

Ю.Н. Мясников¹, В.С. Никитин¹, А.А. Равин²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ И ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Объект и цель научной работы. Объектом работы являются судовые дизельные и газотурбинные двигатели, входящие в состав судовых энергетических установок в качестве главного двигателя или дизель-генератора. Цель работы заключается в выявлении актуальных диагностических задач на основе исследования эксплуатационных дефектов элементов судовых двигателей.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов используется научно-техническая информация, которая представлена в трудах, посвященных анализу эксплуатационной компоненты жизненного цикла судовых энергетических установок, а также личные наработки и многолетний опыт проведения НИОКР в области обеспечения надежности сложных энергомеханических систем.

Основные результаты. Установлены основные причины отказов оборудования судовых дизельных и газотурбинных установок, которые позволяют оптимизировать перечень задач, решаемых системами централизованного контроля и мобильной диагностической аппаратурой.

Заключение. Скрытое от персонала развитие эксплуатационных дефектов (вплоть до наступления критической стадии) является основной причиной отказов и аварий судовых двигателей. Можно утверждать, что развитие и совершенствование методов и средств эксплуатационной диагностики и предремонтной дефектации судовых дизелей и морских газотурбинных двигателей позволит оптимизировать обслуживание двигателей и снизить вероятность отказов и аварий.

Ключевые слова: судовой дизельный двигатель, морской газотурбинный двигатель, техническая диагностика, дефект, отказ оборудования.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Мясников Ю.Н., Никитин В.С., Равин А.А. Эксплуатационные дефекты судовых дизельных и газотурбинных двигателей. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 3(385): 85–96.

УДК 629.5.03.004

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-85-96

SHIP POWERPLANTS

Yu.N. Myasnikov¹, V.S. Nikitin¹, A.A. Ravin²

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² State Marine Technical University of St. Petersburg, Russia

SERVICE DEFECTS OF SHIP DIESEL AND GAS-TURBINE ENGINES

Object and purpose of research. This study deals with shipboard diesel and gas-turbine installations intended for ship propulsion or diesel-generator functions. The purpose is to identify critical diagnostic tasks by analyzing engine service defects.

Materials and methods. The input data for the study are taken from research and engineering information available from papers analyzing the operation phase of ship's powerplant lifecycle, as well as personal experience and multi-year research into reliability aspects of sophisticated mechanical power-generation systems.

Main results. The main causes of malfunctions have been identified for ship diesel and gas-turbine engines, which makes it possible to optimize the trouble-shooting checklists for centralized and mobile diagnostic systems.

Conclusion. Latent development of in-service (sometimes hazardous) defects is the main cause of failures and accidents with shipboard engines. It can be taken as a fact that further refinement and improvement of methods and tools for diagnostics and pre-repair inspections of marine diesel and gas-turbine engines will optimize the maintenance efforts and reduce the risks of malfunctions and accidents.

Key words: ship diesel engine, marine gas-turbine engine, technical diagnostics, defect, equipment failure.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Myasnikov Yu.N., Nikitin V.S., Ravin A.A. Service defects of ship diesel and gas-turbine engines. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 2(384): 85–96 (in Russian).

UDC 629.5.03.004

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-85-96

Введение

Introduction

Стремление к повышению эффективности судовой энергетики предполагает, с одной стороны, увеличение удельных мощностей и коэффициентов полезного действия энергетического оборудования за счет применения более сложных схем и конструкций энергомеханических устройств и форсирования протекающих в них рабочих процессов, а с другой, снижение затрат на устранение последствий внезапных отказов и аварий за счет повышения уровня эксплуатационной надежности энергетического оборудования. Необходимость кардинального решения этой противоречивой совокупности задач сделала актуальным внедрение в практику эксплуатации судового энергетического оборудования информационных технологий, в том числе диагностических комплексов.

Техническая диагностика – это область науки и техники, изучающая и разрабатывающая методы и средства определения и прогнозирования технического состояния различных механизмов, машин и оборудования без их разборки. Опыт разработки и применения средств технической диагностики свидетельствует о том, что наибольший эффект достигается в том случае, если определение рациональной глубины диагностирования и формирование перечня диагностических задач производится с учетом конструктивных особенностей и характерных эксплуатационных дефектов диагностируемого оборудования. В данной статье принята попытка анализа соответствующей симптоматики (как говорят медики, которым мы и обязаны возникновением термина «диагностика») с целью выделения актуальных диагностических задач для двух типов судовых двигателей – дизельного и газотурбинного.

Анализ опыта эксплуатации судовых дизелей

Analysis of in-service experience for ship diesel engines

В основу анализа положены данные, накопленные при ремонте дизелей, в частности сведения о наиболее характерных отказах деталей и элементов судовых дизельных установок, а также о возможных причинах возникновения и развития типичных неисправностей [1–12].

