

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ С БОЛЬШОЙ НАРАБОТКОЙ

*В.А. Сорокин, к.т.н., доц., зав. лабораторией
АО «Центральный научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт морского флота»*

Выполнен анализ эксплуатационных показателей судовых дизелей, имеющих значительную наработку с момента начала эксплуатации. Установлено, что среднестатистический срок эксплуатации судов близок к предельному, а большинство дизелей имеют суммарную наработку, близкую к назначенному ресурсу. Показано, что у дизелей, имеющих значительную наработку, есть резерв ресурса, позволяющий продолжить их дальнейшую эксплуатацию. Рассмотрены результаты эксплуатации дизелей с продленным ресурсом и риски возможных отказов.



На долю дизелей в составе судовых силовых установок приходится более 95 % по количеству и мощности от всех установленных на судах мирового флота двигателей, так как они в наибольшей степени соответствуют требованиям, предъявляемым к судовым энергетическим установкам (ЭУ).

Непрерывное развитие и совершенствование дизельных двигателей, значения достигнутых рабочих параметров позволяют считать их безальтернативной ЭУ на строящихся судах.

Рассматриваемые в статье вопросы ресурсных показателей касаются в большей мере среднеоборотных (СОД) и высокооборотных (ВОД) дизелей, так как малооборотные дизели (МОД) имеют назначенный ресурс до 200 тыс. ч, что обеспечивает им длительную эксплуатацию вплоть до списания судна.

Достигнутый уровень форсировки современных судовых дизелей обуславливает их высокую механическую и термическую напряженность, уровень которой определяет моторесурс дизеля и надежность его работы в эксплуатации [1].

Представленные материалы базируются на результатах анализа технических характеристик отечественных и зарубежных дизелей с большой наработкой, установленных на судах различного назначения.

В связи с тем, что в нормативной документации отсутствует определение понятия «большая наработка» в статье под этим термином подразумевается наработка двигателя в часах близкая или соответствующая назначенному ресурсу.

В настоящее время на судах отечественного флота установлены двигатели практически всех российских и ведущих зарубежных дизельстроительных фирм.

Средний возраст морских и речных судов, стоящих на учете в Российском морском регистре судоходства (РМРС) и Российском речном регистре (РРР), составляет более 25 лет. Значительная часть дизелей, установленных на судах, имеет большую или запредельную наработку, подвергалась капитальному ремонту и требует замены либо продления периода эксплуатации.

Суда, на которых установлены СОД и ВОД, для которых актуальны рассматриваемые вопросы, эксплуатируются в составе морского, рыболовного и речного флотов.

С учетом года изготовления объявленный моторесурс главных двигателей составляет: для СОД ~ 100 тыс. ч, для ВОД ~ 50 тыс. ч. Среднестатистическая годовая наработка главных двигателей судов рассматриваемого класса составляет 3–4 тыс. ч, что с учетом среднего возраста судов соответствует назначенному ресурсу.

В связи с этим перед судовладельцами стоит проблема выбора альтернативного варианта: либо замена двигателей, выработавших свой ресурс, либо продление срока их эксплуатации. Замена двигателей связана со значительными материальными затратами, которые далеко не все судовладельцы могут себе позволить, при этом отсутствует мотивация для установки нового двигателя на старое судно. Для продления срока эксплуатации двигателя сверх нормативного ресурсного срока необходимо разработать технико-экономическое обоснование и выполнить опре-

деленные требования, часть из которых будет рассмотрена ниже.

Последние два десятилетия отмечены неблагоприятным состоянием отечественного судового дизелестроения, связанного с целым комплексом проблем.

В связи с повышением оснащенности и энерговооруженности судов, а также ужесточением требований международных организаций (ИМО, МАКО и др.) к их конструктивной, экологической и эксплуатационной безопасности значительно возросли требования к техническому уровню судовых дизелей. Поэтому исследования, связанные с разработкой предложений по продлению срока службы судовых дизелей, выработавших свой ресурс, приобретают особую актуальность [2].

Современный судовый дизель представляет собой сложную систему взаимосвязанных узлов, агрегатов и механизмов. Отказ каждого из этих элементов может вызывать разнообразные аварийные ситуации. Известно, что количество отказов и аварии двигателей связано с их наработкой и ресурсом.

