

Начало XXI в. характеризуется интенсивным изменением в военном кораблестроении, кардинально меняется облик надводных кораблей, расширяется спектр решаемых ими задач, приоритетное развитие получают ракетные системы с унифицированными вертикальными пусковыми установками, существенный скачок происходит в развитии радиоэлектронного вооружения и средств радиоэлектронной борьбы [1, 2]. По мере эволюционного развития оружия и вооружения кораблей происходит совершенствование и развитие корабельных тепловых двигателей и энергетических установок (ЭУ), созданных на их основе. У конструкторов происходит переосмысление идеологии обоснования облика ЭУ (т. е. типа, состава и схемного исполнения) и архитектуры ее комплектования при размещении внутри корпуса корабля.

Направленность развития корабельных ЭУ предопределяет в первую очередь достигнутый уровень совершенства корабельных тепловых двигателей в плане термодинамической эффективности, агрегатной мощности, надежности и степени автоматизации. Однако, как показывает многолетний опыт, этот уровень определяется не только характеристиками используемых тепловых двигателей, но и характеристиками схемного исполнения ЭУ. В данном случае подразумевается рациональное сочетание количества используемых в составе ЭУ главных двигателей (как правило, газотурбинных и дизельных), их агрегатной мощности, способов передачи крутящего момента на винт (механический или электрический), а также способов обеспечения работоспособности главных двигателей в составе одного агрегата (совместная или раздельная работа). Все перечисленное выше определяет архитектуру комплектования ЭУ, или ее облик.

Анализируя тенденции развития ЭУ многоцелевых кораблей в последние десятилетия, можно заметить, что их совершенствование происходит в направлении удовлетворения ужесточающихся от поколения к поколению тактико-технических требований к кораблям. Так, например, при неснижающихся требованиях к маневренности и скорости полного хода растут требования к дальности плавания и автономности кораблей: для кораблей класса «фрегат» или «эскадренный миноносец» дальность плавания должна составлять не ниже 7000 миль, хотя в недалеком прошлом она не превышала 5000 миль.

Перспективные многоцелевые корабли проектируют, исходя из условия длительного нахождения на боевой службе в различных регионах Мирового океана (до двух лет) без захода в свою

АНАЛИЗ ОБОСНОВАННОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОБЛИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОРАБЛЕЙ

*А.В. Шляхтенко, д-р техн. наук, проф., ген. директор,
И.Г. Захаров, д-р техн. наук, проф., зам. ген. директора
по перспективному проектированию,*

*В.В. Барановский, д-р техн. наук, проф., зам. ген. директора
по энергетическим установкам, судовым системам и устройствам,
АО «ЦМКБ «Алмаз»,
контакт. тел. (812) 373 8300, 369 1233*

базу приписки [3]. В связи с этим к системам и механизмам ЭУ предъявляются повышенные требования к надежности, живучести, долговечности и ремонтпригодности. Проектанты одной из основных целей ставят доведение коэффициента оперативной готовности до 5000 часов в год (коэффициент оперативного напряжения $K_{он} = 0,57$) и обеспечение ресурса главных двигателей до проведения капитального ремонта в 30 000 часов. Интервал между доковыми ремонтами определен в пять лет [3]. Весьма серьезно ужесточились требования к акустической скрытности кораблей и плавности изменения хода при выполнении поисковых задач с буксируемой ГАС.

Однако одним из основных требований при развитии и совершенствовании ЭУ остается требование минимизации расхода топлива кораблем в широком диапазоне ходовых режимов. Реализация указанного требования представляет собой сложную оптимизационную задачу при формировании облика ЭУ перспективного корабля.

Специалистами АО «ЦМКБ «Алмаз» при формировании архитектуры ЭУ перспективного корвета пр. 20386 в соответствии лучшими мировыми аналогами было принято решение об его оснащении газотурбинной ЭУ с системой частичного электродвижения. Вместе с тем это решение было новым, инновационным, так как не имеет аналогов внедрения такой системы на боевых кораблях ограниченного водоизмещения.

При обосновании облика ЭУ корвета «Меркурий» бюро приходилось решать несколько оптимизационных, зачастую противоречивых, задач. К ним относятся: обеспечение маневренности и скорости полного хода корабля при минимизации массы и габаритов ЭУ, а также экономичности ЭУ и наибольшей дальности плавания маршевыми ходами, минимизация стоимости постройки корабля при комплектовании ЭУ современными тепловыми двигате-

лями, обеспечение кораблю заданной интенсивности использования (коэффициента оперативного напряжения) при ограниченности ресурса главных двигателей и т. п.

