

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-184-196
УДК 629.5.001.7

Ю.Н. Мясников

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

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СУДОСТРОЕНИИ

Объект и цель научной работы. Анализ и исследование междисциплинарных инновационных технологий с целью создания нового конкурентоспособного облика корабля на базе применения наукоемких технологий в судостроении.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов используются научно-технические данные об исследовании и разработке диагностического обеспечения корабельных энергомеханических систем, создавшего условия перехода на эксплуатацию оборудования по фактическому техническому состоянию.

Основные результаты. Установлены основные причины снижения уровня надежности судового оборудования в пределах заданного ресурса технических средств. Показано, что в современных условиях организация межведомственной лаборатории прогрессивных испытаний кораблей и судов – первый шаг на пути реализации идеи академика А.Н. Крылова об организации обратной связи в судостроении: «эксплуатация – производство – наука», которая позволит управлять уровнем надежности судовых технических средств.

Заключение. Научную и инженерную составляющую лаборатории прогрессивных испытаний кораблей и судов определяет мобильный диагностический комплекс, технический проект которого разработан Крыловским государственным научным центром.

Ключевые слова: диагностическое обеспечение, мобильный диагностический комплекс, лаборатория прогрессивных испытаний кораблей и судов.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-184-196
UDC 629.5.001.7

Yu. Myasnikov

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

INTERDISCIPLINARY INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN SHIPBUILDING

Object and purpose of research. This paper analyses and studies interdisciplinary innovative technologies to work out a new competitive concept of ship based on science-intensive shipbuilding technologies.

Materials and methods. This study is based on scientific & technical data on R&D activities in diagnostic support of marine power systems that paved the way for transition to equipment operation as per its actual technical condition.

Main results. This paper determines main reasons for deterioration of marine equipment reliability within its specified lifetime. It has been shown that, as of today, organization of an inter-agency laboratory that would perform innovative tests of ships and vessels is the first step in implementing the idea of Academician Krylov about establishing “operators – manufacturers – scientists” feedback chain in shipbuilding, which will enable reliability management of ship equipment.

Conclusion. The core of scientific and engineering capabilities of innovative ship testing laboratory is a mobile diagnostic system developed by KSRC.

Keywords: diagnostic support, mobile diagnostic system, innovative ship testing laboratory.

Author declares lack of the possible conflicts of interests.

Для цитирования: Мясников Ю.Н. Междисциплинарные инновационные технологии в судостроении. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 1(387): 184–196.

For citations: Myasnikov Yu. Interdisciplinary innovative technologies in shipbuilding. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 1(387): 184–196 (in Russian).

Трансфер технологий – это «процесс, посредством которого одна организация адаптирует технологию, созданную другой». Любая технология есть результат интеграции образования, науки, производства и эксплуатации, происходящей в форме прямого трансфера. Инновационные банки, специализирующиеся на кредитовании новых видов деятельности, технологий, научно-технических разработок, дали современную трактовку «инновации»: наука – это превращение денег в знания, инновация – превращение знаний в деньги.

Судоостроение – отрасль собирательная, системообразующая и аккумулирующая достижения науки и техники во многих областях. В этой связи трансфер технологий является ключевым фактором его развития и должен быть ориентирован на обеспечение внедрения результатов исследований и разработок в производство и последующее распространение их в экономике на национальном и международном уровнях. Формирование новой эффективной модели трансфера технологий на основе частно-государственного партнерства научной и производственной сфер способствует созданию новых конкурентоспособных технологий. У российской судоостроительной промышленности накоплен огромный опыт создания кораблей и судов всех типов и назначений. Однако сегодня Россия в значительной степени потеряла статус ведущей морской державы, существенно сократив строительство кораблей и судов и, как следствие, присутствие в Мировом океане. Вместе с тем размеры и положение нашей страны (3/4 морской пограничной зоны) обязывают однозначно иметь дееспособный военно-морской и транспортный флот. К тому же военно-морским флотом обзаводится все большее число стран, верно полагая, что задачи стратегического сдерживания могут решаться без атомного оружия, а флотом на основе высокоточного оружия, созданного на стыках научно-технических направлений.

В современных условиях возможность масштабного выхода на мировой рынок связана с решением ряда проблем, которые определены «Стратегией развития судоостроения до 2030 г.». Генеральная цель стратегии – создание нового конкурентоспособного облика судоостроительной промышленности в составе крупных научных и производственных интегрированных структур (образование – наука – производство) на основе совершенствования нормативно-правовой базы и применения наукоемких технологий в кораблестроении и судоостроении. К настоящему времени мировая практика достаточно четко сформировала облик современно-

го корабля. Например, существенным фактором проектирования и строительства подводных лодок (ПЛ) становится стоимость разработки, строительства и эксплуатации в течение всего жизненного цикла корабля [1]. Снижение стоимости возможно только за счет внедрения новых технологий и модернизации производства. В США при строительстве многоцелевых атомных подводных лодок (ПЛА) типа Virginia стоимость одного корабля снизилась с 2,5 до 2 млрд долл. К новым инновационным технологиям, внедренным на ПЛА Virginia, можно отнести:

1. АСУ (автоматизированная система управления) движением ПЛА, которая впервые в практике зарубежного кораблестроения интегрирована в АСБУ (автоматизированная система боевого управления), что существенно помогает командиру корабля принимать оптимальные решения. Важно заметить, что в АСУ широко используются компоненты коммерческих технологий и систем, в первую очередь, алгоритмы и средства диагностики оборудования и навигационных систем.
2. Ядерные реакторы, обеспечивающие работу активной зоны в течение всего срока службы корабля без замены (срок службы ПЛА – 33 года).
3. Ряд других инноваций, в том числе использование композитных материалов в корпусных конструкциях и дельных вещах.

