

ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ И СПОСОБОВ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ КОРАБЕЛЬНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ 5-го ПОКОЛЕНИЯ

В. Н. Половинкин, докт. техн. наук (ФГУП «Крыловский государственный научный центр»), **В. В. Барановский**, докт. техн. наук (ВУНЦ ВМФ «ВМА»), **Д. Ю. Колодяжный**, канд. техн. наук (АО «Объединенная судостроительная корпорация») УДК 629.5.03-843.8

ESTIMATING FEASIBILITY AND DEVELOPMENT METHODS OF SHIPBOARD GAS-TURBINE MOTOR OF 5TH GENERATION

V. N. Polovinkin, Doctor of Engineering science (FSUE «Krylov shipbuilding research institute»), **V. V. Baranovsky**, Doctor of Engineering science (MSTC «VMA»), **D. Yu. Kolodyazhny**, Candidate of Engineering science (JSC «United Shipbuilding Corporation»)

Газотурбинный двигатель (ГТД) — сложнейший объект как по конструкторско-технологической размерности, так и по числу инженерных решений и ноу-хау, заложенных в конструкции и производстве. Зонами существенного влияния, определяющими облик двигателя, являются узлы компрессора, камеры сгорания и турбины. Каждый узел вносит свой вклад в такие важнейшие параметры машины, как удельная масса, ресурс, мощность, эффективность, обеспечение которых требует решения сложнейшего комплекса конструкторско-технологических задач с применением самых последних достижений науки и техники.

Судовые и корабельные газотурбинные двигатели можно классифицировать по различным признакам:

1. По использованию ГТД в составе судовой энергетической установки (СЭУ):

- главные, применяемые для обеспечения движения судна;
- вспомогательные, используемые для получения тепловой и электрической энергии (газотурбогенераторы — ГТГ).

В свою очередь, главные ГТД разделяются на:

- маршевые, используемые на экономических ходах в целях обеспечения установленной дальности плавания;
- форсажные (ГТД полного хода), предназначенные для обеспечения хода от экономического до полного;
- всережимные, используемые на всех режимах работы СЭУ.

2. По конструкции проточной части:

- активные, в которых преобразование энергии потока газа происходит только в направляющем аппарате;
- реактивные, в которых преобразование энергии потока газа происходит как в направляющем аппарате, так и в каналах рабочих лопаток;
- смешанные, сочетающие в себе активную и реактивную части.

3. По блокированию турбин и компрессоров:

— с заблокированными турбинами и компрессорами;

— со свободной пропульсивной турбиной (турбиной винта).

(В судовых ГТД максимально используемое число компрессоров — 2, максимально используемое число турбин — 3.)

4. По использованию в термодинамическом цикле теплообменных аппаратов:

- без использования теплообменных аппаратов;
- с регенератором;
- с промежуточными охладителями воздуха;
- с промежуточным подогревом газа;
- с котлом-утилизатором;
- комбинированные (с использованием нескольких видов теплообменных аппаратов).

5. По току рабочего тела в компрессорах и турбинах:

- прямоточные, в которых воздух и продукты сгорания движутся вдоль оси двигателя последовательно через проточные части компрессоров, камеры сгорания и проточные части турбин без изменения направления движения;

— непрямоточные. В состав таких двигателей (установок) входят регенераторы, промежуточные охладители воздуха и другие теплообменные аппараты, при протекании через которые воздух и продукты сгорания меняют направление своего движения.

6. По направлению потока рабочего тела в проточной части:

- осевые, в которых поток воздуха в компрессоре или газа в турбине движется вдоль оси двигателя;
- радиальные, в которых поток воздуха (газа) при входе в ступень компрессора (турбины) движется вдоль оси двигателя, а выходит из ступени в направлении, перпендикулярном оси двигателя.

7. По расположению турбин относительно компрессоров:

- с прямым соединением турбомашин, когда турбина соединена с валом одно-

менного компрессора (ТВД — КВД, ТНД — КНД);

— с перекрестным соединением турбомашин;

— с полуперекрестным соединением турбомашин.

8. По типу пропульсивной турбины:

— с пропульсивной турбиной высокого давления (ТВД);

— с пропульсивной турбиной среднего давления;

— с пропульсивной турбиной низкого давления (ТНД).

9. По возможности осуществления реверса:

— реверсивные с турбиной заднего хода;

— реверсивные с двухъярусными лопатками и разделением потоков;

— с реверсивными центростремительными турбинами;

— неревверсивные.

10. По кратности циркуляции рабочего тела:

— с однократной циркуляцией — ГТД открытого цикла, обычно используемые в качестве судовых и корабельных двигателей;

— с многократной циркуляцией — ГТД закрытого цикла, используемые в ядерных газотурбинных установках (ЯГТУ).

11. По виду производимой работы:

— ГТД по выработке механической энергии, работающие на водяной или воздушный винт либо приводящие в действие электрогенераторы;

— ГТД по выработке газодинамической энергии — турбореактивные двигатели.

12. По роду используемого топлива:

— ГТУ, работающие на природном органическом топливе;

— ГТУ, использующие ядерное топливо (ЯГТУ). ЯГТУ, в свою очередь, могут быть одноконтурными и многоконтурными. Вместо камеры сгорания нагрев газа происходит в активной зоне газоохлаждаемого ядерного реактора, а после завершения работы в газовой турбине газ направляется в регенератор и охладитель.

13. По роду рабочего тела:

— с использованием воздуха (как правило, ГТД открытого цикла);

— с использованием инертных газов — водорода, гелия, азота, угле-

кислого газа — для перспективных ЯГТУ закрытого цикла.

Развитие корабельных ГТД осуществлялось в соответствии с ужесточением требований к силовой установке в части, касающейся надежности, экономичности, живучести и безопасности, и обеспечивалось повышением параметров рабочего процесса, применением новых материалов, перспективных технологий и новых конструкторских, технологических и технических решений.

У истоков создания корабельных ГТД стояли отечественные специалисты: Владимир Матвеевич Маковский (1870—1941) — создатель отечественной школы газотурбиностроения и первой в СССР кафедры турбиностроения при Харьковском механико-машиностроительном институте; Владимир Васильевич Уваров (1899—1977); Борис Сергеевич Стечкин (1891—1969) — академик АН СССР, Герой Социалистического Труда, создатель теории воздушно-реактивных двигателей и методов их расчета, создатель теории теплового расчета авиационных газотурбинных двигателей; Григорий Иванович Зотиков (1898—1970), который начиная с 1930 г. стал успешно заниматься вопросами использования газовой турбины в качестве главного корабельного двигателя (в его монографии «Проблема турбины внутреннего сгорания. Турбина равного давления» (1933 г.) и ряде статей был изложен новый теоретический подход к сравнительной оценке циклов газотурбинных двигателей, разработаны вопросы эффективно охлаждения основных элементов газовой турбины, рациональной конструкции проточной части и целесообразных схем ГТУ. В 1935—1941 гг. под руководством Г. И. Зотикова начались работы по созданию опытной турбины — корабельного ГТД с промежуточным охлаждением и регенерацией мощностью 2570 кВт.); Архип Михайлович Люлька (1908—1984) — генеральный конструктор авиационных газотурбинных двигателей, академик АН СССР; Александр Георгиевич Ивченко (1903—1968) — известный украинский конструктор авиационных двигателей, академик АН УССР, создатель турбореактивных и турбовинтовых двигателей для самолетов многих типов; Сергей Дмитриевич Колосов (1904—1975) —

известный украинский конструктор авиационных и судовых двигателей, академик АН УССР (Благодаря его трудам и трудам созданной им конструкторской школы город Николаев стал родиной отечественного корабельного и судового, а впоследствии — энергетического газотурбиностроения.). Созданием различного типа газотурбинных установок также занимались такие талантливые российские инженеры и изобретатели, как П. Д. Кузьминский, В. В. Каровин, Н. В. Герасимов, А. П. Горохов, М. Н. Никольский, А. Н. Шелест и многие другие. Первым крупным боевым кораблем с газотурбинной энергетической установкой стал отечественный противолодочный корабль пр. 61.