Ниже приводится обоснование технических решений при формировании облика ЭУ корвета «Меркурий» для достижения высокой топливной экономичности и наибольшей дальности плавания. Остальные показатели, такие как маневренность, надежность, скрытность и др., выносятся за рамки рассмотрения в силу ограниченности объема материала.

Как известно, наиболее информативной характеристикой при обосновании экономичности корабельной ЭУ является характеристика удельных расходов топлива входящих в состав ЭУ тепловых двигателей, которая в отличие от часового расхода топлива свидетельствует об эффективности топливопотребления. Ее физический смысл – расход топлива двигателями, затрачиваемый на единицу генерируемой мощности. Понятно, что чем меньше расход топлива, тем более экономичной является ЭУ и тем большая дальность плавания может быть достигнута кораблем.

На рис. 1 и рис. 2 представлены кривые удельных расходов топлива дизель-генераторов ДГАС-1600 с дизелем V12 ДМ-185 и газотурбинных двигателей (ГТД) М90ФР, входящих в состав ГЭУ корвета «Меркурий».

Как следует из анализа рисунков, в силу особенностей конструктивного исполнения и протекающих термодинамических процессов преобразования тепловой энергии сгораемого топлива в механическую работу у газотурбинных и дизельных двигателей характер изменения удельных расходов топлива существенно различается.

Минимальный удельный расход топлива у ГТД наблюдается на номинальной нагрузке, и диапазон его изменения весьма широкий, в пределах от 237 до 700 г/(кВт·ч) и более

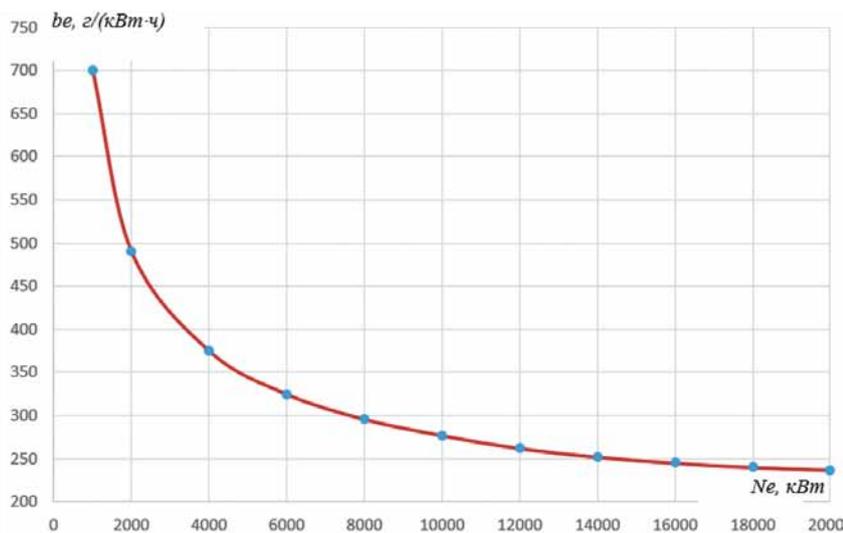


Рис. 1. Изменение удельного расхода топлива дизельного двигателя 12ДМ-185 производства ООО «Уральский дизель-моторный завод»

