисимов // Нефтехимия, 2004. – № 2. – Т. 44. – С. 83-88.

116. Лунин В. В. Обессеривание и деметаллизация тяжелых фракций нефти путем озонлиза и радиоллиза / В. В. Лунин, В. К. Французов, Лихтерова Н. М. // Нефтехимия, 2002. – № 3. – Т. 42. – С. 195-202.

117. Лашхи В. Л. Представление об эксплуатационных свойствах топлив и смазочных материалов как коллоидных систем / В. Л. Лашхи // Химия и технология топлив и масел. – 1996. – № 3. – С. 32-33.

118. Кнэпп Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит – М. : Мир, 1974. – 668 с

119. Левковский Ю.Л. Структура кавитационных течений. – Л. : Судостроение, 1977. – 248 с.

120. Рождественский В. В. Кавитация / В. В. Рождественский. – Л. : Судостроение, 1977. – 248 с.



121. Зубрилов С. П. Ультразвуковая кавитационная обработка топлив на судах / С. П. Зубрилов, В. М. Селиверстов, М. И. Браславский. – Л. : Судостроение, 1988. – 80 с.
122. Кравченко О. В. Физико-химические преобразования углеводородных соединений с использованием новых кавитационных устройств / О. В. Кравченко // Авиационно-космическая техника и технология, 2007. – № 1 (37). – С. 65-69.
123. Курс загальної фізики : підручник у 6 т. / за загал. ред. В. А. Сминтини. – Одеса : Астропринт, 2011. – Т. 1 : С. В. Козицький, Д. Д. Полищук. Механіка. – Одеса : Астропринт, 2011. – 472 с.
124. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М. : Иностран. лит., 1957. – 726 с.
125. Маргулис М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): Учеб. пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1984. – 272 с.
126. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // Физическая акустика / Под ред. У. Мезона. – М. : Мир, 1967. – Т. 1. – С. 7 – 138.
127. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация / М. Г. Сиротюк. – М. : Наука, 2008. – 272 с.
128. Основы физики и техники ультразвука / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский и др. – М. : Высш. шк., 1987. – 352 с.
129. Leighton T. G. The Acoustic bubble / T. G. Leighton. – London, U.K. : Academic Press, 1994. – 240 p.
130. Neppiras E. A. Acoustic cavitation / E. A. Neppiras // Phys. Repts. – 1980. – V. 61, № 3. – P. 159-251.
131. Розенберг Л.Д. Кавитационная область. Т. 2: Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 268 с.

132. Young F. R. Cavitation / F. R. Young. – London, U.K. : Imperial College Press, 1999. – 418 p.

133. Шестаков С. Д. Многопузырьковая акустическая кавитация: математическая модель и физическое подобие / С. Д. Шестаков // Электронный журнал «Техническая акустика». – Вып. № 10. – Т. № 10. – 2010. – <http://www.ejta.org>

134. Sagin S. V. Cavitation Treatment of High-Viscosity Marine Fuels for Medium-Speed Diesel Engines / Sagin S. V., Solodovnikov V. G. // Modern Applied Science; Published by Canadian Center of Science and Education, Vol. 9, № 5. – 2015. – P. 269-278.

135. Solodovnikov V. G. Cavitation treatment of fuels for Marine internal combustion engines / V. G. Solodovnikov // Збірка матеріалів наук.-техн. конфер. «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 24.03.2015–26.03.2015. Частина 2. – Одеса : ОНМА, 2015. – С. 11-16.

136. Сагин С. В. Применение ультразвуковой обработки топлива для снижения сернистого износа деталей двигателя / С. В. Сагин, В. Г. Солодовников // Сб. ст. по материалам XXXV междунар. науч.-практ. конф. «Технические науки – от теории к практике», № 6 (31). Новосибирск: СибАК, 2014. – С. 42-49.

137. Солодовников В. Г. Повышение эффективности процесса топливоподготовки в судовых дизелях за счет использования дополнительной кавитационной обработки топлива / В. Г. Солодовников // Сб. научных трудов. IV межд. научн.-практ. конф. «Техника и технологии: роль в развитии современного общества», 27 января 2015 г., г. Краснодар. – Краснодар : науч.-изд. центр Априори, 2015. – С. 121-128.