К настоящему времени отечественным энергомашиностроительным предприятием ПАО «ОДК-Сатурн» освоено производство корабельных ГТД 4-го поколения, таких как М75РУ и М70ФРУ, мощностью соответственно 5000 и 10 000 кВт, а также завершена локализация производства ГТД М90ФР мощностью 20 000 кВт (рис. 1). ГТД М90ФР до недавнего времени разрабатывался и создавался совместными усилиями предприятий России и Украины, соответственно в ПАО «ОДК-Сатурн» и на ГП НПКГ «Зоря—Машпроект». Локализация производства указанных двигателей на отечественном предприятии ознаменовала собой своеобразный этап освобождения отечественного ВМФ от иностранной зависимости, связанной с поставками ГТД и их комплектующих для надводных кораблей. Осознание необходимости производства корабельных ГТД на отечественных предприятиях произошло еще в начале 90-х годов, сразу после распада СССР, однако этот сложный процесс растянулся на период более 20 лет.

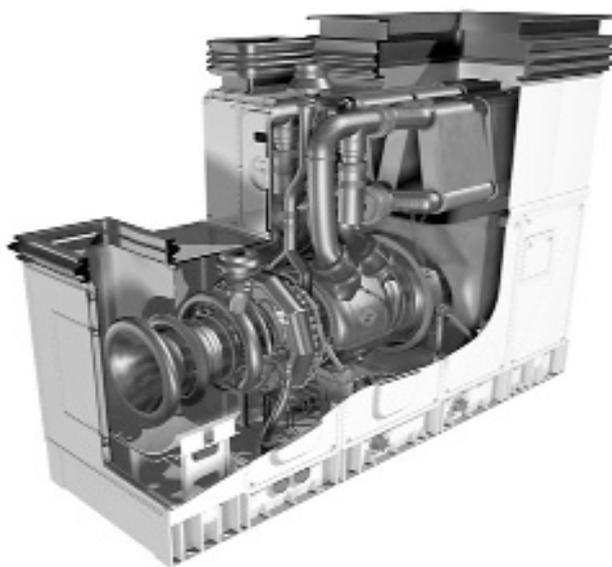
Пока у нас решалась задача освоения производства корабельных ГТД на отечественных предприятиях, ведущими зарубежными энергомашиностроительными фирмами было освоено производство ГТД нового 5-го поколения. В частности, англо-американскими корпорациями Rolls-Royce-Northrop Grumman и Westinghouse Marine Division было освоено производство корабельных ГТД сложного цикла WR-21 (рис. 2) мощностью 25,9 МВт с КПД 43,7%.



Рис. 1. Мощный ряд отечественных корабельных ГТД: а — М75РУ (5000 кВт); б — М70ФРУ (10 000 кВт); в — М90ФР (20 000 кВт)

Контракт на создание ГТД WR-21 был заключен в декабре 1991 г. с группой, возглавляемой фирмой Westinghouse. В эту группу входили: Westinghouse Marine Division — генеральный подрядчик и создатель агрегата, Rolls-Royce — проектирование газовой турбины и проведение ОКР, Allied-Signal — разработчик регенератора и охладителя, CAE Electronics — разработчик системы управления. Другими словами, при создании ГТД сложного цикла были объединены усилия ведущих мировых энергомашиностроительных компаний — потенциальных конкурентов. К 2004 г. были завершены разработка и испытания двигателя. Временные затраты на его создание составили порядка 15 лет, а финансовые — более 2 млрд дол., что свидетель-

Рис. 2. ГТД сложного цикла WR-21



ствует о сложности и трудоемкости проведенных работ. На сегодняшний день этот двигатель используется в составе ЭУ на эскадренных миноносцах пр. 45 (рис.3) типа

«Daring» ВМС Англии (в составе ВМС — 6 ед., планировалось к постройке 8 ед.).

ГТД сложного цикла WR-21 с промежуточным охлаждением рабочего тела и регенерацией тепла уходящих газов обеспечивает 30%-ную экономию топлива на корабле. В отличие от ГТД простого открытого цикла, КПД такого двигателя продолжает оставаться высоким даже при существенном снижении нагрузки. Так, на 30%-ной нагрузке КПД ГТД WR-21 имеет значение порядка 43%, что сопоставимо с дизельными двигателями с самой высокой термодинамической эффективностью [1, 2].

Вторым зарубежным корабельным ГТД 5-го поколения считается самый мощный корабельный двигатель типа MT-30 корпорации Rolls-Royce мощностью 36 МВт и КПД более 40%, который находит



Рис. 3. ЭМ УРО пр. 45 «Daring»

широкое применение на кораблях новых проектов ВМС США и Англии.

вого двигателя начались с 2005 г., что свидетельствует о сжатых сро-

личину по сравнению с затратами на создание ГТД типа WR-21.

Характеристики двигателя представлены в табл. 1. Достижение высоких значений КПД 40% у ГТД простого открытого цикла стало возможным благодаря освоению высокой температуры газов перед турбиной (не менее 1350 °С), повышению степени сжатия рабочего тела до значений $\pi_k \geq 28$, а также совершенствованию аэродинамических характеристик проточных частей компрессора и газовой турбины.

Фирма Rolls-Royce рассматривает несколько вариантов продвижения ГТД MT-30 на рынок США, включающих его использование в программе DD(X) ВМС США, а также на кораблях береговой охраны, где двигатель может применяться в комбинированных ЭУ различной комплектации, и на кораблях, разра-



Рис. 4. Корабельный ГТД типа MT-30 фирмы Rolls-Royce

ГТД простого открытого цикла MT-30 (рис. 4) представляет собой морской вариант авиационного двигателя Trent 800 фирмы Rolls-Royce (рис. 5), разработанный для применения на боевых кораблях и торговых судах, где требуется высокая энергетическая насыщенность при плотной компоновке, с массогабаритными характеристиками стандартного промышленного двигателя мощностью не менее 25 МВт.

Фирма Rolls-Royce приступила к разработке ГТД MT-30 на инициативной основе в 2000 г., производство и поставка но-

как от начала до завершения разработки. Финансовые затраты также составили существенно меньшую ве-

батываемых по программе LCS (Littoral Combat Ship).

Турбина MT-30 используется также как базовый первичный двигатель для авианосцев типа CVF ВМС Англии «HMS Queen Elizabeth» и «HMS Prince of Wales» (рис. 6).

Разработка и создание газотурбинного двигателя 5-го поколения предполагает рост наиболее значимых параметров на уровне 30–40%. Такие двигатели по сравнению с двигателями 4-го поколения характеризуются меньшим количеством деталей, снижением удельной массы на 20–30% и удельно-

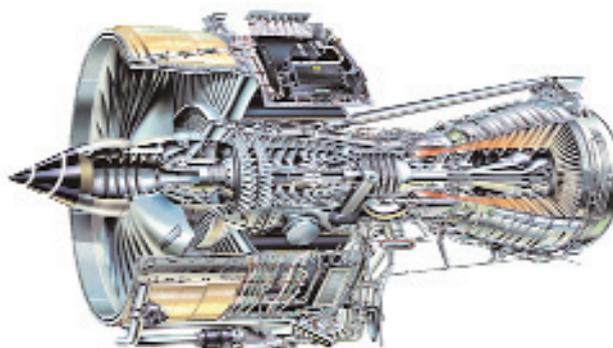


Рис. 5. Авиационный ГТД Trent 800 фирмы Rolls-Royce

| ГТД МТ-30 фирмы Rolls-Royce | | Таблица 1 |
|--|-------------------|-----------|
| Характеристика | МТ-30 | |
| Длина/ширина/высота, м | 8,600/3,953/4,139 | |
| Масса установки, т | 22 | |
| Масса турбины, т | 6,2 | |
| Коэффициент полезного действия, % | 40 | |
| Удельный расход топлива на полной нагрузке, кг/(кВт · ч) | 0,207 | |
| Мощность установки, кВт | 36 000 | |
| Температура отработавших газов, °С | 466 | |
| Частота вращения СТ, об/мин | 3600 | |

го расхода топлива на 15–20%, увеличением надёжности на 60–80%, снижением трудоемкости технического обслуживания примерно в 2–3 раза и стоимости жизненного цикла примерно в 1,3 раза [7].

Указанные критерии отличают авиационные двигатели 5-го поколения от двигателей 4-го поколения. Использование подобных критериев, с незначительной переработкой, поможет относить перспективные корабельные ГТД к 4-му или 5-му поколению или к промежуточному поколению 4+ или 4++.

Эволюционным путём достичь подобного повышения основных характеристик двигателя невозможно: требуется техническая революция, в том числе и с применением новых технологий их производства и новых конструкционных материалов. Это означает, что разработка и создание двигателя 5-го поколения сопряжена со значительными финансовыми и временными затратами на НИР и ОКР, которые не могут себе позволить энергомашиностроительные предприятия без государственной поддержки.