Основными причинами отказов и аварий являются:

- усталостные изменения материала корпусных деталей, деталей движения и силовых элементов;
- износ поверхностей сопряженных деталей (валов, подшипников, деталей КШМ);
- повышенная вибрация, приводящая к износу сопряжений, нарушению режима смазки, а также к нарушению регулировок;
- термические напряжения, возникающие вследствие значительных градиентов температур и приводящие к появлению трещин или разрушению (прогару) деталей двигателя;
- снижение уровня технического обслуживания судовых силовых установок.

Непрерывное повышение сложности судов и судовых дизелей при неизменном, а порой снижающемся уровне их надежности ведет к повышению вероятности существенных отказов, повреждений и аварий по техническим причинам, т. е. увеличивает риск морского судоходства. При этом аварийные случаи сопровождаются большими экономическими потерями и угрозой жизни людей, окружающей среды и перевозимого груза. С другой стороны, полностью исключить риск из практики судоходства невозможно — это принципиально недостижимая цель. Поэтому основные усилия по поддержанию надлежащего уровня безопасности мореплавания должны быть направлены на снижение вероятности аварий и отказов.

Наметившаяся в последние годы тенденция к снижению надежности судовых дизелей, вызванная стремлением судовладельцев снизить

затраты эксплуатацию флота при одновременной интенсификации его работы, указывает на необходимость ужесточения контроля за их техническим состоянием с позиций безопасности мореплавания. При этом повышается роль таких независимых органов надзора, как РМРС и РРР.

Назначенный ресурс дизеля устанавливается его изготовителем и отражен в технической документации. Ресурс дизеля устанавливается на основании ресурсных испытаний, требований стандартов, общих норм безопасности, правил и требований проектирования, класса и назначения дизеля, а также других факторов. Как правило, ресурс дизеля уточняется по результатам эксплуатации, при этом основными критериями для его назначения являются:

- частота вращения коленчатого вала;
- уровень форсировки дизеля (по среднему эффективному давлению) и условия его работы;
- конструктивное и технологическое совершенство дизеля.

Назначенный ресурс до капитального ремонта или списания устанавливается как суммарная наработка дизеля в часах с начала эксплуатации. Большим уровням форсировки по мощности и частоте вращения соответствуют меньшие ресурсы.

В 2014 г. Международная Ассоциация классификационных обществ (МАКО) установила классификацию судовых дизелей по частоте вращения, которая представлена в табл. 1.

Динамика выпуска дизелей и направления технического прогресса в значительной степени определяются конъюнктурой в мировом судоходстве и судостроении.

Надежность и ресурс дизелей закладывается при проектировании, создается при изготовлении, сохраняется и расходуется (реализуется) при эксплуатации [3].

Жизненный цикл дизеля можно условно разделить на три этапа: приработка, стабильный период, старение.

Старение — заключительный этап выработки ресурса, который характеризуется прогрессивными износами и усталостными изменениями свойств металла. На этом этапе дизель должен быть

Таблица 1

Классификация по частоте вращения	Частота вращения к/в n , об/мин	Назначение
Малооборотные (МОД)	$n \leq 300$	Главные
Среднеоборотные (СОД)	$300 < n \leq 1400$	Главные, вспомогательные для судовых электростанций
Высокооборотные (ВОД)	$n > 1400$	Главные, вспомогательные, аварийные

выведен из эксплуатации для восстановления или замены.

Анализ надежности судовых дизелей показывает, что из-за существующих различий в условиях эксплуатации с наложением различных случайных факторов каждый двигатель даже одного и того же типа по параметрам надежности индивидуален. Важным аспектом в оценке надежности, как показано ниже, являются режимы работы двигателя.

При назначении показателей долговечности дизелей широко распространена практика, в соответствии с которой фирмы-производители судовых дизелей по важнейшим деталям и узлам задают два вида наработок:

- интервалы проведения ТО или контроля;
- сроки службы деталей после проведения разовых или многократных обслуживаний.

При этом, как правило, оговаривается сорт применяемого топлива и смазочного масла.

Ресурс дизелей гарантируется только при соблюдении требований инструкции по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту.