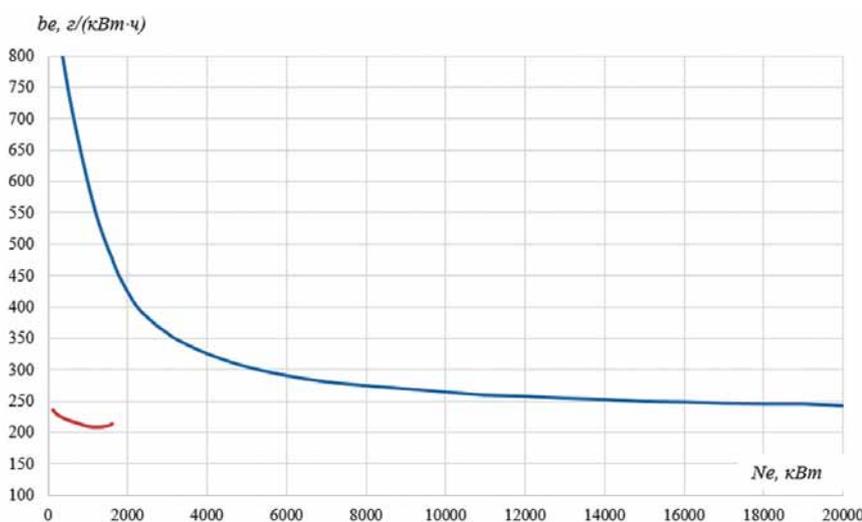


Рис. 2. Изменение удельного расхода топлива ГТД М90ФР в зависимости от нагрузки

— ГТД М90ФР
— ДГАС-1600

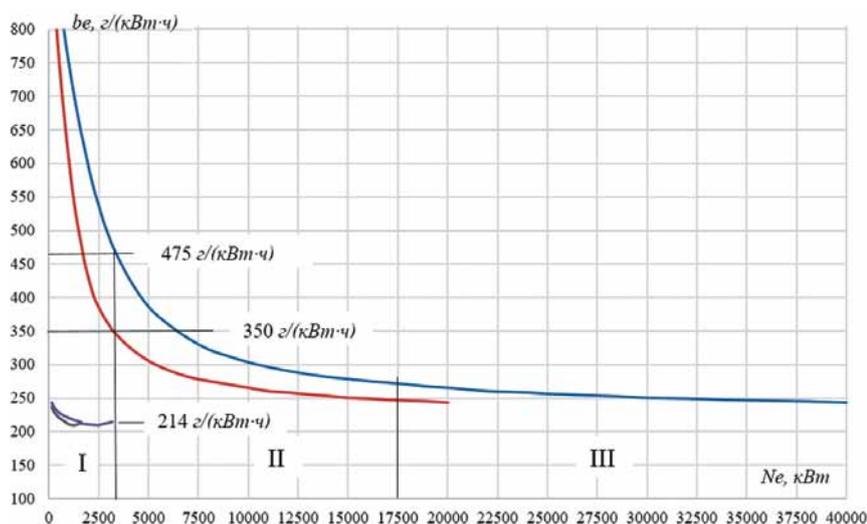


Рис. 3. Совмещенный график изменения удельных расходов топлива ГТД М90ФР и ДГАС-1600 корвета «Меркурий»

— совместная работа двух ГТД М90ФР
— работа одного ГТД М90ФР
— работа двух ГЭД от одного ДГАС-1600
— работа двух ГЭД от двух ДГАС-1600

(см. рис. 2). Следует отметить, что наибольшая экономичность ГТД достигается на нагрузках, время работы двигателя на которых в связи с ускоренным истощением ресурса ограничено.

У дизельных двигателей конструктивно можно предусмотреть изменение удельного расхода топлива таким образом, что его минимум будет приходиться на нагрузку 70–80% от номинальной (см. рис. 1), на которой двигатель может работать большую часть времени без ограничений. Кроме того, диапазон изменения удельного расхода топлива дизелем V12 ДМ-185 находится в пределах 209–236 г/(кВт·ч), т. е. существенно более узкий, чем у ГТД.

При совмещении удельных расходов топлива главных двигателей на одном графике картина в плане информативности для выбора экономичных режимов работы ЭУ становится еще более показательной (рис. 3).

Здесь можно наблюдать узкий диапазон изменения агрегатной мощности дизеля с достаточно высокой экономичностью и широкий диапазон изменения агрегатной мощности ГТД с приемлемой экономичностью лишь на больших нагрузках – более 14 МВт.

Учитывая, что в состав ГЭУ корабля включают два ДГАС-1600 и два ГТД М90ФР, при разработке совмещенных графиков изменения удельных расходов топлива необходимо учитывать возможность их совместной, т. е. параллельной, работы. В этом случае кривая удельных расходов топлива растягивается по оси абсцисс пропорционально суммарной мощности параллельно работающих двигателей. Здесь представлена информация об удельном расходе топлива для различного состава работающих главных двигателей корвета «Меркурий».

На рис. 3 выделены три зоны. Зона I характеризует малые скорости хода корабля, от 0 до 14 уз, или изменение мощности ГЭУ от 0 до 3200 кВт. Указанный скоростной (мощностной) диапазон может обеспечиваться несколькими режимами работы ГЭУ с различным составом действующих механизмов и с различной степенью топливной эффективности.