В качестве примера можно привести временные и финансовые затраты по ОКР на разрабатываемый перспективный авиационный двигатель ПД-35, которые соответственно составляют 10 лет и 180 млрд руб., что эквивалентно приблизительно 3 млрд дол. [3]. В эту сумму входят и затраты на капитальное строительство, что связано с новизной проекта.

ПД-35 (рис. 7) — двухконтурный турбореактивный двигатель сверхбольшой тяги, который предназначен для установки на перспективные широкофюзеляжные самолеты, в том числе С929 ШФДМС, и может быть установлен на Ил-96-400М.



Рис. 6. Авианосец ВМС Англии «HMS Queen Elizabeth»

Разработка двигателя ПД-35 началась летом 2016 г. В рамках работ над ПД-35 предполагается масштабировать газогенератор от перспективного двигателя ПД-14, который разрабатывается для среднемагистрального перспективного самолета МС-21, с добавлением дополнительной ступени на выходе из компрессора высокого давления (КВД).

Для выпуска двигателей семейства ПД-35 необходимо создавать практически новое производство, а также новую испытательную базу. На разработку и создание собствен-

но двигателя ПД-35 программой отводится 64,3 млрд руб. [3].

Такие колоссальные затраты необходимо понести даже с учетом того, что ПД-35 разрабатывается не «с чистого листа», а с использованием аэродинамической базы в ходе реализации проекта авиационного двигателя 5-го поколения ПД-14 для среднемагистрального самолета МС-21. В противном случае, без

учета указанных обстоятельств, затраты на ОКР были бы еще более существенными.

При разработке ПД-35 предполагается смоделировать КВД с добавленной ступенью и новой турбины высокого давления (ТВД) из новых материалов (в результате число ступеней компрессора и турбины ПД-35 составит 9 + 2).

Понятно, что значительные затраты на ОКР при разработке авиационных двигателей впоследствии окупаются при серийном их производстве и последующей эксплуатации благодаря снижению эксплуатационных затрат самолетного парка. Причем надо понимать, что на каждом вновь созданном двигателе предприятие несет убыток от 30 до 40 млн руб. Это стандартный показатель: как правило, до 400–420 экземпляров производства авиационных двигателей является убыточным. Основные деньги производители начинают зарабатывать с началом активной эксплуатации, планового ремонта и создания так называемого пула оборота двига-

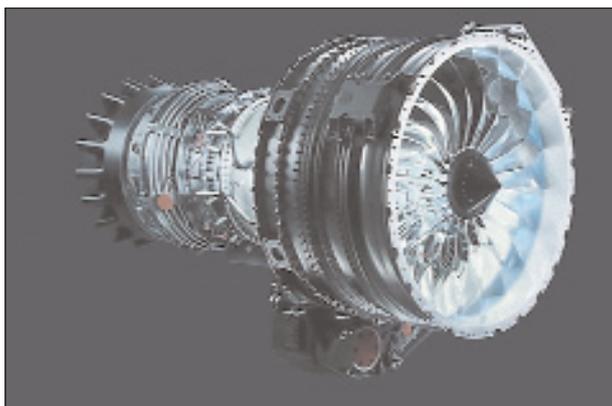


Рис. 7. Перспективный авиационный двигатель ПД-35

телей (пульная схема оборота компонентов позволяет обеспечить более эффективную поддержку запасными частями). Выход предприятия на рентабельность происходит не менее чем через пять лет [4].

Вопрос рентабельности производства нового корабельного ГТД звучит в абсолютно такой же постановке, особенно с учетом относительно низкой их се-



Рис. 8. Внешний вид корабельного ГТД LM2500 производства компании General Electric

ства корабельных ГТД в ПАО «ОДК-Сатурн» в Рыбинске, наиболее актуально стоят задачи налаживания их серийного производства, а также разработки и создания корабельных агрегатов на базе освоенных в производстве ГТД. Более того, по заявлениям руководителей фирмы «Сатурн», в морские силовые установки, которые разрабатывает предприятие, закладывается по-

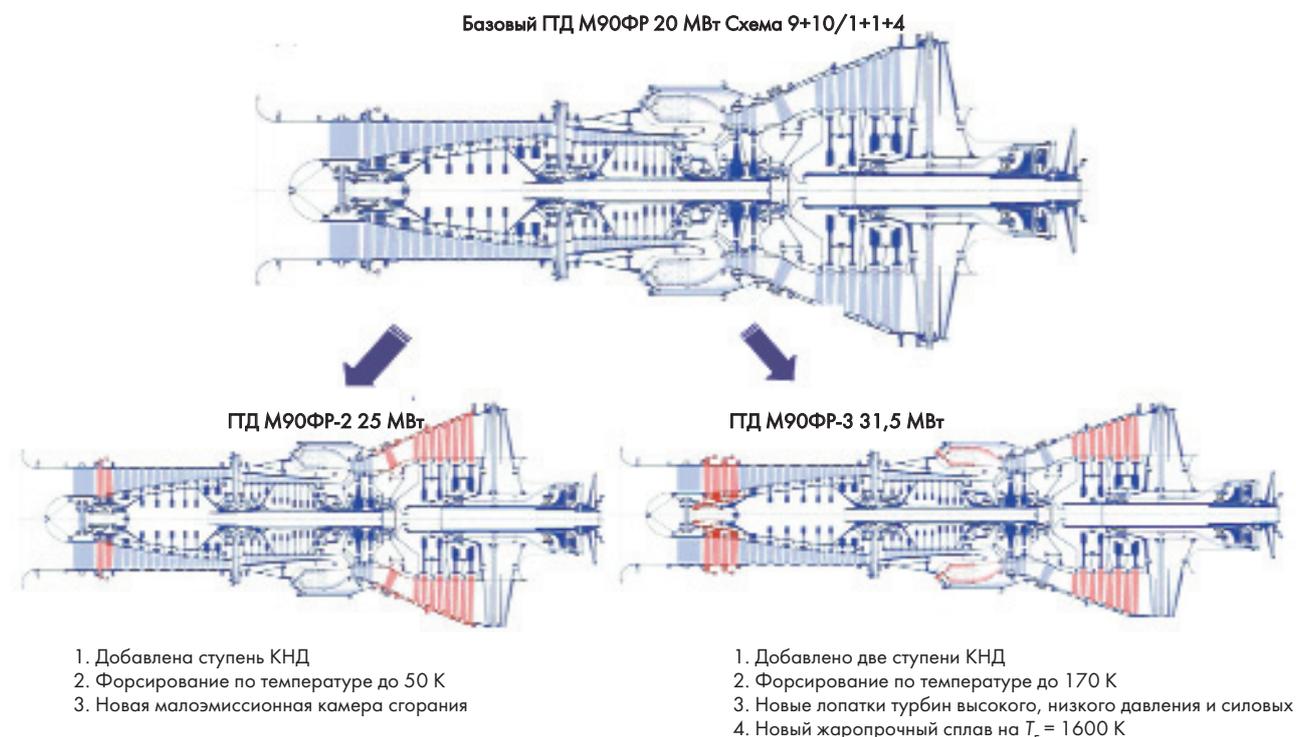


Рис. 9. Развитие семейства морских двигателей на базе ГТД М90ФР

рийности, так как на всех кораблях ВМФ РФ в настоящее время эксплуатируется не более 250 газотурбинных двигателей различных модификаций.

С учетом наметившейся тенденции внедрения на кораблях ВМС зарубежных стран ГТД 5-го поколения и отсутствия в ВМФ РФ корабельных ГТД, которые могут быть отнесены к ГТД 5-го поколения, проблема целесообразности их разработки на сегодняшний день актуальна как никогда. К такой проблеме с пониманием подходят инженеры ПАО «ОДК-Сатурн», где формируется научно-технический задел, необходимый для создания морских ГТД 5-го поколения. Совместно с отраслевыми институтами, в том числе ЦИАМ

им. П. И. Баранова и Крыловским государственным научным центром, выполнен ряд НИОКР по формированию облика морских газотурбинных двигателей 5-го поколения. По итогам этих работ выполнено предварительное проектирование в рамках НИР, разработаны техническое задание и соответствующие предложения для федеральной целевой программы [5].