Признаками неудовлетворительного состояния дизелей вследствие износа являются увеличенные зазоры, ухудшение состояния рабочих поверхностей, снижение мощности, повышение расхода топлива, увеличение дымности отработавших газов, снижение давления масла в системе смазки, изменение регулировок рабочих параметров. Все это свидетельствует о значительной наработке дизеля, при этом одним из основных критериев оценки остаточного ресурса остается суммарная наработка двигателя с начала эксплуатации.

Процесс деградации основных деталей дизеля происходит по сложным закономерностям, отражающим в первую очередь условия его эксплуатации.

Значение назначенного ресурса дизеля в часах не всегда отражает степень его фактического износа. Практически всегда имеется возможность эксплуатации дизеля за пределами назначенного ресурса до достижения предельного технического состояния основных (базовых) деталей.

В судовой дизельной установке базовыми деталями являются: фундаментная рама, коленчатый вал и блок цилиндров двигателя. Долговечность базовых элементов обеспечивается, как правило, на весь срок службы дизеля. Остальные детали могут быть заменены несколько раз за время эксплуатации.

Базовые детали главных судовых МОД служат на протяжении полного жизненного цикла дизеля без капитального ремонта. СОД и ВОД до выработки назначенного ресурса по крайней мере один раз подвергаются капитальному ремонту в соответствии с рекомендациями (ремонт-

ными циклами) производителя. В табл. 2 представлены усредненные ресурсные показатели деталей и узлов современных судовых дизелей.

В то же время анализ статистики аварий механического оборудования на судах отечественного флота показывает, что их наибольшее число приходится на главный двигатель. По своим последствиям наиболее тяжелыми являются аварии, связанные с поломками коленчатого вала, подшипников, деталей цилиндропоршневой группы и механизма газораспределением.

Причинами аварий и отказов, как было отмечено выше, являются механические, тепловые, усталостные разрушения и износы деталей вследствие воздействия знакопеременных циклических нагрузок.

Деформация деталей (особенно базовых), возникающая при эксплуатации дизеля, во многих случаях оказывает большее влияние на долговечность дизеля, чем возникающие при эксплуатации износы.

Рассмотрение теоретических работ по прогнозированию остаточного ресурса дизелей показывает, что с учетом сложности математического описания процессов, а также погрешностей при аналитическом решении уравнений эти методы не нашли широкого применения [4].

После выработки судовым дизелем назначенного ресурса Регистр Судоходства является един-

Таблица 2

Усредненные ресурсы основных деталей и узлов современных судовых дизелей

Наименование узла	Средний ресурс, не менее тыс. ч		
	МОД	СОД	ВОД
Ресурс дизеля назначенный	100–200	60–100	20–50
Ресурс дизеля до капитального ремонта	—	30–50	10–30
Фундаментная рама, коленчатый вал, блок цилиндров, шток поршня, шатун, распределительный вал, крышка цилиндра	100–200 и выше	50–100	20–40
Втулки цилиндра, поршень	60	40	10–20
Поршневые кольца	10–15	8–12	6–10
Коренной и шатунный подшипники	60	40	10–20
Выпускной клапан	30	20	10
Топливный насос	25	15	10
Форсунка: игла с направляющей и сопло распылителя	15	15	6–10
Турбокомпрессор	60–80	40–50	15–20
Ответственные крепежные элементы (болты, анкерные связи, шпильки крепления подшипников, крышки цилиндров и др.)	100–200	30–100	10–40

ственным надзорным органом, который по результатам освидетельствования может дать разрешение на его дальнейшую эксплуатацию. Поэтому важно подчеркнуть, что дальнейшая эксплуатация может быть разрешена только при надлежащем техническом состоянии дизеля.

Необходимо помнить, что вероятность отказов с увеличением наработки дизеля возрастает (появляются деградационные отказы) что должно сопровождаться адекватным усилением надзора со стороны инспекторов РМРС.

Критерии предельного состояния предусматривают, что ресурс дизеля исчерпан, если:

- дизель полностью отработал назначенный ресурс до списания;
- достиг предельного состояния один из базовых элементов дизеля: фундаментная рама, коленчатый вал, блок цилиндров.

Под предельным понимается такое состояние базовых деталей дизеля, при котором их восстановление невозможно или экономически нецелесообразно.