Отказы оборудования судовых дизельных установок могут иметь различное происхождение:

- специфические проектные особенности конкретного типа двигателя, не характерные для других типов дизелей и устранимые путем внесения соответствующих изменений в конструкцию дизеля;
- неправильная эксплуатация дизеля (ошибочное применение не соответствующих нормативам сортов топлива и масел, нерасчетные перегрузки и т.п.);
- внезапные отказы в результате изготовления деталей из некачественных материалов, применения дефектных деталей, а также существенных нарушений технологии монтажа и регулировки.

Предотвращение отказов, вызываемых вышеуказанными причинами, обеспечивается устранением ошибок при проектировании, совершенствованием технического контроля, соблюдением инструкции по эксплуатации и другими организационными мероприятиями, рассмотрение которых выходит за рамки настоящей статьи.

В данной работе внимание сосредоточено на неисправностях и дефектах, развитие которых обусловлено естественной деградацией оборудования под действием нагрузок, сопровождающих

Рис. 1. Классификация деталей судового дизеля

Fig. 1. Classification of shipboard diesel parts



рабочие процессы дизеля и его систем, а также дополнительными ускоряющими факторами (загрязнение воды, масла, топлива, увеличение люфтов и зазоров и т.п.), достаточно вероятными при длительной эксплуатации дизельных установок различных типов.

Детали и узлы двигателя внутреннего сгорания, применительно к которым проведен анализ, объединены в функциональные группы (рис. 1).

Фундаментные рамы и поддоны

Эти детали во время эксплуатации подвергаются длительному воздействию поля напряжений, неравномерность которого вследствие деформаций корпуса судна и фундамента или неравномерного обжатия креплений может приводить к постепенному накоплению пластических деформаций фундаментной рамы (стальной), а также к развитию трещин на плоскости разъема с блоками или станинами, в силовых перегородках и лапах для крепления к судовому фундаменту (в рамах из чугуна и алюминиевых сплавов). Трещинообразование может инициироваться механическими повреждениями и литейными дефектами.

Микроскопические возвратно-поступательные перемещения коренных подшипников в постелях в сочетании с возможным наклепом и длительным воздействием влаги и кислорода вызывают фреттинг-коррозию постелей коренных подшипников, развитие которой приводит к смещению вкладышей коренных подшипников и нарушению их соосности.

Блоки, станины, картер

Блоки, станины и картеры вместе с рамой образуют герметичный остов дизеля, детали которого во время эксплуатации подвергаются статическим и динамическим нагрузкам. Длительное воздействие напряжений в сочетании с начальными микродефектами структуры конструкционных материалов инициирует развитие трещин в основаниях и на боковых поверхностях, в опорных посадочных поясах, в приливах для гнезд под шпильки для крепления цилиндров. Продолжительное влияние статических растягивающих напряжений может стать причиной ползучести материала болтов и шпилек и ослабления креплений вследствие релаксации. Ослабление креплений создает условия для циклических относи-

тельных смещений деталей, в результате которых развиваются наклеп и износ плоскостей разъема. Кроме того, некоторые зоны, например стенки полостей охлаждения, подвергаются воздействию коррозионных процессов, вызывающих местные очаговые разрушения.

Поршни, пальцы и кольца

Поршни дизеля во время его работы подвергаются сложному комплексу нагрузок:

- головка поршня испытывает циклическое воздействие ударных нагрузок и термонапряжений, связанных с резким повышением давления и температуры в рабочей полости и наличием примененных градиентов температур между рабочей и охлаждаемой поверхностями;
- доньшко поршня контактирует с высокотемпературными газами, содержащими продукты неполного сгорания топлива;
- тело поршня и кольца образуют пары трения с гильзой;
- пальцы испытывают ударные поперечные нагрузки и образуют пары трения с головкой шатуна, передающие большие поперечные усилия при малых скоростях относительного перемещения.

Следствием интенсивных эксплуатационных нагрузок являются процессы деградации технического состояния:

- коррозия поверхностей трения поршней в результате соприкосновения с агрессивными средами или их парами;
- выгорание и сдувание металла с доньшка поршня;
- отложения в полости охлаждения поршней, коррозия внутренней поверхности головки (при водяном охлаждении);

- интенсивное изнашивание тела поршня;
- трещины в головке поршня;
- чрезмерная выработка и выкрашивание канавок под поршневые кольца;
- интенсивное изнашивание колец;
- потеря упругости, закоксовывание и поломка колец;
- усталостные трещины и поломки пальцев;
- ослабление шпилек крепления головки в результате их вытяжки.

Ряд характерных дефектов поршней, колец и пальцев показан на рис. 2, 5 (см. вклейку)

Втулки и крышки цилиндров

Втулка – ответственный элемент дизеля, к которому предъявляются достаточно жесткие требования по точности геометрических размеров, качеству материала, прочности и долговечности. Во время эксплуатации дизеля материал втулок находится в сложном напряженном состоянии, обусловленном циклическими силовыми нагрузками и термонапряжениями, вызываемыми градиентами температур, изменяющимися в зависимости от режима работы дизеля.