138. Курс загальної фізики : підручник у 6 т. / за загал. ред. В. А. Сминтини. – Одеса : Астропринт, 2011. – Т. 2 : С. В. Козицький, Д. Д. Полищук. Механіка. – Одеса : Астропринт, 201. – 472 с.

139. Влияние кавитационного воздействия на углеводородное топливо / А. Ф. Немчин [и др.] // Пром. теплотехника. – 2002. – Т. 24, № 6. – С. 60–63.

140. Нестеренко А. И. Возможность крекинга углеводородов под действием кавитации. Количественная энергетическая оценка / А. И. Нестеренко, Ю. С. Берлиозов // Химия и технология топлив и масел. – 2007. – № 6. – С. 43–44.

141. Василевский А. В. Способ улучшения пусковых качеств дизельных двигателей в условиях низких температур посредством ультразвуковой кавитационной обработки дизельного топлива / А. В. Василевский // Матер. междун. науч.-техн. конф. ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». – Секция 2 «Поршневые и газотурбинные двигатели». – М. : МГТУ МАМИ, 2010. – С. 60-66.

142. Такаева М. А. Методы активирования углеводородного сырья воздействием ультразвука / М. А. Такаева, Н. А. Пивоварова // Сб. ст. по материалам междунар. науч.-практ. конф. «Вопросы науки и техники», № 2. – Часть 2. – Новосибирск: ЭКОР-книга, 2012. – С. 44-48.

143. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев [и др.]. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 2007. – 400 с.

144. Солодовников В. Г. Совершенствование системы топливоподготовки судовых среднеоборотных дизелей / В. Г. Солодовников, С. В. Сагин // Сб. научных трудов. XV Межд. научн.-практ. конф. «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке», г. Москва, 27-28 марта 2015 г. – М.: Prospero, № 3 (15), 2015. – С. 55-58.

145. Ассад М. С. Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчет эксперимент / М. С. Ассад, О. Г. Пенязьков. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 308 с.

146. Mahulkar A. V. Steam Bubble Cavitation / A. V. Mahulkar, P. S. Bapat,

A. B. Pandit, F. M. Lewis // *AIChE Journal*, July 2008. – Vol. 54. – №. 7 – P. 1711-1724.

147. Suslick K. S. Mechanochemistry and Sonochemistry: Concluding Remarks / K. S. Suslick // *Faraday Discuss.* – 2014. – № 170. – P. 411-422.

148. Добровольский В. В. Энергетическая эффективность топливных систем современных транспортных судов, работающих на высоковязких сортах тяжелых топлив вязкостью 380 мм<sup>2</sup>/с и выше / В. В. Добровольский, В. Г. Солодовников // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 2013. – № 32. – Одесса: ОНМА. – С. 101-112.

149. Бутенко А. Ф. Ориентационное упорядочение системы углеродных нанотрубок в матрице эпитропных жидких кристаллов / А. Ф. Бутенко, А. Ю. Поповский, В. Г. Солодовников // *Сб. мат. XXVI міжнародної наукової конференції «Дисперсні системи», 22-26 вересня 2014 р., м. Одеса.* – Одеса : ОНУ ім. І. І. Мечникова. – С.33-34.

150. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963.- 472 с.

151. Заблоцкий Ю.В. Модульные схемы построения топливных систем судовых малооборотных дизелей / Ю.В. Заблоцкий // *Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал.* – 2013. – № 2. – Одесса: ОНМУ. – С. 76-81.

152. Review of maritime transport. –New York: UNSTAD, 2008. – 148 p.

153. Промтов М. А. Кавитационная технология улучшения качества углеводородных топлив / М. А. Промтов // *Хим. и нефтегазовое машиностроение.* – 2008. – № 2. – С. 6-8.

154. Воробьёв Ю. В. Химическое действие гидроудара в активаторе моторного топлива / Ю. В. Воробьёв, А. П. Кузьмин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та.* – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 95-98.