Следует обратить внимание на то, что новые технологии вводятся не только в сфере комплектующего оборудования, но и в области процессов производства. При этом главной заявившей о себе тенденцией становится постепенный переход функций носителя технического прогресса в морской технике от флота военного к флоту гражданскому. По многим позициям транспортный флот уже обогнал военно-морской флот, в первую очередь, по уровню автоматизации и надежности, пожаровзрывобезопасности, экологичности, ремонтнопригодности, топливной экономичности, безопасности мореплавания и т.д. Изменение носителя вектора развития объясняется жесткой конкуренцией на фрахтовом рынке с одной стороны и резким ужесточением требований международных морских организаций в части обеспечения экологической безопасности мореплавания. И то и другое заставляет судовладельцев искать пути сокращения эксплуатационных затрат, в первую очередь, путем внедрения диагностических программ и аппаратуры на новых физических принципах, которые обес-

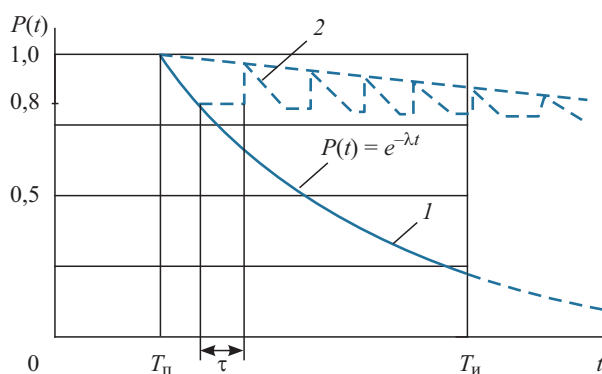


Рис. 1. Влияние технического диагностирования оборудования на вероятность его безотказной работы: 1 – кривая изменения вероятности безотказной работы оборудования без применения средств диагностики; 2 – то же с применением средств диагностики

Fig. 1. Effect of technical diagnostics upon trouble-free operation probability of equipment without diagnostic tools (Curve 1) and with diagnostic tools (Curve 2)

печивают поддержание технических средств судна в исправном (контролируемом в реальном масштабе времени) состоянии, оптимизируют топливную составляющую эксплуатационных расходов, которая в нынешних условиях «сжигает» более 60 % эксплуатационных затрат [2].

Уловив новые тенденции, английский Ллойд, который всегда занимался правилами проектирования гражданских судов, выпустил Правила проектирования кораблей ВМФ. Кстати, «Мистраль» спроектирован по Правилам «Бюро Веритас». Неслучайно во всех развитых морских державах (США, Германия, Франция, Италия, Норвегия) на основе наработок в гражданском судостроении уже созданы и введены в действие правила классификационных обществ по проектированию боевых надводных кораблей и неатомных ПЛ. Реализуемая АО «ЦС «Звездочка» программа по переводу ПЛА на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию широко использует наработки гражданского судостроения и, совершенствуя технологии, активно внедряет в практику ремонта кораблей диагностические системы. Опыт боевой службы кораблей флота, подтвержденный походом авианесущего крейсера «Адмирал Флота Советского Союза Кузнецов», показал техническую и боевую эффективность применения методов и средств технической диагностики оборудования кораблей, а АО «ЦС «Звездочка» в условиях ограниченного финансирования в крат-

чайшие сроки выполнило техническую подготовку кораблей Северного флота. Сделано это за счет сокращения объемов демонтажа и ремонта, а также отказа от замены исправных технических средств.

Поступающие на флот современные надводные корабли и ПЛА имеют развитую систему централизованного контроля и диагностики в составе комплексной системы управления техническими средствами (КСУ ТС) и обеспечивают информационную поддержку экипажа. Это позволяет сформировать базу данных технического состояния корабельного оборудования, на основании которой должны приниматься решения об объеме и составе мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту кораблей. Вместе с тем это новые технологии, которые требуют совершенствования алгоритмов диагностирования, создания и тарировки (адаптации) диагностических приборов и всесторонней проверки их метрологических характеристик. Отсутствие опережающих НИОКР в данном направлении ведет к возрастающему отставанию в создании перспективной техники. Уместно напомнить, что эксплуатационная компонента жизненного цикла судового оборудования (несмотря на совершенствование физико-химических свойств конструкционных материалов, позволивших разработать материалы, выдерживающие не только огромные механические нагрузки, но и обладающие высокой износостойкостью и сопротивляемостью к внешним и внутренним разрушающим факторам) в условиях ужесточающихся требований уменьшения веса и габаритов технических систем при одновременном увеличении их производительности и нагрузочных характеристик остается наименее изученной. К этому следует добавить «Новую реальность от ИМО», нормирующую выбросы углекислого газа судами на основе «индекса энергетической эффективности» (EEDI) [3]. Требование введено в качестве новой главы VI приложения МК MARPOL73/78 и является обязательным для судов, киль которых заложен после 01.01.2013. Смысл этого индекса определяется упрощенным выражением

$$\text{Index} = \text{масса CO}_2 / \text{транспортная работа}$$

или

$$\text{Index} = \sum FcC_{\text{carbon}} / \sum M_{\text{cargoDi}},$$

где в числителе – произведение массы потребляемого топлива на коэффициент C_{carbon} , связывающий массу эмиссии CO_2 с массой потребленного топлива; в знаменателе – произведение массы перевозимого груза на заданное расстояние.

Безусловно, EEDI – серьезный вызов судовладельцу и производителю судовых энергетических систем, который нельзя не учитывать при формировании перспектив развития и совершенствования судовых энергетических установок. Есть лишь один путь реализации технической и экологической безопасности мореплавания – системный переход на эксплуатацию кораблей и судов по фактическому техническому состоянию. Только в этом случае за счет своевременной профилактики удастся удерживать показатели надежности на уровне, близком к начальному (рис. 1) [4].

Публикации авторитетных зарубежных изданий убедительно показывают эффективность перевода флота на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию путем реализации мероприятий по следующим основным направлениям:

- оптимизация управления корабельными техническими средствами и оперативное техническое обслуживание;
- предотвращение аварий;
- удлинение межремонтного периода и сокращение времени восстановительных процедур.

В передовых судоходных компаниях применяется концепция постоянной диагностики судового оборудования, анализа результатов и сравнение их с эталонными значениями. Каждое судно имеет энергетический паспорт, составленный на основе приемо-сдаточных и ходовых испытаний (Shop test result, Sea trial) и содержащий эталонные характеристики пропульсивного комплекса судна.

Основные рабочие параметры ежедневно передаются в береговую базу данных судоходной компании для анализа состояния механизмов, расхода топлива и масел, определения винтовой характеристики и контроля обрастания корпуса судна, мониторинга выбросов оксидов серы (SO_x), оксидов азота (NO_x) и диоксида углерода (CO₂).