Внутренняя (рабочая) поверхность втулки образует пару трения с поршнем и кольцами. Для внутренней поверхности втулок дизелей характерно неравномерное распределение по высоте степени износа. Наружная охлаждаемая поверхность может подвергаться воздействию кавитации и коррозии. Интенсивность этих процессов зависит от ряда факторов, в том числе от температуры охлаждающей воды.

Эксплуатационные нагружения в сочетании с возможными нарушениями технологии сборки и начальной дефектностью материала, загрязнением масла и охлаждающей воды, наличием вредных примесей в топливе и низким качеством его распы-

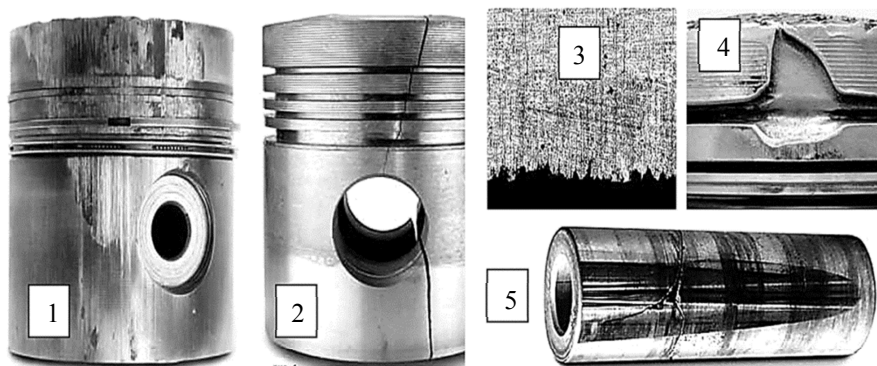


Рис. 2. Повреждения деталей поршневой группы: 1, 2 – задиры поверхности и трещины в поршне; 3, 4 – износ поверхности поршневого кольца и «вымывание» материала поршня при поломке поршневого кольца; 5 – трещины в поршневом пальце

Fig. 2. Damage of piston block parts: 1, 2 – surface gallings and fractures in piston; 3, 4 – surface wear of piston ring and "washing-out" of piston material due to piston ring failure; 5 – fractures in piston ring

ла вызывают развитие разнообразных процессов деградации технического состояния:

- возникновение усталостных микротрещин на теле втулки, развитие макротрещин в районе верхнего посадочного бурта, откалывание кромок продувочных и выпускных окон;
- деформация втулки;
- износы рабочей поверхности втулки (натиры на зеркале втулки, микрозадиры и микроизносы зеркала, неравномерный износ зеркала);
- выкрашивание азотированного слоя, ступенчатая выработка в зоне остановки верхнего поршневого кольца;
- кавитационный и коррозионный износ наружной поверхности втулки.

Крышки цилиндров работают в тяжелых условиях, обусловленных высокими температурами и пульсациями температур и давлений. Изменения температурных и силовых полей при изменении режима работы двигателя (пуски, остановки, реверсы, изменения мощности) и агрессивные воздействия продуктов сгорания и вредных примесей также сказываются на долговечности этих деталей.

Характерные виды дефектов крышек цилиндров:

- возникновение и развитие трещин в дне крышки со стороны камеры сгорания, вокруг отверстий под форсунки и пусковые клапаны;
- коробление;
- коррозия и выгорание рабочей поверхности;
- нарушение герметичности цилиндра из-за удлинения шпилек крепления.

Ряд типичных повреждений втулок и крышек показан на рис. 3 (см. вклейку).

Газовыпускные коллекторы и продувочные ресиверы

Основными факторами, определяющими эксплуатационные изменения деталей газовыпускной системы, являются накопление несгоревших остатков топлива и масла и циклические деформации компенсаторов. В продувочной системе наибольшие нагрузки испытывают телескопические устройства и сальники уплотнения штока из-за трения вследствие возвратно-поступательного движения и гидравлических ударов при движении поршня вниз.

Характерные изменения технического состояния:

- развитие трещин в компенсаторах газовыпускной системы и в трубах телескопического устройства;

- износ уплотнений штока поршня и телескопических устройств;
- износ труб телескопического устройства.

Коленчатые валы и противовесы

Основные эксплуатационные факторы, определяющие возможность длительного сохранения работоспособности коленчатых валов:

- циклическое воздействие изгибно-крутильных нагрузок;
- трение шеек в коренных и шатунных подшипниках;
- коррозионное воздействие окружающей среды.
- попадание воздуха в масло, ухудшающее устойчивость масляного клина.

Характерные процессы деградации технического состояния:

- возникновение и развитие усталостных трещин в местах концентрации напряжений (рис. 3, см. вклейку);
- износ шеек, ускоряющийся при загрязнении и аэрации масла;
- коррозия шеек, ускоряющаяся при обводнении и окислении масла.