155. Солодовников В. Г. Применение двухступенчатой обработки топлива для улучшения рабочих параметров и эксплуатационных характеристик судового дизеля / В. Г. Солодовников // *Судовые*

энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2014. – № 34. – Одесса: ОНМА. – С. 130-137.

156. Солодовников В. Г. Совершенствование процесса топливоподготовки судовых дизелей / В. Г. Солодовников // Збірка матеріалів VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті – MINTT-2015» (26-28 травня 2015 р., м. Херсон). – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2015. – С. 316-319.

157. А. с. 1815397 СССР, МКИ F 02 М 29/00. Способ улучшения противоизносных свойств тяжелых топлив / Ханмамедов С. А., Солодовников В. Г., Заблоцкий Ю. В., Почтаренко В. В. – № 4865089/06 ; заявл. 11.09.90 ; опубл. 15.05.93, Бюл. № 18.

158. Горб С. И. Новые правила энергоэффективности для судов / С. И. Горб // Порты Украины, № 01 (123) 2013. – С. 37-39.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Авторское свидетельство



СОЮЗ СОВЕТСКИХ  
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ  
РЕСПУБЛИК

(19) **SU** (11) **1815397 A1**

(51) **5 F 02 M 29/00**

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПАТЕНТНОЕ  
ВЕДОМСТВО СССР  
(ГОСПАТЕНТ СССР)



# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

1

2

(21) 4865089/06

(22) 11.09.90

(46) 15.05.93. Бюл. № 18

(71) Одесское высшее инженерное морское училище им. Ленинского комсомола

(72) С.А.Ханмамедов, В.Г.Солодовников, Ю.В.Заблоцкий и В.В.Почтаренко

(56) Авторское свидетельство СССР

№ 352935, кл. С 10 М 9/00, 1972.

(54) СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛЫХ ТОПЛИВ

(57) Использование: методы улучшения эксплуатационных свойств тяжелых топлив. Сущность изобретения: для улучшения противоизносных свойств повышает дисперсность твердых абразивных и водяных включений, а их разрушение осуществляют касательными усилиями, генерируемыми при ударном воздействии топлива, содержащего частицы с рабочей поверхностью, повернутой к потоку под углом  $45^\circ$ . 2 ил.

Изобретение относится к методам улучшения эксплуатационных свойств тяжелых топлив, используемых в судовых тепловых машинах, а именно к повышению их противоизносных свойств.

Целью изобретения является уменьшение энергетических затрат на измельчение твердых частиц в топливе.

На фиг. 1 представлен вариант выполнения устройства, реализующего описываемый способ; на фиг. 2 — схема включения устройства в топливную систему двигателя.

Устройство содержит разъемный корпус, в первой половине 1 которого четыре параллельно включенных цилиндрических сопла 3, располагающихся под углом  $45^\circ$  относительно второй половины корпуса 2.

Устройство устанавливается в главной топливной магистрали судового двигателя после вспомогательного топливоподкачивающего насоса.

Топливо из расходной цистерны 1 под давлением, создаваемым топливоподкачивающим насосом 2, поступает через устрой-

ство 3 к топливному насосу высокого давления двигателя.

Топливо в устройстве 3 выходит из сопел с такой скоростью, что при ударе о рабочую поверхность корпуса, находящуюся под углом  $45^\circ$  к направлению потока, происходит разрушение твердых абразивных и водяных включений и повышение их дисперсности.

Силовое воздействие регулируется путем изменения давления насоса 1.

Способ как последовательность технологических операций заключается в следующем:

подача топлива, содержащего твердые частицы и воду, к цилиндрическим соплам;

сообщение к твердым частицам при их прохождении через сопла необходимой кинетической энергии;

генерирование сдвиговой волны в твердых частицах за счет ударного взаимодействия с рабочей поверхностью, повернутой к потоку под углом  $45^\circ$ ;

разрушение твердых абразивных и водяных включений в топливе и подача топли-

(19) **SU** (11) **1815397 A1**



3

1815397

4

ва с улучшенными противоизносными свойствами к насосу высокого давления.