На первый взгляд, с учетом сложившейся в отрасли экономической ситуации, решение проблем, связанных с разработкой и созданием ГТД 5-го поколения, может показаться неуместным или преждевременным занятием. На сегодняшний день, после завершения процесса локализации производ-

тенциал для модернизации. Одна из основных задач конструкторов заключается в уменьшении расхода топлива при одновременном увеличении коэффициента полезного действия. Для ВМФ не менее актуальны также задачи обеспечения технического обслуживания и ремонта корабельных ГТД украинского производства, установленных на надводных кораблях ВМФ. Тем не менее отсутствие сегодня стремления создавать в стране ГТД 5-го поколения может привести к техническому и технологическому отставанию в области корабельной энергетики в последующем. Информация о планах разработки ГТД 5-го поколения впервые появилась 25 апреля 2017 г.

Семейство перспективных морских ГТД на базе ГТД М90ФР

Таблица 2

| Характеристика | М90М | М90М | М90М1 | М90М2 | М90М2 |
|---|-----------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| | $N_{ном}$ | (с супер-сплавами) N_{max} | (с нулевой ступенью) $N_{ном}$ | (с двумя доп. ступенями) $N_{ном}$ | (с супер-сплавами) N_{max} |
| Мощность $N_{ер}$, МВт | 20 | 25 | 25 | 25 | 34 |
| КПД | 0,347 | 0,359 | 0,359 | 0,357 | 0,378 |
| Удельный расход топлива $b_{ер}$, кг/(кВт·ч) | 0,243 | 0,234 | 0,234 | 0,236 | 0,223 |
| Степень повышения давления π_k | 18,85 | 21,1 | 23,75 | 24,63 | 29,19 |
| Расход воздуха $G_{в}$, кг/с | 68,86 | 74,5 | 83,8 | 89,0 | 101,1 |
| Температура газа перед турбиной T_r , К | 1461 | 1561 | 1503 | 1480 | 1597 |
| Частота вращения, об/мин: | | | | | |
| СТ | 3450 | 3716 | 3716 | 3716 | 4118 |
| КНД | 7132 | 7600 | 7384 | 7211 | 7600 |
| КВД | 9019 | 9312 | 9274 | 9038 | 9398 |

Совершенно очевидно, что не следует полностью копировать зарубежный опыт разработки и создания газотурбинных двигателей нового поколения. В первую очередь необходимо провести ряд научных исследований, таких как:

- обоснование критериев, образом которым отчетственные перспективные ГТД могут быть отнесены к ГТД 5-го поколения;
- обоснование облика перспективного ГТД; имеется в виду ГТД простого открытого цикла (по аналогии с ГТД МТ-30) или ГТД слож-

ного цикла (по аналогии с ГТД WR-21);

- определение способов разработки и создания перспективного двигателя;

- разработка технологий их постройки и выбор конструкционных материалов.

С учетом зарубежного опыта эксплуатации корабельных ГТД типа WR-21 на ЭМ УРО пр. 45 «Daring», которые оказались практически не работоспособными в тропических условиях при плавании кораблей в Персидском заливе, очевидно, что

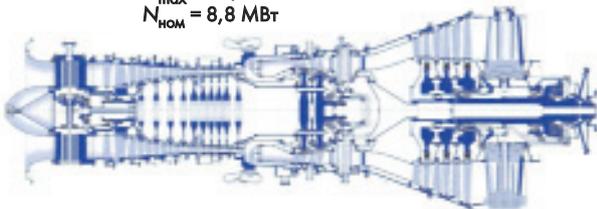
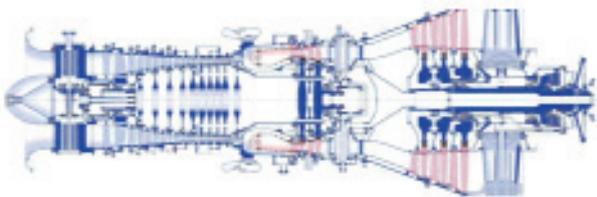
нам не следует копировать аналогичный опыт, несмотря на высокие показатели по экономичности двигателя при работе в северных широтах.

Что касается способов разработки и создания двигателя, то здесь уместно рассматривать несколько вариантов, например развитие семейства морских ГТД на базе ГТД М90ФР или М70ФРУ, по аналогии с развитием корабельного ГТД фирмы General Electric LM2500 мощностью 18,4 МВт (рис. 8). Так, добавлением ступеней компрессора низкого давления (КНД) и форсированием параметров рабочего тела было создано семейство ГТД, в частности, LM2500 4+ мощностью 29 МВт и LM2500 4+ мощностью 35,32 МВт.

По аналогии с ГТД LM2500, по данным, предоставленным ПАО «ОДК-Сатурн» [6], путем добавления одной или двух нулевых ступеней КНД базовому ГТД М90ФР и форсированием параметров рабочего тела можно создать линейку ГТД мощностью 25 и 31,5 МВт (до 34 МВт включительно) (рис. 9).

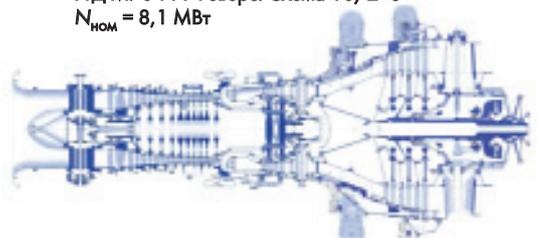
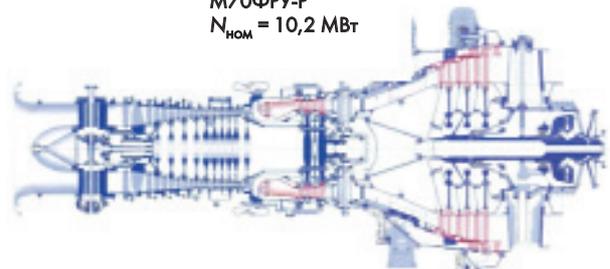
Характеристики семейства перспективных морских ГТД, которые могут быть разработаны на базе ГТД М90ФР, представлены в табл. 2 [6]. Из анализа характеристик следует, что форсированием параметров рабочего тела по температуре от 35 до 140 К (при увеличении

Базовый ГТД М70ФРУ. Схема 10/2+3

 $N_{max} = 10,3 \text{ МВт}$
 $N_{ном} = 8,8 \text{ МВт}$

 $M70ФРУ-11,5$
 $N_{max} = 11,5 \text{ МВт}$


1. Форсирование по температуре до 120 К
2. Новые лопатки турбины высокого давления и турбины винта

ГТД М70ФРУ Реверс. Схема 10/2+3

 $N_{ном} = 8,1 \text{ МВт}$

 $M70ФРУ-Р$
 $N_{ном} = 10,2 \text{ МВт}$


3. Новая малоэмиссионная камера сгорания
4. Новый жаропрочный сплав на $T_r = 1600 \text{ К}$

Рис. 10. Развитие семейства морских двигателей на базе ГТД М70ФРУ

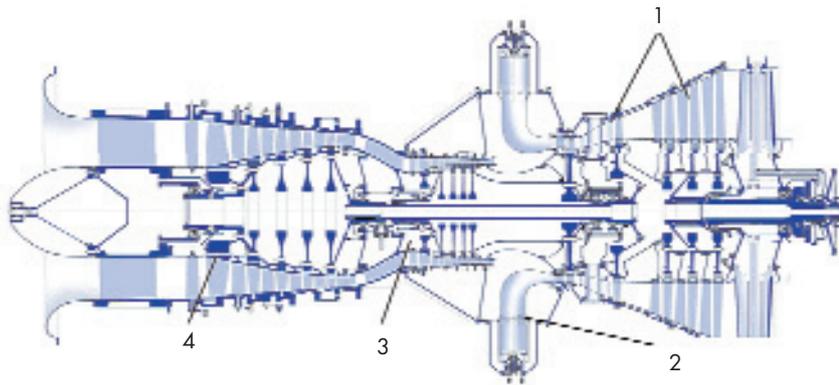


Рис. 11. Перспективный корабельный двигатель 5-го поколения ПАО «ОДК-Сатурн» (схема 5+5/1+1+3):
 1 — оригинальные турбины; 2 — жаровая труба ГТД-110М; 3 — КВД изд. 30; 4 — модель М70ФРУ

степени повышения давления в компрессоре с $\pi_k = 18,85$ до $\pi_k = 29,19$), а также совершенствованием КНД с добавлением одной или двух нулевых ступеней можно разработать линейку корабельных ГТД мощностью от 20 до 34 МВт.