Для противовесов характерным дефектом является ослабление креплений вследствие релаксации резьбовых соединений.

Распределительный вал

Распределительные валы дизелей выполняют различные функции: управляют газораспределением, подачей топлива, распределением пускового воздуха. Наиболее нагруженными элементами распредвалов являются кулаки (циклическое воздействие контактных напряжений) и шейки (трение в подшипниках). Характерные виды деградации технологического состояния распределительных валов:

- усталостный износ, выкрашивание, истирание рабочей кулаков (рис. 3, см. вклейку);
- износ шеек;
- коррозия рабочих поверхностей кулаков и шеек.

Впускные и выпускные клапаны и седла, приводы клапанов

Клапаны и седла как наиболее напряженные элементы дизеля работают в условиях значительных градиентов и резких изменений температуры,

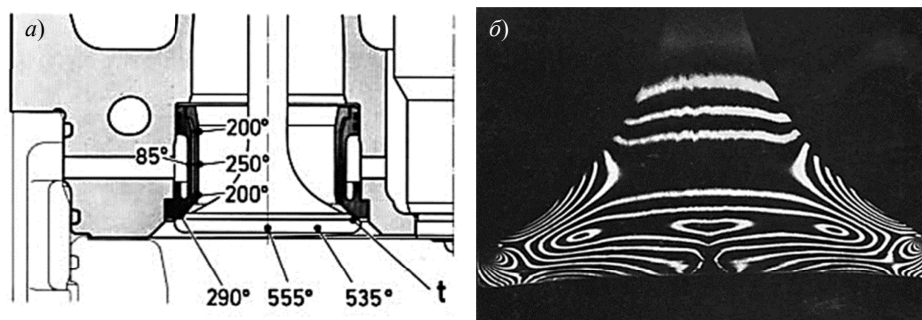


Рис. 4. Температурное поле клапана и седла (а) и распределение напряжений в тарелке дизельного клапана (б)

Fig. 4. Thermal field of valve and seat (a) and stress distribution in diesel valve plate (b)

а также химических и механических воздействий (рис. 4).

Характерные неисправности:

- развитие усталостных трещин, вызванных механическими ударными воздействиями и температурными напряжениями;
- коробление, коррозионное повреждение, выгорание тарелок (рис. 3(7));
- изнашивание, наклеп фасок;
- коррозия и механические повреждения седел (рис. 3(6));
- износ кулаков клапанов.

Ряд характерных повреждений седел и клапанов показан на рис. 3 и 5 (см. вклейку).

Коренные, шатунные и головные подшипники

На судовых дизелях в качестве коренных, шатунных и головных подшипников в основном используют подшипники скольжения (вкладыш или заливка антифрикционного материала). Основные эксплуатационные факторы, вызывающие деградацию технического состояния:

- динамические силовые нагрузки;
- трение рабочих поверхностей (окружная скорость – до 50 м/с);
- коррозионное, эрозионное и кавитационное воздействие загрязненных, обводненных и аэрированных смазочных масел;
- воздействие на тыльную сторону вкладыша микроскопических возвратно-поступательных перемещений подшипников в постелях, повышенной влажности и наличия кислорода в атмосфере картера.
- циклическое изменение давления на контактной поверхности подшипника.

Характерные эксплуатационные дефекты подшипников скольжения:

- усталостное растрескивание и выкрашивание баббита;

- утончение слоя баббита в подшипниках в результате естественного износа, а также вследствие аэрации масла;
- повреждение антифрикционного слоя (изменение микрорельефа, постепенное расширение и углубление дефектов, образование губчатой структуры) при длительном динамическом воздействии смазочного масла (кавитации) с местным повышением давления до 40 МПа и присутствии большого количества воздуха в масле;
- деформирование вкладышей и ослабление креплений из-за растяжения болтов;
- фреттинг-коррозия на тыльных сторонах вкладышей;
- местное увеличение твердости баббита в результате уплотнения и упрочнения (наклепа);
- задиры антифрикционной поверхности в результате попадания в масло механических примесей и нарушения режимов смазки.

Ряд характерных повреждений подшипников скольжения показан на рис. 6 (см. вклейку).

Топливные насосы высокого давления

До настоящего времени топливные насосы высокого давления являются одним из наиболее «уязвимых» узлов дизеля. На эффективность их работы влияют конструктивные особенности, материал, качество монтажа и регулировки рабочего процесса, сорт применяемого топлива, содержание в нем механических примесей, воды и серы.

Основные разрушающие процессы:

- трение плунжерных пар;
- контактная усталость;
- кавитация;
- коррозионное воздействие примесей топлива;
- пульсации внутреннего давления.

Характерные дефекты, развивающиеся при работе насоса:

- интенсивное изнашивание плунжерной пары;
- коррозия, изнашивание нагнетательных клапанов;
- потемнение и коррозия трущихся поверхностей плунжерных пар, появление кавитационных раковин на поверхности плунжера около отсечных кромок;
- трещины в корпусе насоса;
- ослабление и обрывы шпилек крепления насоса;
- эрозионное разрушение струей топлива отбойного болта.