В критериях состояния судовых дизелей определено, что поломки любого другого компонента (не базового) не является предельным состоянием. При возникновении ресурсных отказов отдельных компонентов их замена производится во время технического обслуживания или ремонта.

Переход дизеля в предельное состояние указывается в технической документации: в технических условиях на поставку дизеля либо в инструкциях по техническому обслуживанию. При достижении дизелем предельного состояния принимается решение либо о прекращении его эксплуатации, либо о проведении соответствующих ремонтно-восстановительных работ. Вид мероприятий, определяющих необходимость их выполнения, и критерии предельных состояний взаимобусловлены.

Ресурсные отказы судовых дизелей в эксплуатации носят постепенный (монотонный) или внезапный (аварийный) характер.

Доля постепенных отказов, которые идентифицировались с момента достижения параметров предельного значения, составляет основную часть — до 80–90 % от их общего количества. Опыт эксплуатации судовых дизелей показывает, что своевременно не устраненные постепенные отказы в большинстве случаев трансформируются во внезапные с гораздо более тяжелыми последствиями.

Доля внезапных технических отказов дизелей составляет 10–20 %. Причинами внезапных отказов дизелей являются механические разрушения и повреждения базовых и ответственных деталей и узлов. Типичной причиной внезапного отказа могут оказаться трещины различного проис-

хождения (усталостные, коррозионно-усталостные, термоусталостные и др.). Поэтому при продлении ресурса дизеля, в первую очередь должны быть приняты все необходимые меры для предотвращения внезапных отказов.

При обосновании возможности продолжения эксплуатации дизеля после выработки назначенного ресурса необходимо учитывать режимы его работы.

Как известно, расчетным режимом работы дизеля является номинальный (MCR — maximum continuous rating), на котором реализуется мощность без ограничения по времени. Для гарантированной надежной работы двигателя (его деталей, узлов) в эксплуатации необходимо, чтобы уровень их механических нагрузок не превышал аналогичные значения для номинального режима.

При работе двигателя напряжения, которые испытывают детали и узлы, пропорциональны силам давления газов в цилиндре (p_{\max}) и силам инерции движущихся масс (P_{jn}) для установившегося режима работы двигателя. Указанные силы достигают своего максимума в районе ВМТ, где они разнонаправлены. Выражение для определения максимальной движущей силы ($P_{\text{дв}}^{\max}$) будет иметь вид

$$P_{\text{дв}}^{\max} = p_{\max} - P_{jn} = p_{\max} - \mu_j K_j n^2, \quad (1)$$

где μ_j — коэффициент, учитывающий несовпадение моментов (углов °ПКВ) действия p_{\max} и P_{jn} ; $K_j = m_{ms} R (1 + \lambda) = \text{const}$ для каждого двигателя, m_{ms} — масса поршня в сборе и части шатуна; $\lambda = R/L$, R — радиус кривошипа, L — длина шатуна.

Поправочный коэффициент μ_j может быть рассчитан по формуле

$$\mu_j = P_{j\text{ВМТ}} \text{ и } P_{j\alpha_z}, \quad (2)$$

где $P_{j\text{ВМТ}}$ и $P_{j\alpha_z}$ — силы инерции поступательно движущихся масс в ВМТ и при угле ПКВ α_z ; α_z — угол ПКВ, при котором p_{\max} достигает максимума; β_z — угол отклонения шатуна от вертикальной оси при угле α_z .

В существующих конструкциях двигателей значения поправочного коэффициента составляет $\mu_j = 0,89–0,96$, и его учет позволяет уточнить расчетное значение движущей силы.

Согласно выражению (1) были выполнены оценочные сравнительные расчеты изменения максимального движущего усилия для различных режимов работы современных главных малооборотных двигателей фирм «MAN Diesel & Turbo» и «Wartsila Corporation» при работе на винт фиксированного шага.

Результаты расчетов приведены в (табл. 3). Можно отметить, что детали и узлы двигателя

Таблица 3

Ход судна	Относительная нагрузка двигателя (от номинального значения)	Относительная частота вращения (от номинального значения)	Относительное значение максимальной движущей силы (от номинального значения)
Малый	0,25	0,63	0,65
Средний	0,50–0,60	0,80–0,85	0,80–0,85
Полный	0,80–0,90	0,92–0,95	0,90–0,95
Самый полный	1	1	1

остаются достаточно нагруженными при всех эксплуатационных режимах. Однако при эксплуатации дизеля на режимах, отличных от MCR, появляется резерв моторесурса.