Главные и вспомогательные двигатели ежедневно индицируются на нагрузке не менее 75 % от MCR (Maximum Continuous Rating). Это делается для выявления технического состояния главного двигателя (ГД) и вспомогательных дизелей, их узлов на текущий момент эксплуатации и своевременного принятия необходимых мер по поддержанию технического состояния механизмов на уровне, обеспечивающем требуемые технико-экономические показатели. Если ГД работает по винтовой характеристике, то индицирование проводят в состоянии «груз» и «балласт» соответственно. Результаты индицирования приводятся к стандартным условиям ISO (ISO Correction factor)

и сравниваются с результатами приемо-сдаточных и ходовых испытаний, в случае необходимости выполняется регулировка параметров в соответствии с требованиями завода – изготовителя оборудования.

Каждые пять лет суда проходят полное энергетическое и экологическое обследование (Energy and Environmental Audit), при котором происходит сравнение полученных параметров с данными энергетического паспорта судна и выдачей необходимых рекомендаций для улучшения энергоэффективности и снижения количества выбросов.

Краткая характеристика диагностических систем и приборов, применяемых на судах зарубежных судоходных компаний

Brief description of diagnostic systems and equipment aboard foreign ships

1. PMI system (рис. 2) – штатная система, устанавливаемая на верфи и рекомендуемая производителем ГД. Система диагностики PMI служит для сбора ключевых параметров двух- и четырехтактных двигателей, их графических презентаций и позволяет произвести анализ эффективности работы двигателя.
2. Система контроля анализа динамических процессов и параметров главного и вспомогательных двигателей (Performance Monitoring and Indication System) – мобильная и многофункциональная система на базе прибора Doctor ДК-2/ДК-20 (производитель – Icon Research, рис. 3), не требующая значительных доработок для установки. На практике доказала свою эффективность.
3. Система вибрационной диагностики (прибор Omnitrend 2.72, производитель – db Pruftechnik (рис. 4)) включает в себя регулярный мониторинг технического состояния электродвигателей и турбин, определение степени опасности дефектов и позволяет произвести оценку остаточного ресурса оборудования.

Наряду с вышеперечисленными системами, уже зарекомендовавшими себя в области технической диагностики, на судах «Совкомфлота» используются мобильные приборы и методики оценки состояния узлов механизмов:

- LDM – прибор, позволяющий в течение короткой стоянки определить состояние, геометрию

и износ втулки цилиндра. Для оценки состояния и замеров одного цилиндра требуется около 1,5 часов. При этом не требуется разборки цилиндропоршневой группы. Замеры производятся подготовленными специалистами;

- ВАК – прибор, позволяющий через отверстие снятой форсунки или индикаторного крана визуально определить состояние камеры сгорания и выхлопного клапана, а также выявить дефекты втулки и качество смазки;

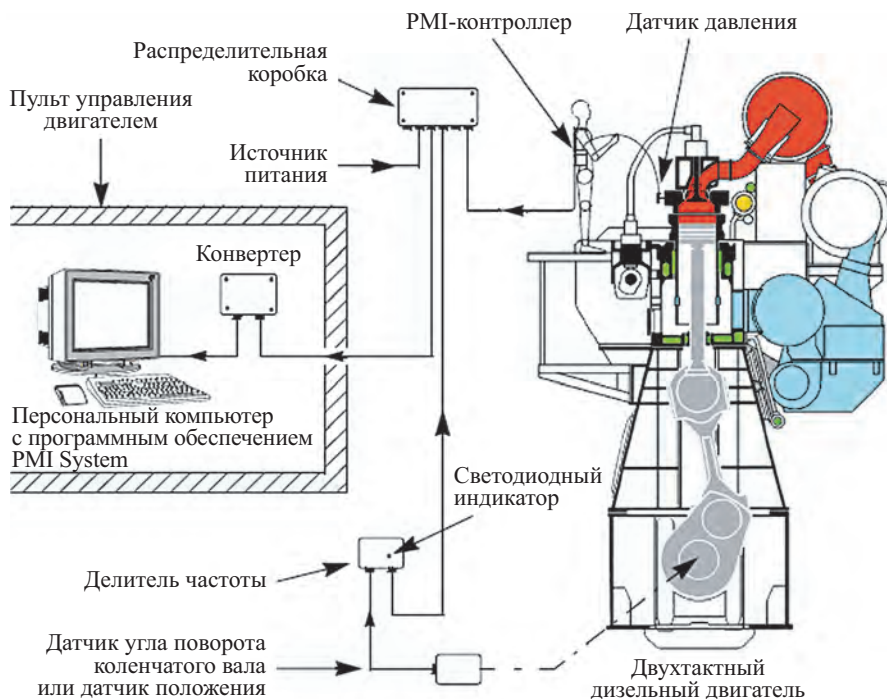


Рис. 2. PMI-система
Fig. 2. PMI system

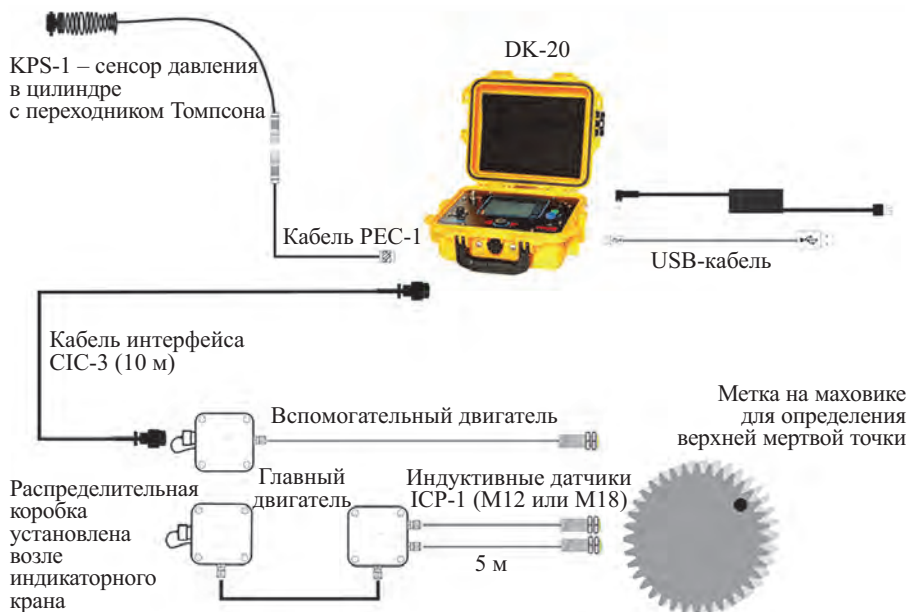
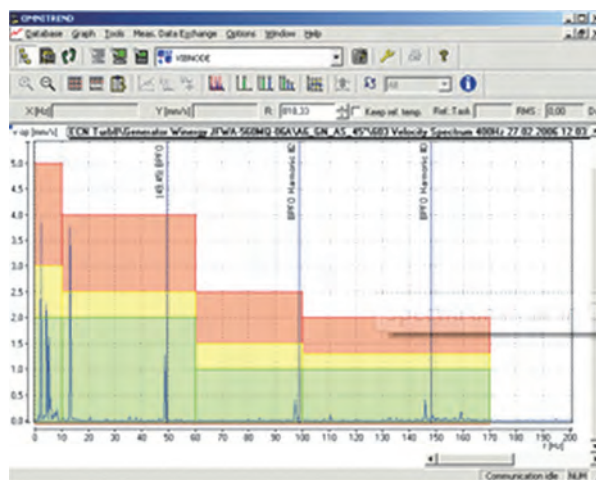