Форсунки

Долговечность форсунок в основном определяется химическим составом топлива (содержанием механических примесей, воды и серы) и его вязкостью, которая может отклоняться от заданного значения при нарушении технологии подготовки и подогрева тяжелого топлива.

Характерные неисправности:

- коррозия иглы и распылителя форсунки;
- засорение отверстий и разрывы сопел;
- усталостная поломка пружины.

Турбокомпрессоры

Применение газотурбонагнетателей (ГТН) в системе наддува существенно повышает экономичность дизеля, однако создает проблемы в эксплуатации в связи с относительно невысоким ресурсом ГТН. Основные детали ГТН испытывают достаточно сложный комплекс эксплуатационных нагрузок:

- механические нагрузки, обусловленные центробежными силами и вибрациями, возникающими при дисбалансе ротора;
- высокотемпературное воздействие выхлопных газов, содержащих агрессивные компоненты;
- трение в подшипниках.

Характерные процессы изменения технического состояния:

- развитие усталостных трещин в корпусе турбины и компрессора;
- коробление соплового аппарата;
- изнашивание опорных подшипников;
- высокотемпературная коррозия лопаток турбины;
- биение ротора, износ лабиринтных уплотнений (при износе опорных подшипников).

Анализ опыта эксплуатации морских газотурбинных двигателей

Analysis of in-service experience
for marine gas-turbine engines

Газотурбинные установки (ГТУ) нашли широкое применение в качестве главных двигателей на надводных военных кораблях и судах с динамическими принципами поддержания благодаря ряду существенных достоинств: компактность и высокая удельная мощность, широкий диапазон единичных мощностей ГТД (5–20 МВт) и возможность компоновки их в агрегаты из нескольких двигателей, высокая маневренность (запуск и вывод на полную мощность за 2–3 минуты), хорошая приспособленность к автоматизации и управлению, относительно небольшое число вспомогательных механизмов и систем, мал шумность, экологичность, возможность быстрой агрегатной замены при аварийном повреждении или исчерпании назначенного ресурса.

Основные недостатки – более низкие, по сравнению с дизелями, экономичность и надежность, причем в общем потоке отказов довольно велика доля аварийных эксплуатационных повреждений. В первую очередь это относится к деталям ГТД, подверженным наиболее интенсивному воздействию эксплуатационных нагрузок и соответствующих разрушающих процессов [13–20] (табл. 1).

Опыт эксплуатации морских ГТД свидетельствует о том, что наибольшие проблемы связаны с повреждениями лопаток и подшипников (рис. 7, 8, см. вклейку).

Усталостное выкрашивание контактных поверхностей подшипников приводит к росту вибрации двигателя и момента сопротивления, триботехнический износ дорожек и тел качения увеличивает биение ротора, развитие усталостных трещин в кольцах и сепараторе обычно заканчивается разрушением подшипника, заклинка ротора и аварией двигателя [4, 5].

Изменение формы и качества поверхности лопаток сопровождается ухудшением их аэродинамических характеристик, а развитие усталостных трещин и последующее разрушение хотя бы одной лопатки во время работы машины вызывает, как правило, лавинообразный процесс и тяжелую аварию двигателя [6].

Следует заметить, что эти данные получены в результате обследования морских двигателей

3-го поколения. Их производство в Советском Союзе было сосредоточено в г. Николаеве и после 1991 г. оказалось за границей. Для обеспечения российского ВМФ отечественными морскими ГТД 4-го поколения были использованы производственные мощности НПО «Сатурн» (г. Рыбинск) [21]. Созданные на этом предприятии морские ГТД типа М75РУ и М70ФРУ по сравнению с машинами 3-го поколения имеют более простую схему с одним турбокомпрессорным блоком (рис. 9) и более форсированные параметры рабочего процесса (табл. 2).

Несмотря на сравнительно небольшую стендовую наработку (несколько сот часов), применение методики расчета эквивалентного ресурса и успешные результаты стендовых солевых испытаний позволили Государственной комиссии сделать вывод о соответствии разработанных машин заданным требованиям надежности. Вме-

сте с тем отсутствие опыта длительного практического использования в составе корабельных энергетических установок оставляет открытым вопрос о том, насколько распределение причин возможных эксплуатационных отказов морских ГТУ 4-го поколения будет соответствовать накопленному опыту эксплуатации машин 3-го поколения и какие диагностические задачи станут актуальными в процессе их эксплуатации и капитальных ремонтов.

Исчерпывающие ответы могут дать только длительные ресурсные испытания и накопленный опыт эксплуатации. Однако некоторые предположения можно сделать на основании анализа характеристик, а также схемных и конструктивных особенностей.