Во время эксплуатации развиваемая дизелем мощность колеблется в широких пределах — от холостого или малого хода до номинальной. Спектр нагрузок (мощность) главного судового дизеля определяется назначением судна, технической политикой, проводимой судовладельцем, техническим состоянием судна, коммерческой целесообразностью, конъюнктурой и другими факторами.

Исследования спектра нагрузок судовых дизелей разных типов позволили установить следующие их особенности:

- средние эксплуатационные нагрузки двигателей различных типов существенно различаются и составляют: для ГД — 60–80 % от номинальной; ДГ — 50–70 % от номинальной;

- механические и тепловые нагрузки различаются не только по средним значениям, но и по их числу, величинам и амплитудам как в переходных процессах, так и при квазистационарном нагружении.

Статистический анализ показывает, что главные дизели транспортного флота в среднем эксплуатируются на следующих режимах:

- полного хода — 60–75 %, среднего хода — 5–12 %;

- малого хода — 1–5 %, маневров — 3–5 %, долевые режимы — остальное.

Следует отметить, что в связи с использованием экономичных режимов хода в целях реализации рекомендаций по сокращению выбросов парниковых газов с судов доля режимов полного хода и значения коэффициента использования мощности дизелей значительно снижаются.

Анализ времени работы судов ОАО «Новороссийское морское пароходство» за последние годы показал, что средняя эксплуатационная мощность двигателей в 2009 г. составляла 85 %

от MCR, в то время как в 2011 г. ее значение снизилось до 50–55 % [5]. Причем отмечено увеличение движения судов экономичными и ультрамалыми ходами при скорости до 8 узлов и мощностью ГД 15–30 % от MCR. При эксплуатации ГД со средней мощностью около 50 % от MCR появляется существенный резерв для увеличения ресурса. Это обстоятельство позволяет реализовать появившийся резерв моторесурса после выработки дизелем назначенного ресурса.

Время превышения эксплуатационного периода относительно назначенного ресурса зависит от многих факторов, часть из которых рассмотрены в настоящей статье.

Срок эксплуатации главного двигателя в нормативных документах РМРС не регламентируется. Соответствие главного двигателя требованиям Правил РМРС определяется по результатам его ежегодных и очередных освидетельствований. Между освидетельствованиями ответственность за поддержание судовых технических средств в рабочем состоянии, а также выполнение технического обслуживания и ремонта в соответствии с рекомендациями производителя несет судовладелец судна.

Невозможность дальнейшей эксплуатации дизеля определяется возникновением неустранимых отказов, вызывающих прекращение его функционирования. Признаки (критерии) перехода дизеля и его элементов в предельное состояние указываются в нормативно-технической и/или проектной документации на дизель.

Типичной причиной внезапного отказа являются трещины различного происхождения (усталостные, коррозионно-усталостные, термоусталостные и др.), которые практически невозможно заранее прогнозировать [6]. Поэтому в эксплуатации, особенно при освидетельствовании дизеля, в целях продления ресурса в первую очередь должны быть приняты все необходимые меры по предотвращению внезапных отказов. При освидетельствовании дизелей средствами неразрушающего контроля должны быть проверены все базовые и ответственные детали на отсутствие дефектов.

После выработки дизелем назначенного ресурса допуск его к дальнейшей эксплуатации решается после положительных результатов (вне) очередного освидетельствования и удовлетворительном (годном) техническом состоянии дизеля.

Отказ главного двигателя (основного элемента СЭУ) чаще всего оказывает существенное влияние на функционирование судна. Поскольку наиболее распространенными являются одновинтовые суда с одним ГД, то его отказ прямо влечет

за собой остановку судна в море с потерей хода и управляемости. При наличии на судне двух (или более) главных двигателей последствия отказа могут быть не так велики, но остаются серьезными, так как судно не может полноценно функционировать. Так, по данным наблюдений японского исследовательского института морского флота [7], ГД — источник повышенной опасности, его отказы, как правило, вызывают аварийные происшествия и ущерб большого масштаба, нередко заканчивающиеся необратимыми последствиями, которые в трактовке ИМО называются авариями. Возможны также и катастрофы с судами из-за отказа ГД.