Возможность осуществления предлагаемого способа улучшения противоизносных свойств тяжелых топлив основывается на том, что разрушение твердых абразивных и водяных включений в топливе осуществляется касательными усилиями, генерируемыми при ударном воздействии топлива, с рабочей поверхностью, повернутой к потоку под углом  $45^\circ$ . При таком воздействии разрушение твердой частицы происходит за счет превышения прочности на сдвиг в 3–10 раз меньше, чем прочность на разрыв.

Устройство, реализующее данный способ, было изготовлено из стали 45X. Часть корпуса с рабочей поверхностью, при ударе о которую происходит разрушение твердых абразивных и водяных включений, была закалена токами высокой частоты на HRC 60.

Предлагаемый способ прост в реализации, позволяет уменьшить абразивный износ прецизионных пар топливной аппаратуры при малых затратах энергии, т.е. перепаде давления на устройстве (по сравнению с прототипом). Повышение дисперсности воды, находящейся в тяжелом топливе, позволяет как снизить коррозион-

ный износ топливной аппаратуры, так и улучшить процесс сгорания топлива в двигателе, снизить нагарообразование в камере сгорания. Наличие четырех сопел позволяет повысить удельную производительность устройства.

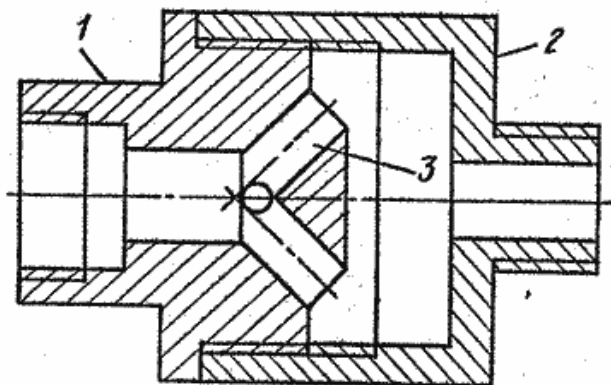
В настоящее время создан опытный образец устройства, реализующего предложенный способ улучшения противоизносных свойств тяжелых топлив, и проведены его лабораторные и стендовые испытания.

Стендовые испытания проходили в судовых условиях в топливной системе главного двигателя 7ДКРН 74/160 Брянского машиностроительного завода.

Экономический эффект от использования данного способа определен быть не может в связи с отсутствием достоверных сведений о стоимости прототипа.

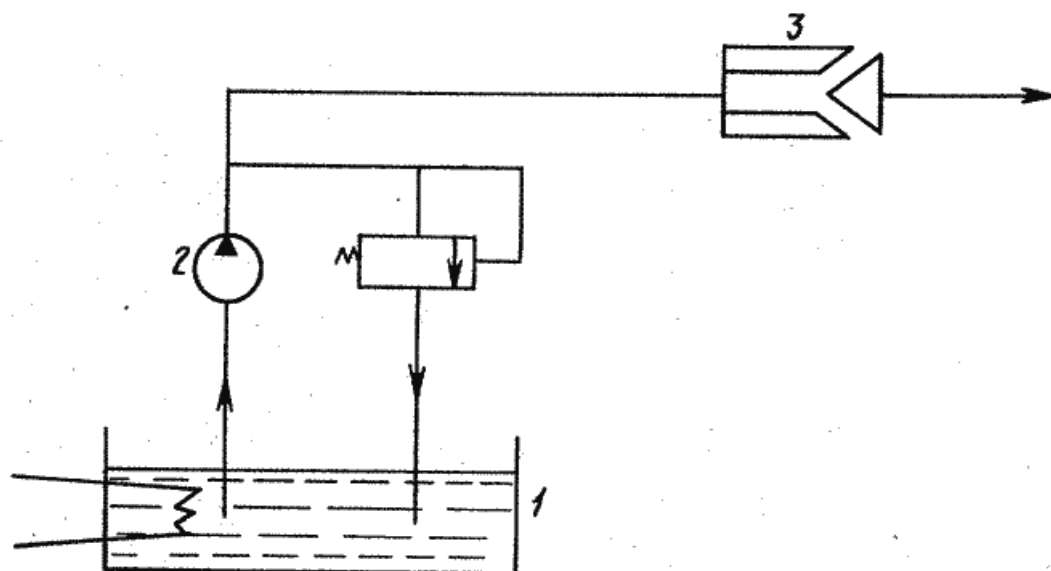
Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я