Самым эффективным является режим движения корабля под двумя ГЭД, обеспечиваемый параллельной работой двух дизель-генераторов ДГАС-1600.

Режим работы одного ГТД через межредукторную перекидку (МРП) на две линии вала гораздо менее эффективен, а режим работы двух ГТД, каждый на свою линию вала, самый неэффективный.

При движении корабля под двумя ГЭД от 2×ДГАС-1600 удельный расход топлива составит минимальное зна-

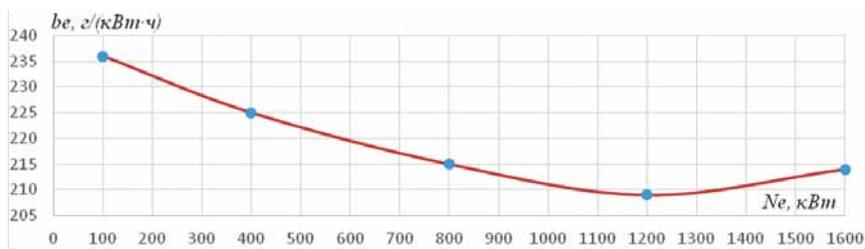


Рис. 4. Изменение удельного расхода топлива различным составом работающих главных двигателей корвета «Меркурий»



Рис. 5. Дизель-газотурбинный агрегат М55Р

чение: ~ 214 г/(кВт·ч), соответственно, часовой расход топлива составит $B_{\text{ч}} = b_e \cdot N_e = 0,214 \cdot 3200 \approx 685$ кг/ч, а суточный расход $\approx 16,4$ т/сут.

При движении корабля с такой же скоростью (14 уз) под одним ГТД М90ФР через МРП на две линии вала соответствующие расходы топлива составят: ~ 350 г/(кВт·ч), 1120 кг/ч, или $\approx 26,9$ т/сут. А при движении корабля с использованием двух ГТД расходы топлива кораблем будут наибольшими, соответственно ~ 475 г/(кВт·ч), 1520 кг/ч, или $\approx 36,5$ т/сут., т. е. разница между наилучшим и наихудшим способами использования ГЭУ в плане топливной экономичности составляет более чем в 2 раза.

Зона II соответствует скоростям хода корабля в диапазоне от 14 до примерно 24 уз, которая может обеспечиваться двумя альтернативными способами: под одним либо под двумя ГТД, работающими на две линии вала. Первый вариант использования ГЭУ более предпочтителен по отношению ко второму варианту, но по мере увеличения скорости хода корабля эти различия постепенно стираются.

Зона III соответствует высоким скоростям хода корабля и обеспечивается безальтернативной работой двух ГТД. И хотя на эту зону приходится не более 20% всех миссий корабля, такие режимы обеспечиваются с достаточно высокой топливной эффективностью, т. е. с минимальными удельными расходами топлива (рис. 4).

Следует отметить, что основная доля всех миссий корабля (порядка 80%) реализуется в I и II зонах ходовых режи-

мов, причем, если в зоне I режимы движения обеспечиваются с достаточно высокой экономичностью, то в зоне II экономичность ЭУ ниже, так как эти режимы обеспечиваются менее экономичными ГТД. Поэтому, исходя из соображений обеспечения минимальных расходов топлива и наибольшей дальности плавания корабля, конструкторы АО «ЦМКБ «Алмаз» стремились зону I сдвинуть вправо, насколько это возможно, с учетом вышеизложенных ограничений. В результате удалось в зоне I обеспечить ходовые режимы до 14 уз включительно, что полностью закрывает практически все малозумные режимы поиска подводной лодки при решении задач ПЛО.

С учетом сложности реализации большинства режимов плавания корабля с помощью какой-либо одной схемой конструкторами АО «ЦМКБ «Алмаз» была реализована идея межредукторной перекидки, позволяющая обеспечить работу любого из ГТД или ГЭД на обе линии вала. Такое техническое решение позволяет перекрыть практически весь диапазон основных миссий корабля (зону II) более экономичной работой одного ГТД М90ФР (см. рис. 4). Кроме того, такое решение повышает структурную надежность и живучесть ГЭУ.

Следует отметить, что по мере роста агрегатной мощности используемых дизельных приводов и гребных электродвигателей системы электродвижения пропорционально возрастают их габариты и масса, а также габариты и масса остального обеспечивающего оборудования (генераторы электроэнергии, ста-

тические преобразователи и др.), которые в какой-то момент могут выходить за рамки ограничений по нагрузке масс ЭУ и даже за пределы обводов корпуса корабля.