Аналогично, на базе ГТД М70ФРУ ПАО «ОДК-Сатурн» с применением новых жаропрочных сплавов на $T_r = 1600$ К, позволяющих форсировать ГТД по температуре, с использованием нового конструктивного исполнения лопаток турбины высокого давления (ТВД) и турбины винта (ТВ), а также с использованием новой малоэмиссионной камеры сгорания, можно создать перспективный корабельный ГТД максимальной мощностью 11,5 МВт в нереверсивном исполнении или 10,2 МВт в реверсивном исполнении (рис. 10). Кроме отмеченных выше конструктивных решений, на практике, возможно, потребуются замена конструкционных материалов и других узлов и деталей.

Из анализа характеристик двигателей, представленных в табл. 2 и на рис. 9 и 10, следует, что предла-

гаемая ПАО «ОДК-Сатурн» концепция создания перспективных двигателей носит эволюционный характер, так как не наблюдается роста основных значимых параметров на 30—40% по аналогии с авиационными двигателями. В частности, максимальное снижение удельного расхода топлива по сравнению с базовыми двигателями ожидается на 4—8% вместо 15—20%, что характерно для двигателей 5-го поколения. В связи с этим реализация предлагаемых выше вариантов развития корабельных ГТД приведет к созданию, в лучшем случае, перспективного двигателя поколения 4+.

Существует также еще одна принципиально новая концепция создания перспективного двигателя, представленная ПАО «ОДК-Сатурн» [6], предлагаемая как разработка перспективного корабельного ГТД 5-го поколения. При ее реализации используются отдельные отработанные технологии по двигателям М70ФРУ, изделию 30 (авиационный двигатель для самолета 5-го поколения СУ-57) и ГТД-110М (рис. 11, табл. 3) [6].

Из анализа теплофизических характеристик двигателя следует, что они отличаются в лучшую сторону от двигателей, которые могут быть разработаны на основе базовых ГТД М70ФРУ или М90ФР, лишь незначительно. Так, удельный расход топлива по сравнению с базовым двигателем снижается только на 9,1%. Однако масса такого двигателя без рамы и газоотвода составляет 6,4 т, что существенно меньше массы ГТД М90М2, равной 11,6 т, что удовлетворяет критериям, предъявляемым к двигателям 5-го поколения по массе. Поэтому предлагаемый ПАО «ОДК-Сатурн» вариант перспективного корабельного ГТД следует скорее всего отнести к двигателю поколения 4++.

Существенное снижение массы и соответственно габаритов ГТД происходит за счет снижения числа ступеней КНД и КВД практически в два раза по сравнению с базовым двигателем, а также снижения числа ступеней силовой турбины (схема двигателя 5+5/1+1+3) при улучшении его теплофизических характеристик. Габариты двигателя, в особенности осевые, также снижены ($L = 4040$ мм, $D_{bx} = 1054$ мм, $D_{кс} = 1947$ мм, $D_{ст} = 1676$ мм).

Однако поскольку такой двигатель разрабатывается как принципиально новый, не на основе базового, то затраты на его разработку будут в разы превышать затраты на разработку ГТД на основе базовых моделей, несмотря на использование отдельных уже отработанных технологий. Поэтому целесообразность создания такого двигателя для ВМФ может быть обоснована необходимостью существенного снижения габаритов и массы двигателя по сравнению с базовым ГТД М90ФР. Необходимость в нем может появиться при проектировании перспективных кораблей малого водоизмещения и кораблей с динамическими принципами поддержания, где габариты и масса главных двигателей имеют существенное значение. Для кораблей среднего и большого водоизмещения габариты и масса ГТД при их использовании в качестве главных двигателей не являются критическими, так как более существенное значение на массу ЭУ таких кораблей оказывают массы редукторов и валопроводов.

Таблица 3

| Перспективный ГТД 5-го поколения | | | | |
|---|----------------|-----------|-----------|--------------------------------|
| Характеристика | 0,35 $N_{ном}$ | $N_{ном}$ | N_{max} | N_{max} (с суперсплавами) |
| Мощность, МВт | 8,7 | 24,7 | 29 | 34 |
| КПД | 0,267 | 0,358 | 0,370 | 0,381 |
| Удельный расход топлива b_{gr} , кг/(кВт·ч) | 0,317 | 0,236 | 0,228 | 0,221 |
| Степень повышения давления π_k | 16,4 | 27,3 | 29,6 | 32,2 |
| Расход воздуха G_v , кг/с | 65,9 | 97,5 | 103,6 | 110,1 |
| Температура газа перед турбиной T_r , К | 1196 | 1470 | 1527 | 1591 |
| Частота вращения силовой турбины, об/мин | 2775 | 3930 | 4146 | 4372 |



Рис. 12. Авиационный двигатель ПД-14 ПАО «Авиадвигатель»

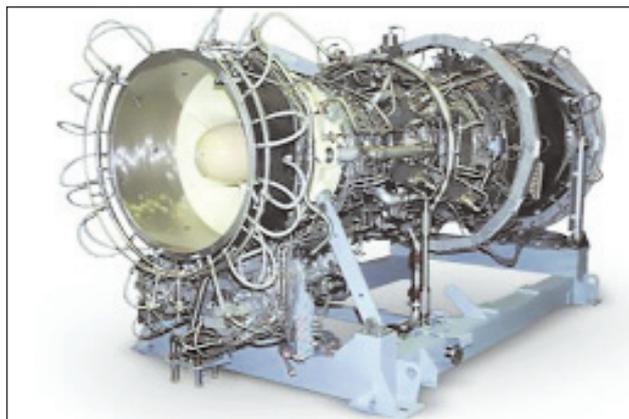


Рис. 13. Газогенератор двигателя ПД-14

Еще одним из потенциально возможных способов создания перспективного корабельного ГТД 5-го поколения может быть его конвертация из авиационного двигателя, например двигателя 5-го поколения типа ПД-14 (рис. 12) и (или) из разрабатываемого двигателя типа ПД-35, по аналогии с зарубежным ГТД МТ-30 компании Rolls-Rouze.

Данный способ нельзя не учитывать, во-первых, потому, что такой положительный опыт за рубежом уже существует, а во-вторых, при его реализации будут улучшены основные технико-экономические характеристики корабельного двигателя по сравнению с характеристиками перспективных вариантов ГТД, предлагаемых ПАО «ОДК-Сатурн» и рассмотренных выше. Можно предположить, что такой двигатель не будет уступать по характеристикам зарубежному ГТД МТ-30 (см. табл. 1). Подобный оптимистический прогноз следует из того, что при разработке авиационного двигателя ПД-14 были достигнуты высокие параметры рабочего тела: температура газа перед турбиной $T_r = 1700^\circ\text{C}$ (1973 К) и степень сжатия воздуха в компрессоре $\pi_k = 41$.

На основе двигателя ПД-14 ПАО «Авиадвигатель» разрабатывает перспективный двигатель большой мощности ПД-35, который планируется освоить в производстве к 2025 г.

При разработке двигателя ПД-14 по сравнению с современными серийными авиационными двигателями был сделан качественный рывок в основных параметрах, в том числе: по степени двухконтурности (в 2 раза), температуре газа перед турби-

ной (на 100 К), суммарной степени сжатия в компрессоре (на 20–50%). Все это обеспечивает снижение удельного расхода топлива на 12–16% и соответствие перспективным экологическим требованиям по шуму и эмиссии вредных веществ. Указанный рывок обеспечен применением передовых технологий проектирования, освоением новых уникальных технологий изготовления деталей и узлов нового двигателя [7]. В частности, внедрением на Пермском моторном заводе технологии изготовления монокристаллических рабочих лопаток турбины из сплавов нового поколения с защитным керамическим покрытием второго поколения, что позволило поднять температуру газа перед турбиной до 2000 К.

ПД-14 конкурирует с перспективными продуктами аналогичного назначения лидеров мирового авиадвигателестроения: двигателями PW1400G (самолет МС-21) и PW1100G (самолет А320NEO) компании Pratt & Whitney, а также двигателями Leap-1A (самолет А320NEO) и Leap-1B (самолет В737 MAX) консорциума CFMI (компании General Electric и Snecma).

По заключению ГНЦ РФ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», двигатель ПД-14 не уступает конкурентам по сумме технико-экономических параметров. Комплексная оценка экономической эффективности двигателя ПД-14 в составе самолета МС-21, выполненная ОАО «НПК «Иркут», показала, что двигатель ПД-14 конкурентоспособен в сравнении с двигателем PW1400G.