Способ улучшения противоизносных свойств тяжелых топлив, заключающийся в подаче струи топлива под давлением на рабочую поверхность, о т л и ч а ю щ и й с я тем, что, с целью уменьшения энергетических затрат, струю топлива подают под углом в  $45^\circ$  к плоскости рабочей поверхности.



фиг. 1

1815397



фиг. 2

Редактор С. Кулакова      Составитель С. Ханмамедов  
 Техред М. Моргентал      Корректор А. Козориз

Заказ 1624      Тираж      Подписное  
 ВНИИПИ Государственного комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР  
 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., 4/5

Производственно-издательский комбинат "Патент", г. Ужгород, ул. Гагарина, 101

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты внедрения результатов диссертационного исследования

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор

Товариства з обмеженою відповідальністю

«Каалбадшипінг Україна»,



Поркунов А.Г.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Солодовнікова Валерія Григорівна

«Удосконалення системи паливopідготовки суднових середньообертових дизелів шляхом зниження концентрації компонентів, що містять сірку»

Ми, що нижче підписались, старший механік С.В. Бочко і капітан А.Г. Ткаченко т/х «SOCOL-6», як члени суднової комісії по впровадженню результатів дисертаційного дослідження Солодовнікова В. Г., склали цей акт в підтвердженні того що використання додаткової системи ультразвукової підготовки палива, за допомогою якої була модернізована штатна суднова паливна система низького тиску, сприяє поліпшенню енергетичних та економічних показників роботи суднових середньообертових дизелів. Зокрема, застосування цієї системи на двигунах S6A2 фірми «Mitsubishi» дозволило знизити (до 2,0 %) питому ефективну витрату палива та сприяло стабілізації основних параметрів робочого циклу (насамперед максимального тиску згоряння та температури випускних газів). Крім того, застосування кавітаційної ультразвукової обробки палива згідно з методикою та технологією, що розроблені у дисертаційному дослідженні, забезпечило зниження до 3,5 разів зносу елементів циліндропоршневої групи дизеля (циліндрових втулок та поршневих кілець).

Капітан т/х «SOCOL-6»,  
капітан далекого плавання

А.Г. Ткаченко

Старший механік т/х «SOCOL-6»,  
механік I-го розряду

С.В. Бочко



«Затверджую»

Директор

Товариства з обмеженою відповідальністю

«Капівей» Україна»,



Поркунов А.Г.

### АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Солодовнікова Валерія Григорівна

«Удосконалення системи паливopідготовки суднових середньообертових дизелів шляхом зниження концентрації компонентів, що містять сірку»

Ми, що нижче підписались, старший механік т/х «Ocean Voyager» С.В. Васильчук та капітан судна, капітан далекого плавання С.Г. Геращенко, склали цей акт в підтвердженні того, що результати дисертаційного дослідження Солодовнікова В.Г. були впроваджені на в системі підготовки палива судового дизеля 6ЧН25/34, якій на номінальному режимі роботи має наступні характеристики: потужність 350 кВт, частота обертання колінчатого валу 500 об/хв).

При проведенні наукових досліджень, пов'язаних з темою дисертаційної роботи, суднова система підготовки палива була дообладнана додатковим блоком, що виконує ультразвукову обробку палива. При цьому для дизелів, що використовували паливо, яке зазнавало додаткову ультразвукову кавітаційну обробку, було зафіксовано наступне змінення експлуатаційних характеристик та параметрів роботи (в порівнянні з «контрольним» дизелів, експлуатація якого здійснювалася на паливі, що не піддавалося ультразвукової обробки):

зменшення на 55...60 % лінійного зносу циліндрових втулок;

зменшення на 63...65 % масового зносу поршневих кілець;

зниження на 15...25 °С температурного напруження газовипускної системи;

покращення технічного стану циліндро-поршневої групи та газовипускної системи дизеля (зокрема зменшення кількості незгорілих вуглеводнів, що осаджуються на цих поверхнях; зменшення площі ушкодження верхньої частини втулки та кромки поршневих кілець; покращення руху кільця у поршневій канавці).