Рис. 3. Прибор Doctor DK-2 / DK-20
Fig. 3. Device Doctor DK-2 / DK-20

Рис. 4. Система
вибрационной диагностики

Fig. 4. Vibrodiagnostic
system



- thermographic inspection – термографическое исследование главного и аварийного распределительных щитов, производимое в процессе эксплуатации и перед плановым ремонтом судна в доке.

Концептуальный паритет отечественных и зарубежных разработок, несмотря на разрушительные 90-е гг., сохраняется, а в области военного кораблестроения лидирует Россия. Большинство отечественных диагностических приборов внесены в перечень инвентарного снабжения судов всех типов, классов и назначений, строящихся для России (РД 31.00.14-97 «Суда морского флота. Нормы снабжения инвентарным имуществом и инструментом»). Однако, если не затрагивать военное кораблестроение, отечественные судостроители транспортного флота в абсолютно недостаточной мере используют отечественные разработки в области диагностического обеспечения технических средств проектируемых и строящихся судов. Это объясняется многими причинами, но главными являются:

- стойкие государственные стимулы покупать технику вторичного рынка за рубежом. Декларируемое «импортозамещение», не подкрепляемое президентскими указами, не идет дальше ни к чему не обязывающих конкурирующих ведомственных решений;
- понятное стремление заказчика к снижению стоимости строительства судна приводит к остракизму системных технических решений, обеспечивающих безопасную и безотказную эксплуатацию судна, и, в первую очередь, диагностического обеспечения технических средств, т.к. современные информационные технологии выходят за рамки апробированных проектных ре-

шений в области эксплуатационной компоненты жизненного цикла судна.

Понимая конкурентные преимущества диагностически обеспеченного судна, Крыловский центр разработал концепцию системной реализации задач диагностики сложных энергомеханических систем, которая, с одной стороны, расширяет функции комплексной системы управления техническими средствами корабля (КСУ ТС), а с другой – выводит решение задач диагностики, определяющих долговечность оборудования, в универсальный мобильный диагностический комплекс.

Концепция, элементы которой внедряются в проектных и судоремонтных организациях, исходит из современных принципов эксплуатации [5] и оперативного управления сложными энергетическими системами, предполагающими автоматизацию процессов технического диагностирования и введение алгоритмов и средств диагностики непосредственно в контур систем управления и централизованного контроля. В этой связи диагностическая система должна состоять из 2 подсистем. Первая подсистема (рис. 5) решает задачи оперативного диагностирования энергетической установки (ЭУ), электроэнергетической системы, общесудовых систем на информационной основе системы централизованного контроля, параллельно отбирая информацию с датчиков теплотехнического контроля, и является составной частью комплексной системы управления техническими средствами корабля. Характер и область изменения теплотехнических параметров [2] позволяют решить первую задачу технической диагностики – поиск причин нарушения работоспособности (ППНР) названных выше систем корабля. Алгоритмы ППНР, методика построения которых

разработана в Крыловском центре [7], реализуются в специальном программно-аппаратном комплексе технического диагностирования проектируемых и модернизируемых кораблей (рис. 5).

Вторая подсистема (рис. 6) физически не связана с первой. Их объединяет только информационная компонента. Основная задача этой подсистемы – определение и прогнозирование изменения технического состояния оборудования ЭУ в реальном масштабе времени без его разборки и демонтажа. Решение данной задачи является инструментом реализации инновационной программы перевода флота на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию [4]. Первооснова второй подсистемы – мобильные диагностические приборы, созданные в рамках Решения ВПК № 506 от 16.10.1987 (Крыловский центр – головной исполнитель). Сегодня это направление активно развивается, чему способствует РД 31.00.14-97.

Исследования, выполненные в Крыловском центре, показали, что эффективность использования мобильных приборов существенно зависит от их

комплексного применения. Следовательно, если мы хотим повысить вероятность правильного диагноза, они должны быть объединены в информационно-вычислительный комплекс (ИВК), входные данные в который поставляют отдельные диагностические приборы, а обработка и представление выходной информации, ее обобщение и создание банка данных возлагается на ПЭВМ. Учитывая длительность процессов износа и накопления повреждений оборудованием ЭУ, а также возможность обслуживания парка судов, предпочтение отдано мобильному диагностическому комплексу, в котором сосредоточено несколько отдельных подсистем, объединенных только на уровне обобщения уже обработанной информации (рис. 6):

- видеотермодиагностика;
- виброакустическая диагностика;
- УЗ-диагностика (ультразвуковая диагностика);
- АЭ-диагностика (метод акустической эмиссии);
- спектрометрия и феррография, в том числе анализ масла и выпускных газов;
- инновационные приборы и аппаратура.