Создание такого двигателя означает, что государство успешно решило следующие проблемы:

— создание шестикоординатных прецизионных станков (проблема, которая была абсолютной для СССР);

— перенос монокристаллической технологии в масштабы крупносерийного гражданского производства;

— создание целого семейства новейших авиационных двигателей и промышленных газотурбинных установок.

Использование унифицированного газогенератора авиационного двигателя ПД-14 (рис. 13) и (или) ПД-35 позволяет, не прибегая к дорогостоящим и длительным по времени опытно-конструкторским разработкам, решить проблему создания перспективного ГТД 5-го поколения для кораблей ВМФ. Существенной доработкой здесь может быть разработка материалов основных деталей компрессоров и турбин для обеспечения их работоспособности при наличии в рабочем теле (воздухе) аэрозоль морской воды. Кроме того, разработкой с «чистого листа» для такого двигателя является создание свободной силовой турбины (СТ).

При создании корабельного ГТД путем конвертации его из авиационного двигателя параметры рабочего тела придется понизить для обеспечения требуемых показателей долговечности. В частности, ресурс до капитального ремонта корабельных ГТД должен составлять не менее 20 000 ч, а ресурс до списания — не менее 40 000 ч. У авиационных двигателей эти показатели ниже. Тем не менее даже при снижении температуры газа перед турбиной до значения $T_r = 1350^\circ\text{C}$ (1623 К) предполагаемый КПД ко-

Таблица 4

Варианты разработки перспективного корабельного ГТД и ожидаемые результаты

| Характеристика | Вариант 1 (поколение 4+) | Вариант 2 (поколение 4+) | Вариант 3 (поколение 4+) | Вариант 4 (поколение 4++) | Вариант 5 (поколение 4++) | Вариант 6 (поколение 5) |
|---|--|--|--|---|--|--|
| | Развитие семейства морских ГТД на базе ГТД М90ФР | | | | Разработка принципиально нового двигателя, схема 5+5/1+1+3 | Конвертация ГТД из авиационного двигателя типа ПД-14 (ПД-35) |
| | М90М (с суперсплавами) N_{max} | М90М1 (с нулевой ступенью) $N_{ном}$ | М90М2 (с двумя доп. ступенями) $N_{ном}$ | М90М2 (с двумя доп. ступенями, с суперсплавами) N_{max} | | |
| Мощность, МВт | 25 | 25 | 25 | 34 | 34 | 15 (35)* |
| КПД | 0,359 | 0,359 | 0,357 | 0,378 | 0,381 | 0,40–0,41* |
| Удельный расход топлива $b_{гр}$, кг/(кВт·ч) | 0,234 | 0,234 | 0,236 | 0,223 | 0,221 | ~0,205* |
| Степень повышения давления π_k | 21,1 | 23,75 | 24,63 | 29,19 | 32,2 | ~35* |
| Расход воздуха G_v , кг/с | 74,5 | 83,8 | 89,0 | 101,1 | 110,1 | — |
| Температура газа перед турбиной $T_{гт}$, К | 1561 | 1503 | 1480 | 1597 | 1591 | ~1650* |
| Предполагаемые затраты на ОКР, млрд руб. | Не менее 3 | Не менее 1,5 | Не менее 2 | Не менее 5 | ~ 40–60 | ~ 20 |

*Предполагаемая информация (на основе зарубежного опыта создания ГТД МТ-30).

рабельного двигателя должен составить не менее 40–41%, а удельный расход топлива — не более 0,205 кг/(кВт·ч), что на 16% меньше по сравнению с удельным расходом базового ГТД М90ФР. Такой двигатель будет удовлетворять всем критериям, предъявляемым к двигателям 5-го поколения.

Таким образом, можно утверждать, что на современном этапе следует рассматривать несколько потенциальных вариантов разработки и создания перспективных корабельных ГТД нового поколения, и только один из них, на основе конвертации корабельного ГТД из авиационного, может привести к созданию двигателя 5-го поколения (табл. 4).

Каждый из рассматриваемых вариантов отличается своими особенностями, достоинствами и недостатками. Одна из важнейших характеристик, определяющих целесообразность либо нецелесообразность разработки двигателя, — это стоимость опытно-конструкторских работ, предварительная оценка которой представляет наибольшую трудность для исследователя.

Нормативно-правовой базой по ценообразованию установлено, что цена опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ в сфере оборонного заказа может быть определена несколькими способами: методом калькулирования, ме-

тодом индексации статей затрат, аналоговым методом, методом экспертных оценок, а также комбинацией перечисленных методов.

Калькулирование — основной метод расчета цен на НИР и ОКР. Аналоговый метод используется для определения цен НИР и ОКР по аналогичным ранее выполненным работам, а также для модернизируемых образцов серийных изделий. Аналоговый метод ценообразования применяется в комбинации с методами калькулирования и индексирования.

Метод экспертных оценок применяется для определения цены выполненных работ при отсутствии возможности ее установления методами калькуляции, индексирования, аналоговым методом или их комбинацией.

Расчет цены опытно-конструкторских, научно-исследовательских и технологических работ аналоговым методом осуществляется исходя из состава и величины фактических затрат ранее выполненных аналогичных работ с использованием соответствующих «коэффициентов новизны».

Для применения аналогового метода при оценке предполагаемых затрат на НИР и ОКР при разработке и создании перспективного корабельного ГТД можно использовать информацию о ценах на ОКР при разработке авиационного двигателя

ПД-35 ПАО «Авиадвигатель», представленную в [3]. В годовом отчете ПАО «ОДК-Сатурн» также содержится информация о стоимости различных ОКР, выполняемых в интересах ВМФ, в частности [8]:

— ОКР «Разработка технологии создания морского унифицированного энерго модуля на базе ранее созданного российского морского ГТД 4-го поколения мощностью 10 МВт для перспективных скоростных судов» (шифр «Модуль ГТД») — стоимость 120,523 млн руб.;

— ОКР (шифр «М90ФР») по освоению в производстве газотурбинного двигателя М90ФР для комплектации дизель-газотурбинного агрегата М55Р — главной энергетической установки фрегата пр. 22350 — стоимость 1712 млн руб.;

— ОКР (шифр «Агрегат ДКВП») по созданию на базе российского морского ГТД М70ФРУ и российских комплектующих газотурбинных агрегатов для десантных кораблей на воздушной подушке пр. 12322 «Зубр» и пр. 12061 «Мурена» — стоимость 6790 млн руб.;

— ОКР (шифр «М70ФРУ реверс») по созданию на базе российского морского ГТД М70ФРУ реверсивного газотурбинного двигателя для замены двигателей украинского производства с истекшими сроками службы на эксплуатирующихся кораблях ВМФ РФ — стоимость 700 млн руб.

С использованием аналогового метода, ориентируясь на ценовой диапазон НИР и ОКР, выполняемых ПАО «ОДК-Сатурн» и ПАО «Авиадвигатель», можно предположить, что предстоящие затраты на ОКР при различных способах разработки и создания перспективного корабельного ГТД могут составить значения, представленные в табл. 4.

При прогнозировании исходили из того, что наиболее затратными будут работы, выполняемые не на основе базовых корабельных или даже авиационных двигателей, а работы, выполняемые с «нуля», что характерно для варианта 5 (см. табл. 4), предлагаемого ПАО «ОДК-Сатурн». Если исходить из аналогии разрабатываемого перспективного авиационного ГТД ПД-35, стоимость работ по созданию которого определена в 64,3 млрд руб. [3], то можно утверждать, что затраты на создание принципиально нового корабельного двигателя 5-го поколения в ПАО «ОДК-Сатурн» (вариант 5) составят примерно такую же величину.

Затраты на создание остальных рассматриваемых вариантов перспективных корабельных ГТД будут существенно меньше.

Для оценки целесообразности или нецелесообразности разработки перспективного корабельного двигателя конкретными способами (см. табл. 4), а также для определения наиболее предпочтительного из них требуется проведение технико-экономического анализа использования двигателей в составе главной энергетической установки перспективных или существующих кораблей.

В процессе анализа необходимо установить, во-первых, какие преимущества получат корабли ВМФ от применения перспективных ГТД. Возможно, в разработке таких двигателей и вовсе нет необходимости, так как все задачи корабли могут решать с высокой степенью эффективности при использовании уже разработанных базовых двигателей.

