

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПУТЕМ КОРРЕКТИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАБОТЫ

Эффективность работы судовой энергетической установки (СЭУ) в значительной мере определяется техническим уровнем и надежностью главных и вспомогательных двигателей. Надежность судового дизеля является комплексным понятием и характеризует безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость дизеля. В то же время, надежность является важнейшим показателем качества дизеля и представляет собой свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, определяющих его способность выполнять функции источника энергии на судне в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта [1].

С целью обеспечения безопасности мореплавания Международная морская организация планомерно проводит ужесточение требований к надежности всей СЭУ и судовых дизелей в частности.

В настоящее время решение вопросов обеспечения безопасности при эксплуатации судовых технических средств (СТС) является принципиальным вопросом, определяющим перспективы развития морской техники [2]. Подтверждением сказанному является включение в Международную конвенцию SOLAS в качестве отдельной главы "Международного кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращению загрязнения" (МКУБ). Основные цели МКУБ состоят в обеспечении безопасности на море, предотвращении несчастных случаев или гибели людей, причинения ущерба окружающей среде и имуществу. В унисон требованиям МКУБ формулируются цели любой судоходной компании, связанные с управлением безопасностью, которые должны:

- обеспечивать безопасную практику эксплуатации судов и безопасные для человека условия труда;

- обеспечивать защиту от всех выявленных рисков;

- постоянно улучшать навыки персонала, относящиеся к управлению безопасностью, включая готовность к аварийным ситуациям как с безопасностью так и защитой окружающей среды.

Статистические данные Регистра судоходства Ллойда свидетельствуют о том, что ежегодно гибнут 300 ... 400 судов, аварию терпит

свыше 8000 судов, при этом в кораблекрушениях и при авариях СТС ежегодно погибает порядка 500 человек. Причиной не менее одной трети серьезных аварий мирового торгового флота являются отказы СТС. Следует отметить, что большинство работ по оценке безопасности технических средств, выполненных к настоящему моменту, представляют вероятностные анализы безопасности ограниченного объема и рассматривают только отдельные последовательности событий технологического оборудования. Существенный акцент при оценке риска эксплуатации СТС делается на анализе последствий возможных происшествий и выработке мер снижения их тяжести. При этом зачастую упускается из виду экономически выгодный метод снижения самой частоты возникновения аварии, что связано с объективными трудностями априорной оценки вероятности возникновения негативных событий на объектах судовой техники. Данная, объективно существующая, проблема требует своего решения, а ее существование подтверждает актуальность поиска решения.

Одной из проблем, стоящих сегодня особенно остро перед компаниями, занимающимися как судовым менеджментом, является старение парка судов. В настоящее время по этой причине у большого количества судов срок эксплуатации уже превысил ресурс, назначенный проектантом. Наряду с современными СЭУ в эксплуатации находится большое количество дизелей предшествующих моделей, качественная эксплуатация и поддержание надежности их работы требуют больших удельных финансовых вложений. В связи с этим, а также из-за стремления судовладельцев сократить издержки в условиях жесткой конкуренции и их ограниченных финансовых возможностей для поддержания флота в должном техническом состоянии, объем проводимых профилактических работ зачастую сводится к минимуму и, как правило, устраняются только полученные повреждения и выполняются работы только по выставленным классификационными обществами требованиям при освидетельствовании судна [3].

Техническое состояние СЭУ, состоящей из большого числа систем и механизмов, качественно изменяется в процессе эксплуатации [4]. Соответственно такие изменения происходят и в каждом элементе СЭУ, которые в период эксплуатации подвержены механическому износу, коррозии, окислению и т.д. То есть каждому определенному периоду эксплуатации СЭУ соответствует также определенный уровень его технического состояния, которое в конечном итоге изменяет технико-экономические и другие свойства СЭУ.

Судовые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) оснащены различными системами (топливная, масляная, охлаждения, воздушная и т.д.), которые должны обеспечивать их надёжную эксплуатацию. Ни-

же представлен график, который отражает распределение основных видов отказов систем судовых ДВС в процентах.