Капітан т/х «Ocean Voyager»,  
капітан далекого плавання

С.Г. Геращенко

Старший механік т/х «Ocean Voyager»,  
механік I-го розряду

С.В. Васильчук



«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Головний інженер виробничої фірми «Судоремонт» у  
формі товариства з обмеженою  
відповідальністю

Д.Т.Н., доцент Веретеннік О.М.

«12» 05 2015 р.

## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Солодовнікова Валерія Григоровича

«Удосконалення системи паливopідготовки суднових середньообертових дизелів  
шляхом зниження концентрації компонентів, що містять сірку»

Ми, що нижче підписались, головний інженер ПФ «Судоремонт» Задірко С. І. та інженер-технолог Паскарь Д. І. склали цей акт в підтвердженні того, що результати дисертаційного дослідження Солодовнікова В. Г. «Удосконалення системи паливopідготовки суднових середньообертових дизелів шляхом зниження концентрації компонентів, що містять сірку» (зокрема система ультразвукової обробки і гідродинамічної активації важкого палива, а також двоступінчастий модуль ультразвукової підготовки палива) були впроваджені на групі суднових дизелів, що встановлені на судах, які обслуговується виробничою фірмою «Судоремонт».

Застосування цих систем на суднових дизелях в діапазоні їхньої потужності 180...4600 кВт за даними судових фахівців забезпечило зниження витрати палива на 70...520 кг на добу, а також сприяло зменшення корозійного зносу та покращенню технічного стану деталей циліндрової групи дизеля.

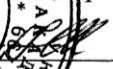
Головний інженер ПФ «Судоремонт»

С.І. Задірко

Інженер-технолог

Д.І. Паскарь

ЗАТВЕРДЖУЮ”

Перший проректор  
Одеської національної морської академії,  
д.ю.н., професор  О.М. Шемякін  
" 23  2015 р.

**АКТ**  
про використання результатів дисертаційної роботи  
Солодовнікова Валерія Григоровича  
на тему «Удосконалення системи паливопідготовки суднових  
середньообертових дизелів шляхом зниження концентрації компонентів,  
що містять сірку» в навчальному процесі ОНМА

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу Одеської національної морської академії Пархоменко М.М. та завідувач кафедри технічна експлуатація флоту д.т.н., професор Голіков В.А. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Солодовнікова Валерія Григоровича «Удосконалення системи паливопідготовки суднових середньообертових дизелів шляхом зниження концентрації компонентів, що містять сірку» впровадженні у навчальному процесі кафедри технічної експлуатації флоту, а саме:

1) в дисципліні «Технологія використання робочих речовин», яку читають курсантам 4-го курсу судномеханічного факультету, зокрема при викладанні лекцій «Паливо для суднових дизелів та його основні характеристики», «Паливні системи суднових дизелів»;

2) в дисципліні «Технічне обслуговування и ремонт суднових технічних засобів», яку читають курсантам 5-го курсу судномеханічного факультету – при викладанні лекцій «Моніторинг технічного стану циліндропоршневої групи судового дизеля» та «Неспецифікаційні режими роботи суднових дизелів»;

3) в дисципліні «Оптимізація режимів роботи суднових енергетичних установок» яку читають курсантам 6-го курсу судномеханічного факультету – при викладанні лекцій «Вплив експлуатаційних показників палива на параметри роботи суднових енергетичних установок»;

4) при проведенні лабораторних занять за темами «Визначення структурного складу палива» та «Визначення коефіцієнта конструктивної енергетичної ефективності судна».

Начальник навчального відділу ОНМА

 Пархоменко М.М.