Прогары жаровых труб, имевшие место при эксплуатации машин 3-го поколения, для новых машин не актуальны в связи с применением прин-

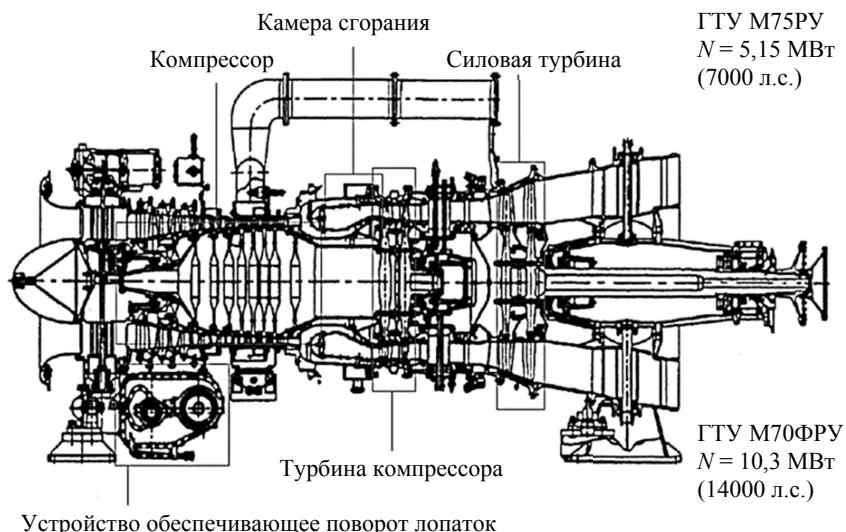
Таблица 1. Особенности условий эксплуатации основных узлов морских газотурбинных двигателей

Table 1. Specific operating conditions of the main parts of gas-turbine engines

Узлы	Детали	Эксплуатационные воздействия	Разрушающие процессы
Воздухо-заборник	Защитная сетка, ВОУ	Длительное воздействие потока воздуха, насыщенного каплями соленой морской воды	Коррозия, механическое повреждение
Компрессоры	Направляющие и рабочие лопатки	Воздействие аэрозолей морской воды, статические и циклические напряжения, вызванные центробежными силами и вибрацией лопаток, попадание посторонних предметов в проточную часть	Забойны кромок лопаток, засоление, коррозия, усталостные трещины и обрывы лопаток
Камера горения	Форсунки	Воздействие примесей в топливе и теплового излучения факела	Эрозия, засорение и закоксовывание форсунок
	Жаровые трубы	Контактное воздействие факела при ухудшении качества распыла топлива	Прогары и разрушения жаровых труб
Турбины	Направляющие и рабочие лопатки	Воздействие горячего газа, агрессивных продуктов сгорания топлива (серы и солей ванадия), статические и циклические напряжения, вызванные центробежными силами и вибрацией лопаток	Высокотемпературная коррозия и эрозионный износ, коробление, обгорание лопаток при нарушении работы камеры горения
Подшипники качения	Кольца, тела качения, сепараторы	Радиальные и осевые усилия, циклические контактные напряжения, динамические нагрузки, вызванные неуравновешенностью и вибрацией роторов, воздействие повышенной температуры и вредных примесей в масле	Триботехнический износ, коррозия, усталостное выкрашивание поверхностей качения, изменение формы тел качения, усталостные трещины и поломки колец и сепараторов
Редуктор	Шестерни	Высокие контактные напряжения, динамические нагрузки, вызванные вибрацией роторов, воздействие вредных примесей в масле	Триботехнический и усталостный износ контактных поверхностей, коррозия, поломка зубьев шестерен

Рис. 9. Конструктивная схема морских ГТД 4-го поколения

Fig. 9. Design layout of fourth-generation marine gas turbines



ципиально иной кольцевой конструкции камер сгорания.

Примененная в машинах 4-го поколения более простая конструктивная схема с одним турбокомпрессорным блоком улучшает условия эксплуатации *подшипников качения*, поскольку уменьшает вероятность перегрева подшипников, перекоса валов, вибрационных воздействий. Кроме того, существенно повышается контролепригодность под-

шипников во время плановых осмотров и упрощается применение вибродиагностических методов в период эксплуатации. Вместе с тем повышение частот вращения роторов в сочетании с высокими контактными напряжениями по-прежнему будет создавать условия для накопления усталости металла тел качения, колец и сепараторов подшипников при длительной эксплуатации ГТД. Нельзя полностью исключить и возможность коррозионно-

Таблица 2. Основные характеристики морских газотурбинных двигателей 4-го поколения

Table 2. Main particulars of the 4th generation marine gas-turbine engines

Тип ГТД	М75РУ	М70ФРУ
Мощность макс., МВт (л.с.)	5,15 (7000)	10,3 (14000)
Мощность ном., МВт (л.с.)	4,4 (6000)	8,8 (12000)
Номинальный удельный расход топлива, кг/кВт·час (кг/л.с.·час)	0,270 (0,193)	0,237 (0,174)
Максимальные обороты силовой турбины, об/мин.	10 500	6500
Степень сжатия воздуха в компрессоре	12,5	17,9
Расход воздуха, кг/с	22,6	33,2
Температура газа за камерой сгорания, °К	1265	1529
Масса ГТД с кожухом и рамой, кг	3735	4430
Ресурс до капитального ремонта, час	20 000 (ВК), 4000 (КДП)	
Полный ресурс, час	40 000 (ВК), 8000 (КДП)	

Примечание: ВК – водоизмещающий корабль; КДП – корабль с динамическим принципом поддержания.