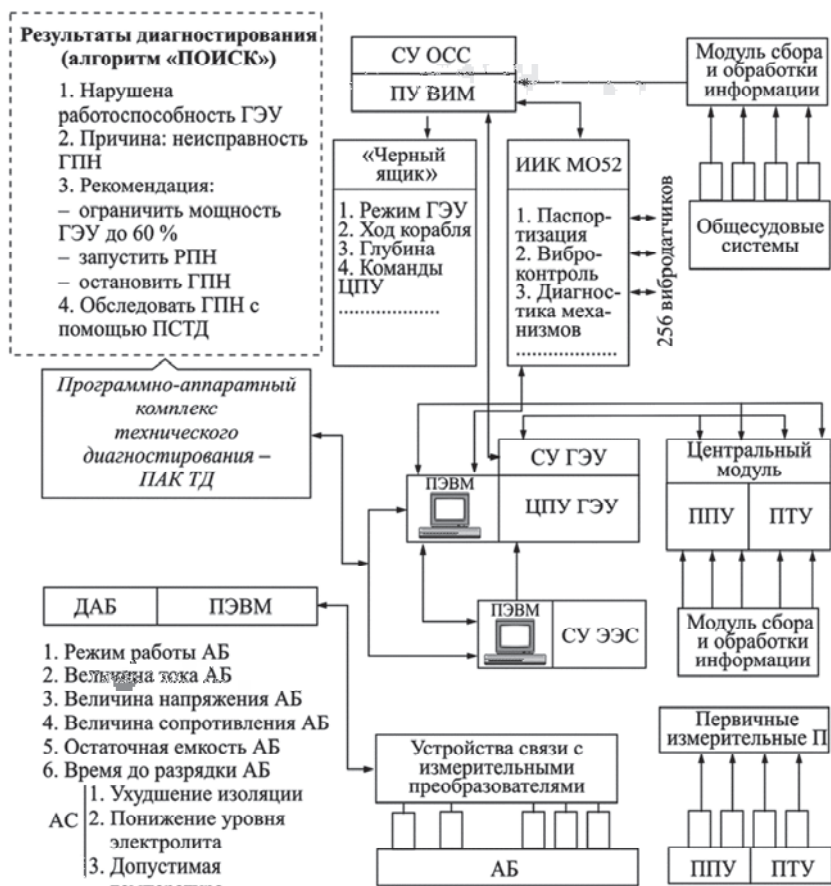


Рис. 5. Подсистема оперативной диагностики в составе КСУ ТС: ПАК ТД – программно-аппаратный комплекс технического диагностирования; ГЭУ – главная энергетическая установка; ГПН – главный питательный насос; РПН – резервный питательный насос; ДАБ – диагностика аккумуляторной батареи; АС – аварийная сигнализация; СУ ОСС – система управления общесудовыми системами; ПУ ВИМ – пульт управления вахтенного инженер-механика; ИИК МО-52 – информационно-измерительный комплекс МО-52; СУ ГЭУ – система управления ГЭУ; ЦПУ – центральный пульт управления; СУ ЭЭС – система управления электроэнергетической системой; ППУ – паропроизводящая установка; ПТУ – паротурбинная установка

Fig. 5. Express diagnostic subsystem of Integrated Equipment Control System: ПАК ТД – software and hardware system for technical diagnostics; ГЭУ – main power plant; ГПН – main feed pump; РПН – standby feed pump; ДАБ – diagnostics of battery; АС – alarm system; СУ ОСС – all-ship systems control unit; ПУ ВИМ – duty engineer panel; ИИК МО-52 – information and instrumentation system; СУ ГЭУ – main power plant control system; ЦПУ – main control room; СУ ЭЭС – power system control unit; ППУ – steam-generating plant; ПТУ – steam turbine

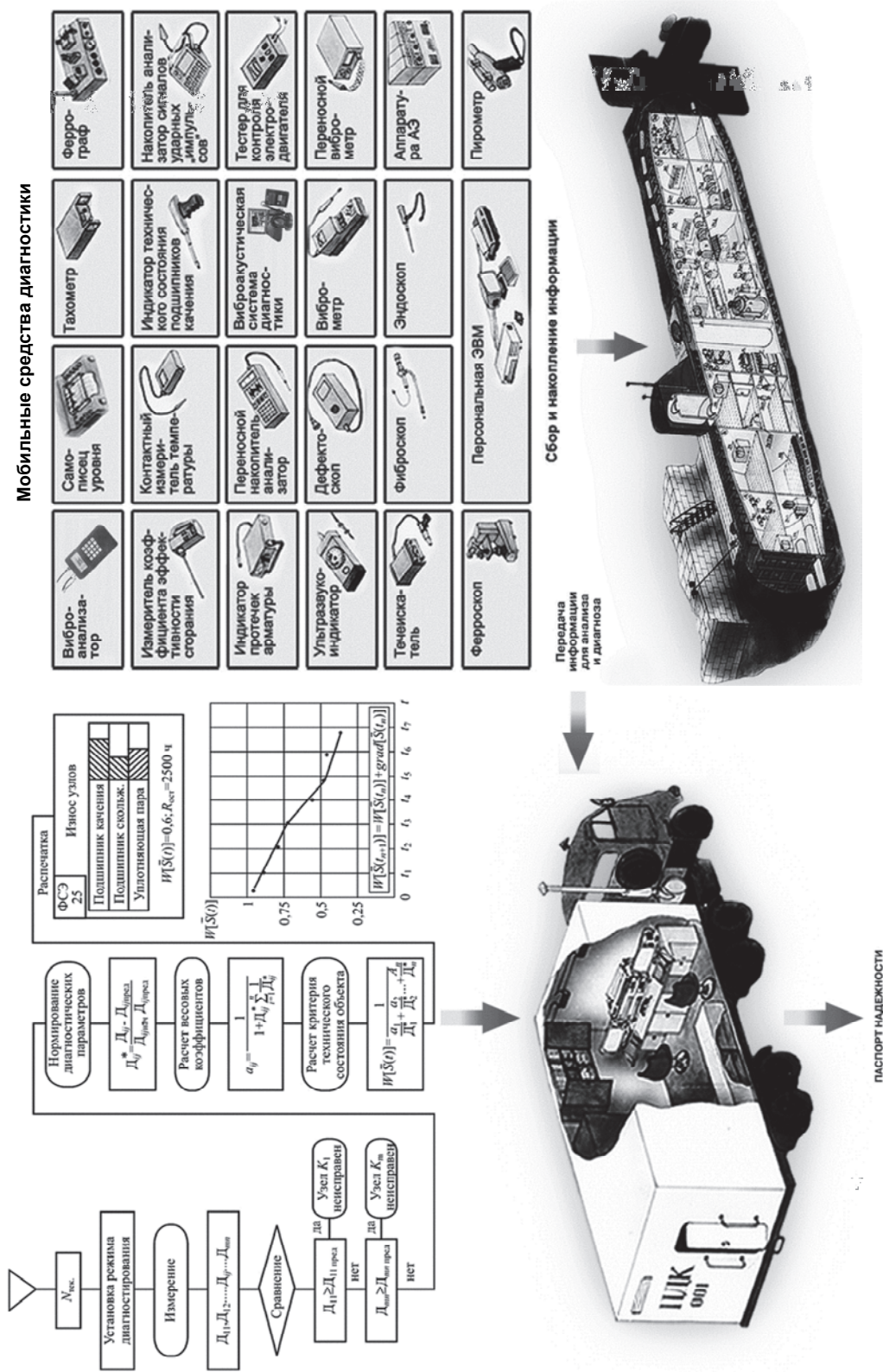


Рис. 6. Мобильный диагностический комплекс технических средств корабля
 Fig. 6. Mobile diagnostic system for ship equipment

При формировании алгоритма обработки измененных диагностических параметров с помощью мобильных диагностических приборов следует учитывать тот факт, что последние могут измеряться в различных единицах и меняться в разных диапазонах, поэтому необходимо нормировать их относительно предельного значения, т.е.

$$D_i^* = \frac{D_i - D_{\text{пред.}}}{D_{\text{нач.}} - D_{\text{пред.}}}, \quad (1)$$

где D_i , $D_{\text{нач.}}$, $D_{\text{пред.}}$ – измеренное, начальное и предельное значения диагностического параметра соответственно; D_i^* – нормированное значение диагностического параметра; $i = 1, 2, 3 \dots n$.