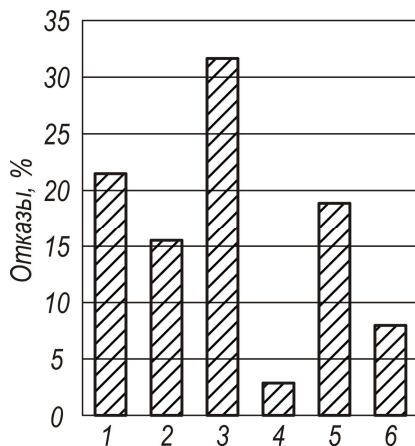


Рис.1. Распределение отказов основных элементов судовых дизелей:

1 – кривошипно-шатунный механизм; 2 – цилиндро-поршневая группа; 3 – топливная система; 4 – газovýпускная система; 5 – масляная система; 6 – система охлаждения

Задача технического менеджмента – на базе сбора практических данных предупредить массовые отказы элементов систем СЭУ на основании прогноза и отказов повреждений судовых систем. Для судовых дизелей, длительный период находящихся в эксплуатации и прошедших замену основных элементов по истечению их рекомендованного срока работы, необходимо сократить время периодических осмотров, а также снизить регламентные значения наработки на отказ и остаточного ресурса работы.

Согласно методики, предложенной в [1], средняя наработка на отказ или ее обратная величина (среднее число отказов на единицу наработки) определяется для периода эксплуатации, когда поток отказов стационарен.

Для расчета средней наработки на отказ, отказы группируются по интервалам наработок, которые включают в себя периоды безотказной работы и периоды возникновения отказов. В процедуру расчета входит определение следующих параметров:

1) интервальная оценка среднего числа отказов на единицу наработки

$$\omega_i = \frac{r_i}{\sum_1^N t_j}$$

и среднее число отказов на единицу наработки

$$\omega = \frac{\sum_1^i \omega_i}{i},$$

где  $r_i$  – количество отказов в  $i$ -м интервале наработки;  $i$  – количество интервалов;  $t_j$  – наработка  $j$ -го дизеля в  $i$ -м интервале;  $N$  – количество дизелей выборочной совокупности;

2) дисперсия среднего числа отказов на единицу наработки

$$D(\omega) = \frac{(\omega - \omega_i)^2}{i - 1}$$

и верхняя доверительная граница среднего числа отказов на единицу наработки

$$\omega_B = \omega + \frac{t_\gamma \sqrt{D(\omega)}}{\sqrt{i}},$$

где  $t_\gamma$  – коэффициент распределения Стьюдента, определяемый в зависимости от установленного числа отказов или количества интервалов  $i$ ;

3) средняя наработка на отказ  $T = 1/\omega$  и ее нижняя доверительная граница  $T_n = 1/\omega_B$ .

Прогнозирование остаточного ресурса составных частей машин выполняется в соответствии с нормативными документами [5] и предназначено для предупреждения максимальных отклонений при изнашивании и других монотонных процессах ухудшения технического состояния узлов судовых дизелей. Расчетные формулы для оценки остаточного ресурса справедливы при условии монотонности процесса отклонения параметров технического состояния, которое будет обеспечено при выполнении неравенства

$$\sigma_z \leq \frac{U_n t_m}{1,7 T_{cp} (1 + v)},$$

где  $\sigma_z$  – среднее квадратичное отклонение фактического изменения контролируемого параметра от аппроксимирующей функции, нормированное в долях измеренного отклонения параметра;  $U_n$  – предельное отклонение параметра;  $t_m$  – время межконтрольной наработки (наработка между одноименными видами технического обслуживания или ремонта);  $v$  – коэффициент вариации ресурса;  $T_{cp}$  – средний ресурс по параметру.

Если оно не выполняется, то необходимо прогнозировать остаточный ресурс, начиная с его минимального значения, которое определяется как

$$t_{\text{ост}}^{\min} = \frac{3,4\sigma_z^2 T_{\text{сп}}^2}{\alpha^2 U_{\text{пк}}^2 t_{\text{к}}^{2\alpha-2} t_{\text{м}}},$$

где  $\alpha$  – характеристика аппроксимирующей функции математического ожидания процесса изменения параметра (показатель степени степенной функции);  $t_{\text{к}}$  – наработка составной части от начала ее эксплуатации или от возобновления эксплуатации после ремонта до момента контроля.

Прогнозирование остаточного ресурса особенно актуально для СЭУ, длительный период времени уже находящихся в эксплуатации (в частности для судовых дизелей, как многокомпонентных энергетических объектов).