Для сравнения, за рубежом достигнутый уровень обеспечения движения корабля под ГЭД для фрегатов серий FREMM и фрегата пр. 26 «Global Combat Ship» составляет 16 уз, а для немецких фрегатов серии F125 с дизель-генераторами фирмы MTU 20V 4000 мощностью 4×2900 кВт удалось достичь скорости движения под ГЭД в 20 уз. Но здесь следует учитывать, что это корабли гораздо большего водоизмещения – до 8000 т, т. е. более чем в 2 раза превышают водоизмещение корвета «Меркурий», а, как известно, по мере роста водоизмещения ограничения по массе и габаритам оборудования ЭУ не так строги.

Возвращаясь к обоснованию облика ЭУ перспективных многоцелевых кораблей в более общем плане, необходимо заметить, что системы частичного электродвижения остаются более предпочтительными и для кораблей классов «фрегат» и «эскадренный миноносец» по сравнению с традиционно используемыми прямоточными схемами COGAG передачи крутящего момента от ГТД на винт. В этом можно убедиться путем выполнения расчетов, аналогичных приведенным выше, применительно к пр. 20386. Однако альтернативной схематикой COGAG уже с начала 60-х гг. до начала 2000-х гг. стали комбинированные дизель-газотурбинные ГЭУ с прямоточной передачей крутящего момента от теплового двигателя через редуктор на винт схемного исполнения CODAG или CODOG, получившие широкое распространение на надводных кораблях. Данный тип схемного исполнения достаточно хорошо зарекомендовал себя в эксплуатации, не потерял своей актуальности и используется на современных кораблях и по настоящее время. Например, ЭУ схемного исполнения CODAG используются на фрегатах ВМС Германии F124 типа «Sachsen», а схемного исполнения CODOG – на эсминцах ВМС Франции типа «Horizon» и эсминцах ВМС Италии типа «Andrea Doria». В отечественном ВМФ ЭУ схемного исполнения CODOG, разработанная по техническому заданию АО «ЦМКБ «Алмаз» для надводного корабля «Гром», в настоящее время используется на фрегатах пр. 22350. В состав дизель-газотурбинного агрегата М55Р (рис. 5) входят: ГТД М90ФР мощностью 20 200 кВт, главный дизель 10 Д49 (16ЧН 26/26) мощностью 3825 кВт, реверсивный редуктор РО-55 и система управления.

С целью достижения высокой топливной экономичности и наибольшей дальности плавания корабля ЭУ схемного исполнения CODAG или CODOG являются более предпочтительными по сравнению с ЭУ с частичным электродвижением схемного исполнения CODLAG или CODLOG, поскольку исключают двойное преобразование энергии при передаче крутящего момента на винт. Так, суммарные потери при передаче крутящего момента на винт с использованием дизель-электрической схемы составляют не менее 10% ($\eta_{\Sigma} = 0,9$). Для сравнения, механические потери в редукторе и валопроводах с прямодействующей передачей крутящего момента на винт схемного исполнения CODAG или CODOG составляют всего около 3% ($\eta_p = 0,97$). Но, хотя использование частичного электродвижения приводит к снижению экономичности ГЭУ на 7–8%, тем не менее подобные схемы получили широкое распространение за рубежом на таких кораблях, как фрегаты FREMM ВМС Франции и ВМС Италии, фрегаты пр. 26 «Global Combat Ship» британских ВМС и пр. F125 ВМС Германии. Данное обстоятельство, учитывая многоцелевой характер использования таких кораблей, очевидно обусловлено положительным опытом применения частичного электродвижения при выполнении кораблями поисковых задач ПЛО, в особенности с буксируемой ГАС. Такими качествами, как малолучность и плавность изменения хода, обладают только гребные электрические приводы. При использовании прямодействующих дизельных или газотурбинных приводов на малых ходах в режиме поиска подводной лодки возникает множество проблем, связанных с неустойчивой работой дизеля или газовой турбины на малых оборотах. В частности, наблюдается повышенная вибрация дизелей, а также отсутствует возможность управления изменением частоты вращения гребного вала непосредственно с ходового мостика, минуя машинный телеграф.