Тогда

$$0 \leq D_i^* \leq 1. \quad (2)$$

У неисправного объекта величина по крайней мере одного параметра должна быть равна нулю.

Подобный подход значительно облегчает анализ состояния объектов по полученным в результате диагностирования оценкам диагностических параметров. Учитывая, что в модели технического состояния объекта аргументом является время, представляется возможным задать вектор технического состояния объектов в форме

$$\bar{S}(t) = a_1 D_1^* + a_2 D_2^* + \dots + a_n D_n^*, \quad (3)$$

где a – «весовой» коэффициент механического параметра $\bar{S}(t)$ объекта, удовлетворяющий условию нормировки

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n = 1.$$

Определение проекций вектора технического состояния объекта по результатам измерения диагностических параметров позволяет в принципе оценить техническое состояние объекта. Однако получаемая при этом информация носит многомерный характер, в связи с чем на практике более удобным является предлагаемый единый числовой критерий W , соответствующий норме вектора $\bar{S}(t)$:

$$W[\bar{S}(t)] = \frac{1}{\frac{a_1}{D_1^*} + \frac{a_2}{D_2^*} + \dots + \frac{a_n}{D_n^*}}. \quad (4)$$

Легко видеть:

1. В исходном техническом состоянии объекта, когда $D_1^* = D_2^* = \dots = D_n^* = 1$,

$$W[\bar{S}(t)] = 1.$$

2. При достижении предельного состояния узла объекта (любой из $D_i^* \rightarrow 0$, $i = 1, 2, \dots, n$)

$$W[\bar{S}(t)] \rightarrow 0.$$

3. Для одинаковых степеней износа узлов ($D_1^* = D_2^* = \dots = D_n^* = C$)

$$W[\bar{S}(t)] = C.$$

4. Более весомый коэффициент износа ($a_i \rightarrow 1$) сильнее влияет на критерий технического состояния объекта.

5. Область определения критерия технического состояния объекта находится в строго единичном интервале

$$0 \leq W[\bar{S}(t)] \leq 1. \quad (5)$$

Однако при практической реализации критерия ТС объекта возникает вопрос о назначении «весовых» коэффициентов a_i . Здесь возможны два подхода. В первом случае «весовые» коэффициенты назначаются постоянными на весь период эксплуатации объекта, исходя, например, из значений коэффициентов вариации ресурсов узлов. Во втором случае (оптимальном, по мнению автора) в начале эксплуатации нового объекта следует задать эти коэффициенты равными: например, для $i = 4 - a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0,25$. В процессе эксплуатации объекта начальные значения «весовых» коэффициентов уточняются по формуле

$$a_i = \frac{1}{1 + D_i^* \sum_{k=1}^n \frac{1}{D_k^*}}, \quad (6)$$

где $i \neq k$.

Коэффициенты a_i , вычисленные по формуле (6), удовлетворяют условию нормировки

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1$$

и позволяют ранжировать и перераспределять их значения в соответствии с уровнем износа диагностируемых узлов, усиливая, таким образом, оценку технического состояния объекта в опасном направлении.

Замечательным свойством предлагаемого критерия технического состояния объекта (формула (4)) является уникальная возможность использовать его в задаче прогнозирования изменения технического состояния объекта, поскольку численное значение $W[\bar{S}(t)]$ на момент диагностирования соответствует запасу ресурса объекта. В этом случае использование методов прогнозной экстраполяции, в которых развитие процесса оценивается на основе аналитиче-

ской модели с учетом ожидаемых условий работы оборудования СЭУ и принятия гипотезы о сохранении текущей тенденции изменения механических параметров в будущие моменты времени, дает хорошие результаты. Регулярность изменения механических параметров во времени – а именно они характеризуют техническое состояние узлов оборудования – позволяет отдать предпочтение градиентному методу прогнозирования. Суть его заключается в том, что экстраполируется единый числовой критерий $W[\bar{S}(t)]$ в градиентном направлении. Известно, что вектор градиента определяет направление наибольшего изменения функции. Поэтому этот метод является оптимальным, т.к. оценивает исправность ФСЭ в направлении более быстрого достижения допустимых значений механического параметра «узла оборудования», т.е. в «опасном» направлении. Градиентное прогнозирование разделяется на два этапа. На первом этапе определяются составляющие и критерий технического состояния объекта; на втором выполняется прогнозирование в градиентном направлении, т.е. находится $W[\bar{S}(t)]$ в соответствующие моменты времени:

$$\begin{aligned} W[\bar{S}(t_{n+1})] &= W[\bar{S}(t_n)] + \text{grad}W[\bar{S}(t_n)], \\ \text{grad}W[\bar{S}(t_n)] &= W[\bar{S}(t_n)] - W[\bar{S}(t_{n-1})], \end{aligned} \quad (7)$$

где t_n, t_{n+1} – текущее и прогнозируемое время соответственно; t_{n-1} – предыстория прогноза, которая должна быть не меньше времени прогноза, т.е. $t_{n-1} = t_{n+1}$.