Опыт автора в расследовании в качестве эксперта последствий аварий судовых дизелей, произошедших после выработки ими назначенного ресурса, показал, что их причинами являются:

- превышение в 1,5–1,8 эксплуатационного периода (наработки) относительно назначенного ресурса;

- появление дефектов ответственных (базовых) деталей и узлов двигателя, которые не могут быть выявлены и устранены судовым экипажем в процессе эксплуатации.

Причинами неустраненных дефектов являются усталость металла, скрытые трещины, остаточные деформации, старение, коррозия, интенсивные износы, фреттинг-коррозия.

В данный период эксплуатации резко возрастает влияние человеческого фактора, связанного с ошибками, невыполнением рекомендаций по ТО и ПГТО, нарушением правил технической эксплуатации. Практически во всех случаях аварии в той или иной степени были связаны с человеческим фактором.

Для обеспечения дальнейшей надежности и безопасной эксплуатации судовых дизелей, выработавших назначенный ресурс, можно рекомендовать следующий алгоритм действий:

- запросить производителя дизеля о возможном продлении эксплуатационного цикла и необходимости выполнения требуемых процедур (при их наличии);

- согласовать вопрос продления эксплуатации с инспекцией РМРС;

- выполнить капитальный ремонт двигателя с предъявлением его РМРС и при необходимости — специалистам завода-изготовителя;

- после выработки двигателем назначенного ресурса его эксплуатация должна быть прекращена независимо от технического состояния;

- возможность дальнейшей эксплуатации двигателя после выработки назначенного ресурса является предметом специального рассмотрения РМРС в каждом конкретном случае с учетом всех

обстоятельств, включая в первую очередь наработку и режимы нагружения;

- прогнозирование величины остаточного ресурса имеет сугубо индивидуальный характер для каждого дизеля и связано с очевидными трудностями решения неоднозначной вероятностной задачи;

- назначенные предельные ресурсы и сроки службы могут быть увеличены на 30–80 % с учетом режимов нагружения и состояния базовых деталей;

- после выработки дизелем назначенного ресурса допуск его к дальнейшей эксплуатации должен решаться после определения технического состояния при каждом (вне) очередном освидетельствовании;

- при освидетельствовании дизеля должны быть проверены средствами неразрушающего контроля все базовые и ответственные детали на отсутствие дефектов;

- при принятии решения о продлении срока эксплуатации должны быть учтены следующие факторы:

- общее техническое состояние дизеля и его базовых и ответственных деталей;

- состав и комплектация машинной установки (одно- или многовальная), наличие передачи и т. п.;

- условия эксплуатации: нагрузочные и переменные режимы, их распределение и динамика;

- выявлены «слабые» узлы и приняты меры по предотвращению их отказов в эксплуатации.

Литература

1. Сорокин В.А. Производство современных среднеоборотных судовых дизелей // Двигателестроение. — 2013. — № 3. — С. 3–8.
2. Сорокин В.А. Инновации в судовом дизелестроении // Судостроение. — 2013. — № 5. — С. 34–38.
3. Камкин С.В., Возницкий И.В., Шмелев В.П. Эксплуатация судовых дизелей. — М.: Транспорт, 1990. — 344 с.
4. Румб В.К., Медведев В.В., Серов А.В., Хижняк А.А. Применение методики по формализованной оценке безопасности для определения остаточного ресурса главного судового дизеля // Судостроение. — 2005. — № 5. — С. 42–47.
5. Зиненко Н.Н. Совершенствование эксплуатации судовых малооборотных двигателей на основе контроля параметров и концентрации вредных веществ в отработавших газах: дис. ... канд. техн. наук. — Новороссийск, 2013. — 133 с.
6. Румб В.К., Медведев В.В., Семионичев С.П. Определение остаточной долговечности деталей судовых ДВС при наличии трещин // Морской вестник. — 2003. — Специальный выпуск № 1 (1). — С. 76–80.
7. Kiriya N. Statistical Study on Reliability of Ship Equipment and Safety Management Reliability Estimation for Failures on Main Engine System by Ship Reliability Database System/Bulletin of the JIME. — 2001. — vol. 29. — № 2.