Такое прогнозирование было выполнено для судна водоизмещением 5742 т с главным двигателем Vasa 6R32BC мощностью 1985 кВт. В состав СЭУ также входили вспомогательные дизель-генераторы с мощностью 190 кВт. Эксплуатационный период работы судна и СЭУ на момент проведения исследований составлял 14 лет. Анализу были подвержены основные элементы названных дизелей, в частности цилиндровые втулки, поршни, поршневые кольца, прецизионные пары топливной аппаратуры. Регламентируемые сроки работы названных узлов приведены в табл. 1, там же приведены изменения их основных геометрических параметров, которые выполнялись во время проведения технических осмотров. Динамика отклонения этих параметров показана на рис. 2. Следует отметить, что во всех случаях она имеет монотонный характер и может быть аппроксимирована степенной функцией.

Основываясь на полученных результатах рассчитаны значения среднего квадратичного отклонения фактического изменения контролируемого параметра от аппроксимирующей функции  $\sigma_z$ , а для случаев, когда оно не выполнялось, определена величина остаточного ресурса  $t_{\text{ост}}^{\min}$ . Полученные величины приведены в табл. 2.

В результате исследований, проведенных на базе статистического анализа для рассмотренной группы судов за период работы  $t_{\text{экспл}} = 1$  год, были определены реальные ("эксплуатационные") значения остаточного ресурса  $t_{\text{ост}}^{\min}$  и выполнено их сравнение со значениями, полученными аналитическим путем. Исследованиям были подвержены два однотипных главных, а также шесть вспомогательных двигателей. Согласно инструкции заводов изготовителей, эксплуатационный период

дизелей составлял 6000 часов (для главных) и 7200 часов (для вспомогательных) дизелей. Для некоторых СЭУ отклонение контрольных параметров, которые были выявлены в результате профилактических осмотров, превышали допустимые значения еще до завершения эксплуатационного периода.

Таблица 1

Основные параметры исследуемых элементов дизеля

| Наименование узла                                                      | Регламентируемое время работы, час | Контрольный параметр | Максимальное отклонение контрольного параметра от первоначальной величины, % |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Цилиндровая втулка                                                     | 12000                              | диаметр              | 1,6                                                                          |
| Поршень                                                                | 8000                               | диаметр              | 1,2                                                                          |
| Поршневое кольцо                                                       | 8000                               | ширина               | 0,85                                                                         |
| Прецизионная пара плунжер – втулка топливного насоса высокого давления | 5000                               | зазор в паре трения  | 0,45                                                                         |

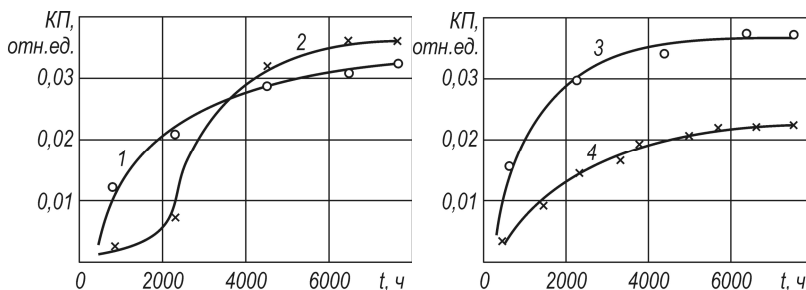


Рис. 2. Динамика изменения контрольного параметра КП от первоначальной величины (в относительных единицах) во времени  $t$ : 1 – диаметр цилиндрической втулки; 2 – диаметр поршня; 3 – ширина поршневого кольца; 4 – зазор в прецизионной паре плунжер – втулка топливного насоса высокого давления

На рис. 3 приведены номограммы, характеризующие данный процесс. Под величиной  $t_{\text{ост}}^{\min}$  понимается значение минимального остаточного ресурса, приведенного в табл. 2, а высоты столбцов диаграммы соответствует времени реального отклонения контролируемого

параметра от допустимого значения для различных дизелей. Эти отклонения прежде всего объясняются общим высоким эксплуатационным периодом работы СЭУ, а также особенностью ее проектирования. Так, дизели подобных моделей не проектировались на длительный период работы на тяжелых сортах топлива, а также на работу при постоянно меняющихся внешних условиях. Для обеспечения надежности работы СЭУ судовым экипажем были демонтированы поврежденные узлы до истечения эксплуатационного периода и, соответственно, остаточного ресурса работы.