Важным представляется алгоритм вычисления погрешностей результатов измерения. В практических случаях необходимую информацию можно получить в зависимости от класса точности прибора:

- для индикаторов:

$$P_c \approx P(t),$$

где P_c – вероятность соответствия измеренной величины действительному состоянию; $P(t)$ – вероятность безотказной работы прибора;

$$P_c = \frac{N - M}{N},$$

где N – число наблюдений; M – число ложных наблюдений;

- для средств измерения непрерывного действия полная погрешность измерения равна

$$\delta_x = \sqrt{\delta_{x_{\text{сл}}}^2 + \delta_{x_{\text{сист}}}^2},$$

где $\delta_{x_{\text{сл}}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}$ – случайная погрешность;

$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2}$ – среднее квадратичное отклонение результатов измерений;

$\delta_{x_{\text{сист}}} = \pm \frac{\text{КТ} \cdot x_d}{100}$ – систематическая погрешность;

КТ – класс точности прибора; x_d – диапазон измерения $\delta_{x_{\text{сл}}}$ всегда должна быть больше $\delta_{x_{\text{сист}}}$,

в противном случае прибор нужно отправить в ремонт или списать.

С другой стороны, следует помнить, что в первом случае (индикаторы) увеличение числа наблюдений способствует уменьшению негативных выводов, во втором (приборы непрерывного действия) \sqrt{N} возрастает довольно медленно с увеличением N . Более того, систематическая ошибка не уменьшается с ростом числа одномоментных измерений. В практических случаях трех-пяти измерений вполне достаточно для оценки случайной погрешности. Если же требуется высокая точность (лабораторные исследования), следует совершенствовать аппаратуру, а не увеличивать число измерений.

Научная и инженерная составляющие исследований в области диагностического обеспечения судового оборудования, выполненных Крыловским центром, реализованы в техническом проекте мобильного диагностического комплекса (МДК – см. рис. 6, Крыловский центр – головной исполнитель), способного, в свою очередь, реализовать процедуру прогрессивных испытаний кораблей и судов флота. Эту идею о прогрессивных испытаниях, которая так и не была воплощена, в начале XX века высказал академик А.Н. Крылов [6]. Сегодня она может быть реализована в рамках межведомственной лаборатории прогрессивных испытаний кораблей и судов (МЛПИК), центральное ядро которой составит МДК. Создание МЛПИК – первый шаг восстановления обратной связи в судостроении: «эксплуатация – производство – наука». Задачи этой лаборатории определяются не только независимыми контрольными испытаниями вновь построенного головного корабля в период швартовных и ходовых испытаний, но, главное, фиксированием эталонного технического состояния энергомеханического оборудования корабля и последующим научно-техническим слежением за изменением технического состояния этого оборудования и корпусных конструкций с выдачей паспорта надежности, где указан остаточный ресурс оборудования. Так решаются три принципиально

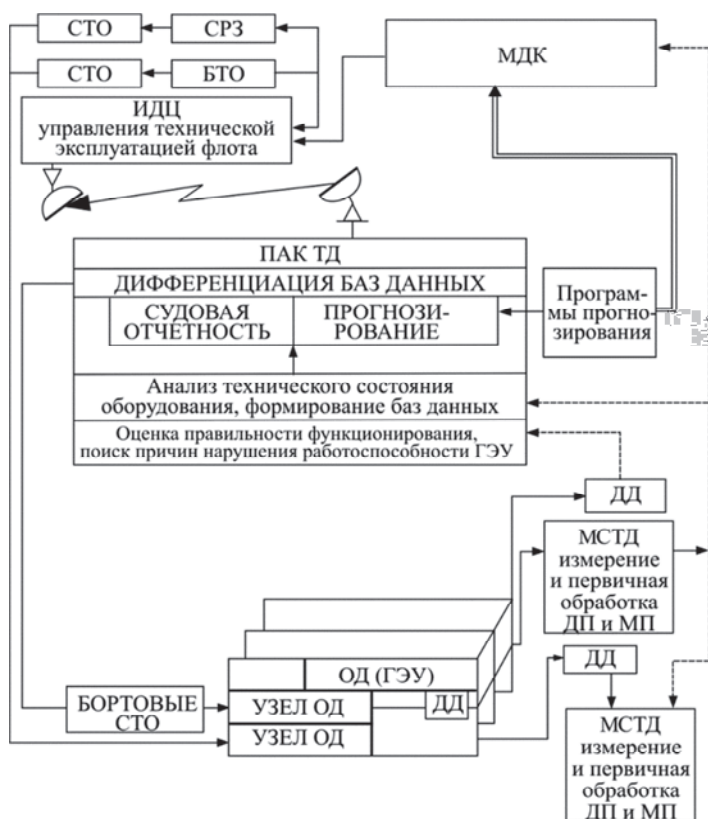


Рис. 7. Система управления ТО и Р корабля

Fig. 7. Control system for ship maintenance and repair

важные задачи: 1 – поддержание технически обоснованной, конкурентоспособной и экологически безопасной эксплуатации транспортного флота; 2 – обоснованное определение боевого состава ВМФ и планирование профилактических и восстановительных процедур отказавшего оборудования; 3 – формирование перечня проблем и задач совершенствования технических и нормативных документов, обеспечивающих научный задел при проектировании кораблей следующего поколения и модернизации удачных проектов. Последнее определяет обратную связь в жизненном цикле флота и создает условия его гармоничного развития [9–15].

Организация МЛПИК обеспечивает дальнейшее развитие концепции перевода флота на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию [4] и предполагает формирование единой информационной среды управления обслуживанием и ремонтом кораблей с центром в Главном штабе ВМФ (рис. 7). Требуется предметное осмысление и решение системообразующих проблем, в том числе:

- для проектируемых кораблей и судов в заказы на поставку судовых технических средств – обязательное включение требования обеспечения их

контролепригодности и отражения характеристик эталонных параметров (моделей) в нормативно-технической документации. Включение в программы стендовых, швартовных и ходовых испытаний режимов получения эталонных характеристик технического состояния оборудования и пропульсивного комплекса в целом;

- создание (рис. 7) информационных диагностических центров технической эксплуатации флота в Санкт-Петербурге, Севастополе, Мурманске и Владивостоке;
- другие задачи, сопутствующие совершенствованию перевода флота на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию.