эрозионного износа деталей подшипника в случае ухудшения качества смазочного масла.

Лопаточному аппарату новых двигателей предстоит работать в более сложных условиях, чем у машин 3-го поколения, по следующим причинам:

- повышение оборотов турбокомпрессорного блока увеличивает центробежные силы, действующие на рабочие лопатки;
- применение одного компрессора вместо двух и соответствующее уменьшение общего числа ступеней сжатия в каждой из ступеней, что приводит к увеличению поперечных изгибающих усилий на лопатках компрессора и повышению температуры воздуха в последних ступенях компрессора;
- значительное повышение температуры газа на выходе из камеры сгорания предъявляет соответственно повышенные требования к жаростойкости и жаропрочности турбинных лопаток.

Важным отличием машин 4-го поколения является применение охлаждаемых лопаток, имеющих внутренние полости сложной конфигурации для прохождения охлаждающего воздуха. Эффективность охлаждения может быть обеспечена только при точном соблюдении геометрической формы поверхности лопатки, внутренних каналов и толщины стенок между наружными поверхностями и внутренним каналом. Нарушение этих условий в результате некачественного изготовления лопаток, коробления их во время эксплуатации или засорения охлаждающих каналов может привести к перегреву и повреждению отдельных зон лопаток во время работы ГТД.

Приведенные выше соображения позволяют предположить, что техническое состояние подшипников и лопаточного аппарата как наиболее сложных и напряженных узлов ГТД будет и в будущем лимитировать долговечность и безотказность эксплуатации морских ГТУ.

Выводы

Conclusion

1. Для судового энергетического оборудования характерно большое разнообразие принципов действия, конструктивных и схемных решений, рабочих сред, характеристик рабочих процессов, примененных конструкционных материалов и технологий изготовления деталей.

2. Стремлением к повышению эффективности эксплуатации судовой энергетики за счет интенсификации рабочих процессов обусловлен высокий уровень эксплуатационных нагрузок энергомеханического оборудования, оказывающих разрушающее воздействие на узлы и детали судовых машин.
3. Сочетание особенностей, указанных в п.п. 1 и 2, приводит к большому разнообразию физико-химической природы и темпов развития процессов деградации технического состояния оборудования.
4. Скрытое от персонала развитие эксплуатационных дефектов (вплоть до наступления критической стадии) является основной причиной отказов и аварий судовых двигателей.
5. В этой связи не вызывает сомнений актуальность дальнейшего развития и совершенствования методов и средств эксплуатационной диагностики и предремонтной дефектации судовых дизелей и морских газотурбинных двигателей, применение которых позволит оптимизировать обслуживание двигателей и снизить вероятность отказов и аварий.

Библиографический список

References

1. Гаврилов В.С., Камкин С.В., Шмелев В.П. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок. М.: Транспорт, 1975. [Gavrilov V.S., Kamkin S.V., Shmelev V.P. Operation and maintenance of shipboard diesel installations. M.: Transport, 1975. (in Russian)].
2. Маренков Н.А. Обнаружение и устранение неисправностей судовых дизелей М.: Транспорт, 1975. [Marenkov N.A. Trouble shooting of ship diesel engines. M.: Transport, 1975. (in Russian)].
3. Крылов Е.И. Надежность судовых дизелей. М.: Транспорт, 1978. [Krylov E.I. Reliability of ship diesel engines. M.: Transport, 1978. (in Russian)].
4. Карпов Л.Н. Надежность и качество судовых дизелей. Л.: Судостроение, 1980. [Karpov L.N. Reliability and quality of ship diesel engines. L.: Sudostroenie, 1980. (in Russian)].
5. Овсянников М.К., Петухов В.А. Эксплуатационные качества судовых дизелей. Л.: Судостроение, 1982. [Ovsyannikov M.K., Petukhov V.A. Service performance of ship diesel engines. L.: Sudostroenie, 1982. (in Russian)].
6. Кондратьев Н.Н. Отказы и дефекты судовых дизелей. М.: Транспорт, 1985. [Kondratev N.N. Failures and