Во-вторых, если потребность в перспективных двигателях установлена, то, с учетом значительных затрат на их разработку и создание, следует оценить экономический эффект от их применения в плане сокращения эксплуатационных затрат кораблей (прежде всего имеются в виду затраты на топливо).

Для решения перечисленных вопросов изначально необходимо определить валовые мощности (буксировочные кривые) для обеспечения скорости полного хода перспективных кораблей, например с использованием метода адмиралтейских коэффициентов или на основе существующих кораблей-прототипов с известными буксировочными кривыми:

$$WPS = \frac{D^{2/3} v^3}{C}, \quad (1)$$

где WPS — валовая мощность, или мощность, подводимая к гребному винту, л. с.; D — водоизмещение перспективного корабля, т; v — скорость хода корабля, уз; C — адмиралтейский коэффициент, определяемый по диаграмме Пампеля.

На ранних стадиях проектирования кораблей, когда еще не известны точные значения водоизмещения корабля и характеристики обводов корпуса, для расчетов могут использоваться данные кораблей-прототипов. В этом случае значения адмиралтейских коэффициентов вычисляются на основе известных буксировочных кривых кораблей-прототипов, близких по водоизмещению к проектируемым кораблям, с использованием зависимости

$$C = \frac{(D)^{2/3} (v_{пх}^0)^3}{WPS_{пх}^0}. \quad (2)$$

Значения адмиралтейского коэффициента колеблются в достаточно широких пределах в зависимости от скорости хода, а также от класса и типа корабля:

для полного хода авианесущих кораблей и тяжелых крейсеров — 180...220, легких крейсеров и эсминцев — 160...190, сторожевых кораблей (фрегатов) — 140...160;

для экономического хода указанные значения находятся в пределах 240...280.

На основе известных характеристик валовой мощности рассчитывается суммарная мощность главных двигателей ΣN_e , т. е. мощность на фланцах двигателей, с использованием зависимости

$$\Sigma N_e = \frac{WPS}{\eta_b \eta_p}, \quad (3)$$

где $\eta_b \approx 0,98$ — КПД валопровода; $\eta_p \approx 0,96...0,98$ — КПД редукторной передачи.

На рис. 14, 15 представлены буксировочные кривые перспективных кораблей основных классов, полученные расчетными способами с использованием метода адмиралтейских коэффициентов и данных кораблей-прототипов.

При расчетах исходили из тех соображений, что перспективные корабли не должны уступать зарубежным аналогам по ходкости и маневренности, поэтому имеют скорости полного хода не менее 32 уз для кораблей классов корвет, фрегат и эскадренный миноносец и не менее 29...30 уз для авианесущих кораблей.

Исходя из значения валовой мощности полного хода конкретного корабля, можно рассчитать суммарную мощность на фланцах главных двигателей ΣN_e , необходимую для обеспечения скорости полного хода [см. зависимость (3)], на основании которой составляется предполагаемое схемное исполнение турбозубчатого агрегата или нескольких агрегатов. Схемное исполнение агрегата формируется из состава типомощностного ряда уже разработанных (базовых) двигателей и редукторов или из перспективных двигателей и редукторов, предполагаемых к разработке (см. табл. 4).

На данном этапе при формировании схемы агрегатов уже отчасти можно убедиться в целесообразности разработки перспективных двигателей для использования в составе корабельных агрегатов.

Рассмотрим основные варианты схемных решений главных энергетических установок (ГЭУ), обеспечивающих ходкость и маневренность, т. е. скорости полного хода существующих и перспективных кораблей основных классов, буксировочные кривые которых представлены на рис. 14, 15.

Так, например, для перспективного корвета пр. 20386 водоизмещением 3400 т суммарная мощность главных двигателей для получения скорости полного хода корабля в 32 уз должна составлять около 40 000 кВт и может быть обеспечена двумя базовыми газотурбинными двигателями М90ФР 2 x 20 000 кВт в составе устанавливаемого на корабле агрегата МА3 (рис. 16).

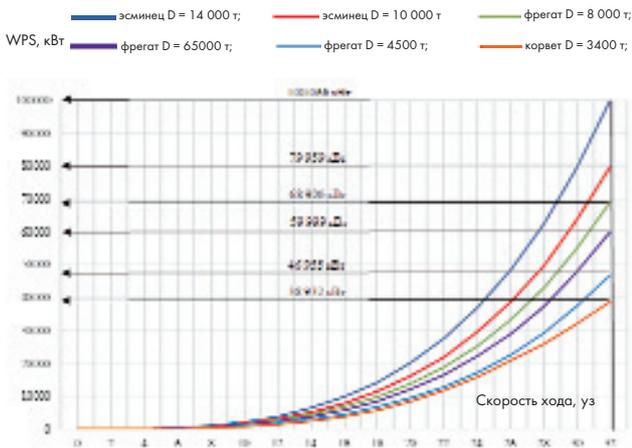


Рис. 14. Приблизительный вид буксировочных кривых перспективных кораблей классов корвет, фрегат и эскадренный миноносец

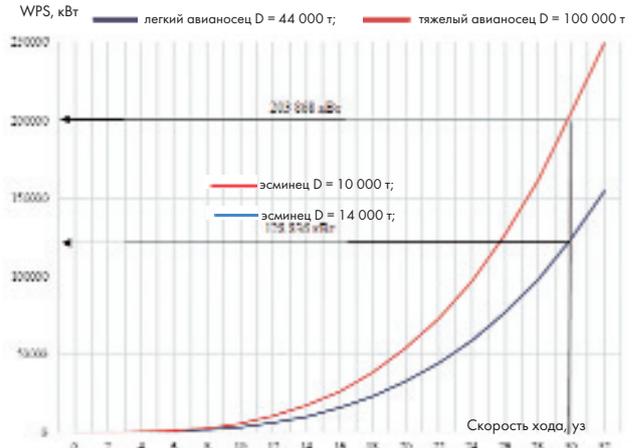


Рис. 15. Приблизительный вид буксировочных кривых перспективных авианосцев

Как альтернативный вариант, на корабле могут использоваться два агрегата M55P (рис. 17), устанавливаемые на фрегатах пр. 22350. В обоих случаях требуемая скорость полного хода корабля может быть достигнута при одновременной работе двух базовых ГТД М90ФР. Другими словами, для кораблей данного класса нет необходимости в разработке и создании перспективных корабельных ГТД для обеспечения их ходкости и маневренности.

Для фрегата пр. 22350 водоизмещением около 4500 т скорость полного хода 32 уз не может быть достигнута используемой на корабле ГЭУ в составе двух агрегатов M55P (см. рис. 17), так как суммарная мощность двигателей полного хода должна составлять не менее 49 000 кВт. Входящие в состав агрегатов базовые форсажные ГТД М90ФР мощностью 20 000 кВт и маршевые дизели 10Д49 мощностью

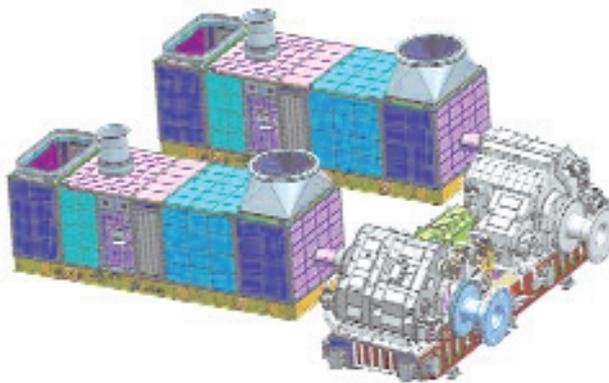


Рис. 16. Внешний вид агрегата МА3 (ГТД М90ФР в капоте)

3820 кВт (схемное исполнение CODOG) могут работать только раздельно, поэтому за счет работы форсажных ГТД может быть обеспечена скорость полного хода не более 30 уз. При разработке перспективного ГТД мощностью 25 МВт любым из приведенных в табл. 4 способов для использования в составе агрегата M55P или ему подобных указанный недостаток может быть устранен. Данное обстоятельство свиде-

тельствует о целесообразности разработки перспективного ГТД мощностью 25 МВт для агрегата M55P кораблей класса фрегат пр. 22350. В случае, если форсажный редуктор агрегата способен выдерживать крутящие моменты, соответствующие нагрузке двигателя большей мощности, такое техническое решение может быть обоснованным для последующих кораблей данной серии.