Завідувач кафедри ТЕФ,  
д.т.н., професор

 Голіков В.А.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты обмеров цилиндрических втулок судового среднеоборотного дизеля  
S6A2 фирмы «Mitsubishi»

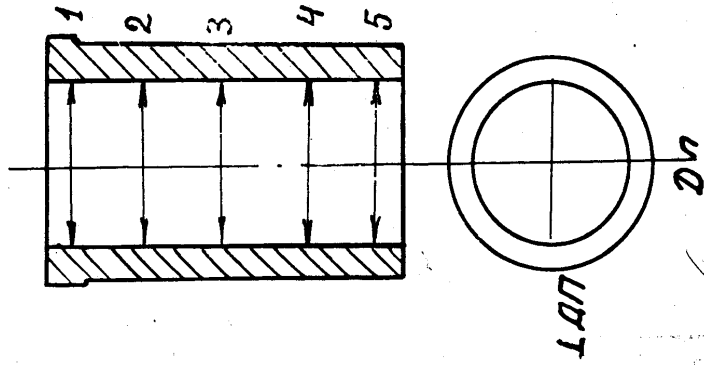


|             |              |                   |               |                             |
|-------------|--------------|-------------------|---------------|-----------------------------|
| Объект      | Т/Х СОСОВ. В | под заказ или ФРВ | Заказ         | Двигатель S6A2              |
| Замеры выт. |              |                   |               | Цилиндровые втулки<br>Ø 150 |
| Мастер ОТК  |              |                   | Исрз          |                             |
| Ст. механик |              |                   | Карта замеров |                             |

| Втулка №1 |        |       |  | Втулка №2 |       |     |  | Втулка №3 |       |     |  | Втулка №4 |       |     |  |
|-----------|--------|-------|--|-----------|-------|-----|--|-----------|-------|-----|--|-----------|-------|-----|--|
| по ДП     | Л ДП   | Эл.   |  | по ДП     | Л ДП  | Эл. |  | по ДП     | Л ДП  | Эл. |  | по ДП     | Л ДП  | Эл. |  |
| 1-1       | 150,03 | 150,0 |  | 150,03    | 150,0 |     |  | 150,03    | 150,0 |     |  | 150,03    | 150,0 |     |  |
| 2-2       | 150,02 | 150,0 |  | 150,02    | 150,0 |     |  | 150,02    | 150,0 |     |  | 150,02    | 150,0 |     |  |
| 3-3       | 150,01 | 150,0 |  | 150,01    | 150,0 |     |  | 150,01    | 150,0 |     |  | 150,01    | 150,0 |     |  |
| 4-4       |        |       |  |           |       |     |  |           |       |     |  |           |       |     |  |
| 5-5       |        |       |  |           |       |     |  |           |       |     |  |           |       |     |  |
| кон.      |        |       |  |           |       |     |  |           |       |     |  |           |       |     |  |

| Втулка №5 |        |       |  | Втулка №6 |       |     |  | Втулка №7 |      |     |  | Втулка №8 |      |     |  |
|-----------|--------|-------|--|-----------|-------|-----|--|-----------|------|-----|--|-----------|------|-----|--|
| по ДП     | Л ДП   | Эл.   |  | по ДП     | Л ДП  | Эл. |  | по ДП     | Л ДП | Эл. |  | по ДП     | Л ДП | Эл. |  |
| 1-1       | 150,03 | 150,0 |  | 150,04    | 150,0 |     |  |           |      |     |  |           |      |     |  |
| 2-2       | 150,02 | 150,0 |  | 150,02    | 150,0 |     |  |           |      |     |  |           |      |     |  |
| 3-3       | 150,01 | 150,0 |  | 150,01    | 150,0 |     |  |           |      |     |  |           |      |     |  |
| 4-4       |        |       |  |           |       |     |  |           |      |     |  |           |      |     |  |
| 5-5       |        |       |  |           |       |     |  |           |      |     |  |           |      |     |  |
| кон.      |        |       |  |           |       |     |  |           |      |     |  |           |      |     |  |



Замеры произвел:

22.12.11 *А.А.А.*