Принципиально важным остается вопрос о подготовке корпуса морских инженеров, владеющих междисциплинарными технологиями. Имеющиеся в России четыре университетских комплекса, которые обеспечивают командными кадрами транспортный и Военно-Морской флоты, таких специалистов не готовят. В этой связи уже сегодня морские вузы вправе решить вопрос об организации выпускающих кафедр «Междисциплинарные технологии в судостроении». Это позволит готовить

морских инженеров, обладающих знаниями, которые выходят за рамки конкретной предметной области, и способными принимать адекватные решения в условиях современного автоматизированного судна (с минимальным экипажем). Создание кадрового потенциала, отвечающего уровню развития мирового флота и требованиям безопасной эксплуатации кораблей и судов, – важная государственная задача, и откладывать ее решение, по крайней мере, неразумно. Более того, по предложению профессора И.И. Костылева [7, 8], ключевым звеном в этом процессе должен стать Российский морской регистр судоходства (РС). Присутствие РС при подготовке корпуса морских инженеров более чем значимо, т.к. он контролирует состояние отечественного флота и располагает информацией о мировом флоте. По этой причине уже сегодня необходимо использовать практику базовых кафедр и организовать при РС базовую кафедру «Перспективные междисциплинарные технологии в морском образовании». Следующим шагом должно стать ведение активной рекламной кампании по восстановлению престижа морской профессии в рамках Всероссийского научно-технического общества судостроителей имени академика А.Н. Крылова. Здесь необходимо реанимировать секцию «Междисциплинарные инновационные технологии в судостроении», которая не только привлечет творческую интеллигенцию, теряющую свою квалификацию без общения, но и, как писал Витте, поможет «ум и знание молодых на пользу создания Российского флота обратить...».

Библиографический список

1. Сагайдаков Ф.Р., Чернецова Н.А., Гурьянов С.К. Зарубежные ВМС в 2014 г. Современное состояние и перспективы // Судостроение. 2015. № 2. С. 10–23.
2. Мясников Ю.Н., Иванченко А.А., Никитин А.М. Информационные технологии в пропульсивном комплексе морского судна. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2013.
3. Пустошный А.В. Energy Efficiency Design Index – новая реальность от ИМО // Судостроение. 2012. № 1. С. 11–17.
4. Мясников Ю.Н. Эксплуатация флота по фактическому техническому состоянию – задача сегодняшнего дня // Судостроение. 2015. № 2. С. 49–52.
5. Мясников Ю.Н. Диагностический модуль корабельной энергетической установки // Судостроение. 2016. № 1. С. 24–29.
6. Крылов А.Н. Мои воспоминания. СПб.: Политехника, 2014.

7. Костылев И.И., Мясников Ю.Н., Петухов В.А. Человеческий фактор и безопасность мореплавания // Судостроение. 2014. № 3. С. 36–41.
8. Костылев И.И., Мясников Ю.Н., Петухов В.Н. Безопасность мореплавания и проблемы подготовки морских инженеров // Судостроение. 2014. № 6. С. 26–27.
9. РД 31.20.19-93 «Комплексная система технического обслуживания и ремонта судов. Общеотраслевые правила метрологического обеспечения судов диагностированием». М.: АО «ЦНИИМФ», 1993.
10. Мясников Ю.Н., Никитин А.М. Характеристики пропульсивного комплекса в проблеме обеспечения энергоэффективной и экологически безопасной эксплуатации морского судна. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2016.
11. Мясников Ю.Н., Хорошев В.Г. Совершенствование системы централизованного контроля энергетической установки плавучей атомной теплоэлектростанции // Судостроение. 2016. № 4. С. 18–24.
12. Мясников Ю.Н., Никитин А.М. Характеристики пропульсивного комплекса в проблеме обеспечения энергоэффективной и экологически безопасной эксплуатации морского судна // Судостроение. 2017. № 5. С. 33–40.
13. Мясников Ю.Н., Никитин В.С., Равин А.А. Эксплуатационные дефекты судовых дизельных и газотурбинных двигателей // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. № 3(385). С. 85–95.
14. Никитин А.М. Управление технической эксплуатацией судов. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2006.
15. Мясников Ю.Н., Никитин В.С., Равин А.А., Хруцкий О.В. Методы прогнозирования технического состояния судового энергетического оборудования. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. № 4(386). С. 117–132.

References

1. Sagaidakov F., Chernetsova N., Guryanov S. Foreign navies in 2014. State of the art and prospects // Sudostroenie (Shipbuilding). 2015. No. 2. P. 10–23 (in Russian).
2. Myasnikov Yu., Ivanchenko A., Nikitin A. Information technologies in propulsion system of sea-going ship. St. Petersburg, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2013 (in Russian).
3. Pustoshny A. EEDI – a new reality from IMO // Sudostroenie (Shipbuilding). 2012. No. 1. P. 11–17. (in Russian).
4. Myasnikov Yu. Fleet operation based on actual technical condition as a relevant today's task // Sudostroenie (Shipbuilding). 2015. No. 2. P. 49–52 (in Russian).

5. *Myasnikov Yu.* Diagnostic module of marine power plant // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2016. No. 1. P. 24–29 (*in Russian*).
6. *Krylov A.* Memoirs. St. Petersburg, Politekhnika, 2014 (*in Russian*).
7. *Kostylev I., Myasnikov Yu., Petukhov V.* Human error and navigation safety // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2014. No. 3. P. 36–41 (*in Russian*).
8. *Kostylev I., Myasnikov Yu., Petukhov V.* Navigation safety and challenges in training of marine engineers // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2014. No. 6. P. 26–27 (*in Russian*).
9. Regulatory Document RD 31.20.19-93. Integrated system for ship maintenance and repair. General industrial rules of diagnostic metrological assistance to ships. Moscow, JSC TsNIIMF, 1993 (*in Russian*).
10. *Myasnikov Yu., Nikitin A.* Propulsion system parameters as part of power-efficient and eco-friendly operation of sea-going vessel. St. Petersburg, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2016 (*in Russian*).
11. *Myasnikov Yu., Khoroshev V.* Improvement of centralized control system for floating NPP reactor // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2016. No. 4. P. 18–24 (*in Russian*).
12. *Myasnikov Yu., Nikitin A.* Propulsion system parameters as part of power-efficient and eco-friendly operation of sea-going vessel // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2017. No. 5. P. 33–40 (*in Russian*).
13. *Myasnikov Yu., Nikitin V., Ravin A.* Service defects of ship diesel and gas-turbine engines // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2018. No. 3(385). P. 85–95 (*in Russian*).
14. *Nikitin A.* Ship operation management. St. Petersburg, Publishing House of St. Petersburg Polytechnical University, 2006 (*in Russian*).
15. *Myasnikov Yu., Nikitin V., Ravin A., Khrutsky O.* Prediction methods for technical condition of shipboard power machinery // *Transactions of the Krylov State Research Centre*, 2018, No. 4(386), P. 117–132 (*in Russian*).

Сведения об авторе

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: krylov@krylov.spb.ru.

About the author

Yury N. Myasnikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 748-64-08. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 11.10.18
Принята в печать / Accepted: 30.01.19
© Мясников Ю.Н., 2019