Таким образом, в силу указанных выше неоспоримых преимуществ частичного электродвижения по сравнению с прямодействующими приводами ЭУ схемного исполнения CODLAG и CODLOG находят массовое применение за рубежом, несмотря на определенное снижение топливной экономичности.

Последние разработки в области электротехники позволяют существенно нивелировать негативное влияние двойного преобразования энергии при передаче крутящего момента на винт в плане снижения топливной экономичности.

Среди таких разработок можно выделить:

- использование новых технологий, таких как производство твердотельных полупроводников в силовом электрооборудовании, использование постоянных магнитов с полем большой индуктивности и высокотемпературной сверхпроводимости, что позволяет снизить потери при двойном преобразовании энергии, связанных с применением системы электродвижения, и значительно повысить КПД при передаче мощности [6];
- применение в сети питания ГЭД напряжения до 6300 В, чтобы снизить потери, имеющие место при наличии в электродвижении низковольтной силовой сети (400 В). Ожидается, что потери при этом сократятся в два раза.

Кроме того, на основе проведенных расчетов можно выработать предложения по перспективному дальнейшему развитию корабельных тепловых двигателей, которые могут быть востребованы, в том числе и при использовании частичного электродвижения.

Среди таких предложений можно выделить:

- завершение создания на ООО «УДМЗ» дизель-генераторов на базе дизеля ДМ-185 и развитие на его основе линейки высокооборотных корабельных дизельных двигателей в мощностном диапазоне от 800 до 4600 кВт. Разработка и создание линейки корабельных дизелей данной серии позволит приблизиться к мировым лидерам дизелестроения, таким как, например, MTU серий: 16V 2000, 16V 4000 и 16V 1163, и снять ряд ограничений по массе и габаритам оборудования ЭУ;
- разработку ПАО «ОДК-Сатурн» на основе базового ГТД М90ФР перспективного корабельного ГТД М90ФРМ мощностью 25 МВт, а также перспективного ГТД 5-го поколения МГТД-35 мощностью 35 МВт и более [4, 5]. Указанные направления не противоречат разработкам

мировых лидеров корабельного газотурбостроения, таких как Rolls-Royce и General Electric.

В заключение можно еще раз подчеркнуть, что в начале XXI в. кардинально изменились устоявшиеся с начала 70-х – середины 80-х гг. взгляды конструкторов на формирование облика ЭУ многоцелевых кораблей. Канули в прошлое устаревшие газотурбинные ЭУ схемного исполнения COGAG, маршевая часть ЭУ стала замещаться исключительно дизельными двигателями взамен ранее устанавливаемых газотурбинных. В обеспечение малолучных поисковых режимов работы ЭУ при решении кораблем задач ПЛО вместо прямодействующих приводов от дизеля (через редуктор) на винт повсеместно стали применяться дизель-электрические приводы, где дизели используются в качестве приводов генераторов, а передача крутящего момента на винт осуществляется за счет гребных электродвигателей. При этом, как это подтверждается расчетами, даже при наличии значительных потерь энергии в процессе двойного ее преобразования, ЭУ с частичным электродвижением все равно является более предпочтительной в плане топливопотребления по сравнению с газо-газотурбинной установкой. В результате на современных и перспективных надводных кораблях наблюдается абсолютное доминирование энергетических установок схемного исполнения CODLOG или CODLAG.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Захаров И. Г., Шляхтенко А. В.* Корветы: Концептуальное проектирование. – СПб.: ООО «Береста», 2012. – 228 с.
2. *Шляхтенко А. В., Захаров И. Г.* Тенденции развития многоцелевых кораблей океанской зоны // Национальная оборона. – 2019. – № 7 (июль). – С. 86–90.
3. *Хализов А.* Перспективный фрегат проекта F-125 ВМС Германии // Зарубежное военное обозрение. – 2009. – № 5. – С. 67–74.
4. *Чутин П. В.* Российский газотурбинный двигатель М90 ФР. – Доклад на секции НТО им. А. Н. Крылова, СПб., 21.03.2018 г.
5. *Чутин П. В.* Результаты работы по импортозамещению украинских морских ГТД. – Доклад на межотраслевой науч.-практ. конфер. «ВОКОР-2018», ВУНЦ ВМФ «НИИ КиВ», СПб., 2018.
6. *Шинкоренко Д.* Перспективы развития энергетических установок надводных кораблей ВМС зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. – 2007. – № 1. – С. 54–61; № 3. – С. 58–61. ■