Таблица 2

Определение остаточного ресурса работы основных элементов судовых дизелей

| Наименование узла                                                      | Наименование параметра        |                                 |                                            |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|
|                                                                        | $\sigma_z, \%$<br>(расчетное) | $\sigma_z, \%$ (действительное) | $t_{\text{ост}}^{\text{min}}, \text{ час}$ |
| Цилиндровая втулка                                                     | 4,2                           | 3,8                             | —                                          |
| Поршень                                                                | 3,7                           | 4,1                             | 1050                                       |
| Поршневое кольцо                                                       | 5,1                           | 5,3                             | 980                                        |
| Прецизионная пара плунжер – втулка топливного насоса высокого давления | 2,6                           | 2,3                             | —                                          |

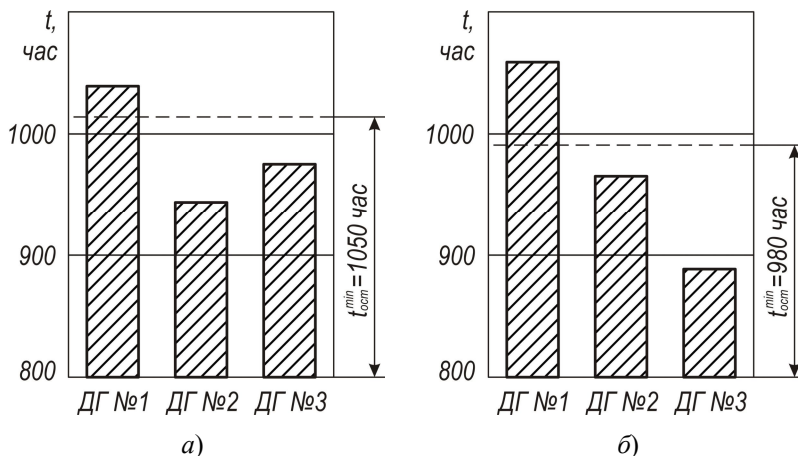


Рис. 3. Время достижения максимального отклонения контрольного параметра для различных дизелей: а) поршень; б) поршневое кольцо

Анализируя приведенные результаты можно сделать вывод о том, что для СЭУ, длительный период времени находящихся в эксплуатации, необходимо корректировать остаточный ресурс работы. Аналитически это может быть представлено выражением:

$$t_{\text{ост кор}}^{\min} = k_{\text{кор}} \cdot \frac{3,4\sigma_z^2 T_{\text{ср}}^2}{\alpha^2 U_{\text{п}}^2 t_{\text{к}}^{2\alpha-2} t_{\text{м}}},$$

где  $k_{\text{кор}}$  – коэффициент коррекции остаточного ресурса, который в зависимости от характеристик СЭУ может быть принят равным  $k_{\text{кор}} = 0,75 \dots 0,85$ .

Определяющими факторами при выборе  $k_{\text{кор}}$  являются обеспечение надежности и повышение экономичности работы СЭУ. Основываясь на анализе статистических данных по эксплуатации указанной выше СЭУ, его значение рекомендуется принять равным 0,83. Повышенные значения данного коэффициента обеспечивают меньшие затраты на ремонтные работы, связанные с заменой узлов СЭУ, при этом следует уделять внимание одновременному обеспечению требуемой безопасности и возможного уровня риска.

Таким образом, решение задачи оптимального уменьшения остаточного ресурса для дизелей, входящих в состав СЭУ, длительное время находящихся в эксплуатации, обеспечит снижение экономических затрат на обслуживание и ремонт, а также повысит надежность их работы и уровень управления рисками.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Б.В., Ханин С.М. Надежность судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1989. – 184 с.
2. Горб С. И. Тенденции развития технического обслуживания судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 12. – Одесса: ОНМА. – С. 26 – 35 с.
3. Горб С.И., Горб А.С. Оценка рисков в техническом менеджменте судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2012. – Вып. 18. Одесса: ОНМА. – С. 13 – 22.
4. Карпов Л.Н. Надежность и качество судовых дизелей. – Л.: Судостроение, 1975. – 232 с.
5. Надежность в технике. Методы определения допускаемого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин. ГОСТ 27.302 – 86. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 24 с.