- defects of ship diesel engines. M.: Transport, 1985. (in Russian)].
7. Шишкин В.А. Анализ неисправностей и предотвращение повреждений судовых дизелей. М.: Транспорт, 1986. [Shishkin V.A. Analysis of malfunctions and prevention of damage to ship diesel engines. M.: Transport, 1986. (in Russian)].
 8. Крылов Е.И. Ремонт дизелей морских судов. М.: Транспорт, 1987. [Krylov E.R. Repair of marine diesel engines. M.: Transport, 1987. (in Russian)].
 9. Васильев Б.В., Ханин С.М. Надежность судовых дизелей. М.: Транспорт, 1989. [Vasiliev B.V., Khanin S.M. Reliability of ship diesel engines. M.: Transport, 1989. (in Russian)].
 10. Камкин С.В., Возницкий А.А., Лемешенко А.А. и др. Эксплуатация судовых дизельных энергетических установок. М.: Транспорт, 1996. [Kamkin S.V., Voznitsky A.A., Lemeshchenko A.A. et al. Operation of ship diesel installations. M.: Transport, 1996. (in Russian)].
 11. Возницкий И.В. Повреждения и поломки дизелей. Примеры и анализ причин. СПб.: Модерн, 2006. [Voznitsky A.A. Malfunctions and breakdown of diesel engines. Examples and analysis of causes. SPb.: Modern, 2006. (in Russian)].
 12. Корнилов Э.В., Бойко И.В., Танасов Е.Н. Аварии и аварийные повреждения судовых дизелей. Одесса: Экспресс, 2010. [Kornilov E.V., Boiko I.V., Tanasov E.N. Accidents and accident-related damage of ship diesel engines. Odessa: Express, 2010. (in Russian)].
 13. Горелов В.И. Эксплуатация корабельных газотурбинных установок. М.: Воениздат, 1972. [Gorelov V.I. Operation of ship gas-turbine installations. M.: Voenizdat, 1972. (in Russian)].
 14. Розенберг Г.Ш., Бондаренко А.С., Голуб Е.С. Техническая эксплуатация судовых газотурбинных установок. М.: Транспорт, 1986. [Rozenberg G.Sh., Bondarenko A.S., Golub E.S. Operation and maintenance of ship gas-turbine installations. M.: Transport, 1986. (in Russian)].
 15. Седых З.С. Эксплуатация газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Справочник. М.: Недра, 1987. [Sedykh Z.S. Operation of gas compressor units with gas-turbine engines. Handbook. M.: Nedra, 1987. (in Russian)].
 16. Повреждения подшипников качения и их причины. СПб.: SKF AB, 2002. [Roller bearing damage and causes. SPb. SKF AB, 2002. (in Russian)].
 17. Мухтаров А.В., Тарасов С.В., Багерман А.З., Леонова И.П. Результаты мониторинга состояния про- точных частей морских ГТД в эксплуатации // Судостроение. 2007. № 3. С. 36–37. [Mukhtarov A.V., Tarasov S.V., Begerman A.Z., Leonova I.P. Result of in-service monitoring of gas turbine channels. Sudostroenie. 2007. No. 3. P. 36–37. (in Russian)].
 18. Рыбалко В.В. Эксплуатация и диагностика турбинных установок. СПб.: Издательство СПбГМТУ, 2008. [Rybalko V.V. Operation and diagnostics of turbine installations. SPb.: Izd. SMTU, 2008. (in Russian)].
 19. Багерман А.З. Обеспечение надежной эксплуатации газотурбинных двигателей в морских условиях. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. [Begerman A.Z. Ensuring reliable operation of gas-turbine engines in marine environment. SPb.: Krylov Shipbuilding Research Institute, 2010. (in Russian)].
 20. Равин А.А. Актуальные задачи диагностики морских газотурбинных двигателей // Судостроение. 2012. № 3. С. 42–44. [Ravin A.A. Modern tasks in diagnostics of marine gas-turbine engines. Sudostroenie. 2012. No. 3, P. 42–44. (in Russian)].
 21. Сайт НПО «Сатурн». URL: <http://www.npo-saturn.ru> (дата обращения: 07.06.2018)./ website NPO Saturn. URL: <http://www.npo-saturn.ru> (access date: 07.06.2018).
-
- ### Сведения об авторах
- Мясников Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 748-64-08. E-mail: yu.myasnikov@yandex.ru.
- Никитин Владимир Семенович, д.т.н., профессор, генеральный директор ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-46-07. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
- Равин Александр Александрович, д.т.н., профессор СПбГМТУ. Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. Тел.: +7 (921) 975-71-71. E-mail: ravinlki@mail.ru.
- ### About the authors
- Yuri N. Myasnikov, D. Sc., Professor, Principal Research Scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 748-64-08. E-mail: yu.myasnikov@yandex.ru.

Vladimir S. Nikitin, D. Sc., Professor, Director General, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-46-07. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Aleksandr A. Ravin, D. Sc., Professor, State Marine Technical University of St. Petersburg. Address: ul. Lotsmanskaya 3, St. Petersburg, 190008, Russia. Tel.: +7 (921) 975-71-71. E-mail: ravinki@mail.ru.

Поступила / Received: 08.06.18
Принята в печать / Accepted: 08.08.18
© Коллектив авторов, 2018