Существует также альтернативный способ достижения скорости полного хода не менее 32 уз для фрегата такого водоизмещения, при реализации которого не потребуется разработка и создание перспективных ГТД. В этом случае может быть использован газо-газотурбинный агрегат наподобие агрегатов М7Н или М9, используемых на кораблях пр. 11356 и пр. 1155 (схемное исполнение COGAG) проработки ПАО «ОДК-Сатурн» для модернизированного фрегата пр. 22350М (рис. 18). В состав агрегата должны войти два маршевых реверсивных ГТД М70ФРУ-Р мощностью 2 x 8,1 МВт и два форсажных ГТД М90ФР мощностью 2 x 20 МВт, суммарная мощность ЭУ переднего хода при совместной работе маршевых и форсажных двигателей составит 56,2 МВт.

Следует отметить, что, несмотря на наличие газотурбинных двигателей для такого агрегата, сам агрегат (имеются в виду редукторы и межредукторная передача) еще не разработан, и к его разработке по-

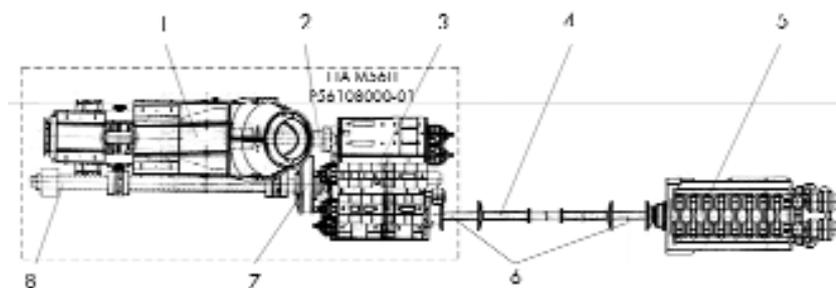


Рис. 17. Дизель-газотурбинный агрегат M55P:

- 1 — двигатель DA91/11 на раме с газоотводом с кожухами; 2 — рессора;
- 3 — редуктор; 4 — трансмиссия; 5 — дизель 10Д49; 6 — муфта с переходником;
- 7 — звукоизолирующая муфта; 8 — вал гребного винта

ка не приступали. Кроме того, надо исходить из понимания того, что такие проектные изменения для серийно строящихся кораблей должны быть как-то обоснованы. Наиболее вероятным способом обеспечения скорости полного хода корабля в 32 уз в данном случае может быть установка форсажных двигателей большей мощности.

Модернизированный фрегат пр. 22350М, анонсированный в декабре 2014 г. главнокомандующим ВМФ адмиралом В. В. Чирковым, будет иметь водоизмещение в диапазоне 6500—8000 т. Однако пока выполнена только его предварительная проработка ФГУП Крыловский ГНЦ и АО «Северное ПКБ». Ниже рассмотрим варианты схемных решений главных энергетических установок для обеспечения скорости полного хода кораблей водоизмещением 6500 и 8000 т.

Для развития скорости полного хода 32 уз фрегатом водоизмещением 6500 т суммарная мощность главных двигателей, с учетом потерь в редукторах и валопроводах, должна составлять порядка 63 МВт (см. рис. 14). Газо-газотурбинный агрегат проработки ПАО «ОДК-Сатурн» (см. рис. 18), суммарная мощность базовых маршевых и форсажных двигателей которого составляет 56,2 МВт, в состоянии обеспечить кораблю скорость полного хода не более 31 уз.

При разработке перспективного ГТД мощностью 25 МВт для использования его в качестве форсажных двигателей данного агрегата суммарная мощность двигателей составит 66,2 МВт, что позволит обеспечить заданную скорость полного хода корабля в 32 уз.

Альтернативным вариантом обеспечения скорости полного хода данного корабля может быть разработка перспективного ГТД агрегатной мощностью 34 МВт любым из указанных в табл. 4 способов. Использование таких двигателей в составе агрегатов М55Р (см. рис. 17) или им подобных (схема CODOG) позволит обеспечить кораб-

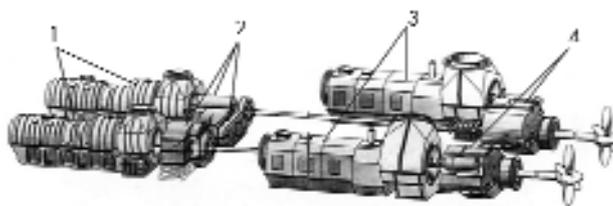


Рис. 18. Газо-газотурбинный агрегат проработки ПАО «ОДК-Сатурн» (М7Н или М9):

1 — маршевые ГТД М70ФУ-Р; 2 — маршевые редукторы с МРП; 3 — форсажные ГТД М90ФР; 4 — форсажные редукторы

лю скорость полного хода 32,5 уз. В качестве маршевых двигателей такого агрегата могут использоваться дизели типа 16Д49 либо перспективные дизели типа Д500К производства ОАО «Коломенский завод».

Наиболее простой вариант обеспечения скорости полного хода корабля — использование газо-газотурбинного агрегата в виде «спарки» двух базовых ГТД М90ФР на одном суммирующем реверс-редукторе (рис. 19). Подобный вариант агрегата МА4 в виде спарки двух базовых ГТД М70ФРУ прорабатывался ПАО «ОДК-Сатурн» для кораблей пр. 11356, не достроенных на судостроительном заводе «Янтарь» из-за отказа поставлять двигатели Украиной. При использовании спарки базовых ГТД М90ФР суммарная мощность двух агрегатов составит 80 МВт, что позволит кораблю развивать скорость хода до 34 уз.

Для реализации указанного технического решения разработки перспективных двигателей не потребуется, достаточно использования уже созданных базовых двигателей М90ФР, потребуется лишь разработка и создание реверс-редукторов.

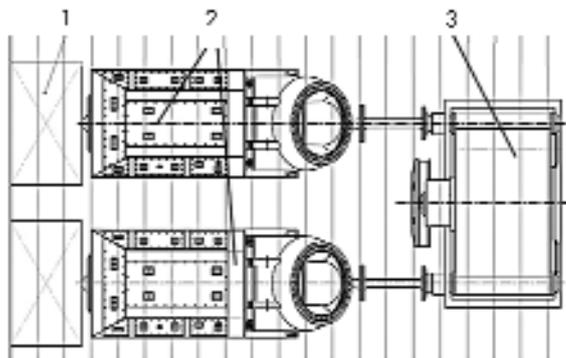


Рис. 19. «Спарка» двух всережимных ГТД на одном реверс-редукторе (вид сверху):

1 — шахта приема воздуха; 2 — ГТД М90ФР; 3 — суммирующий реверс-редуктор

Для обеспечения скорости полного хода 32 уз фрегата водоизмещением 8000 т суммарная мощность главных двигателей, с учетом потерь в редукторах и на линиях гребных валов, должна составлять не менее 70 000 кВт (см. рис. 14). Это означает, что использование агрегата схемного исполнения COGAG (см. рис. 18) в составе базовых двигателей М90ФР и М70ФРУ-Р обеспечит кораблю скорость полного хода не более 30 уз, что явно недостаточно. Указанное обстоятельство предопределяет необходимость разработки перспективного двигателя большей мощности, причем для представленного на рис. 17 газо-газотурбинного агрегата могут быть реализованы два варианта.

Первый вариант предусматривает разработку перспективного форсажного ГТД мощностью 25 МВт на основе базовой модели ГТД М90ФР одним из указанных в табл. 4 способов, а также разработку перспективного маршевого ГТД мощностью 10,2 МВт на основе базового ГТД М70ФРУ-Р (см. рис. 10). Тогда суммарная мощность маршевых и форсажных ГТД при их совместной работе составит 70,4 МВт, что позволит обеспечить кораблю требуемую скорость полного хода.

Второй вариант предусматривает разработку форсажного двигателя мощностью 34 МВт (варианты 4 и 5 табл. 4) или 35 МВт (вариант 6 табл. 4) для использования в составе форсажных двигателей агрегата типа М7Н (М9), представленного на рис. 18. В этом случае в качестве маршевых двигателей достаточно использование базовых ГТД М70ФРУ-Р, тогда суммарная мощность маршевых и форсажных двигателей при их совместной работе составит 84,2 МВт. Это существенно больше, нежели требуется для обеспечения скорости полного хода. Корабль, оснащенный такими двигателями, сможет развивать скорость хода до 33 уз.

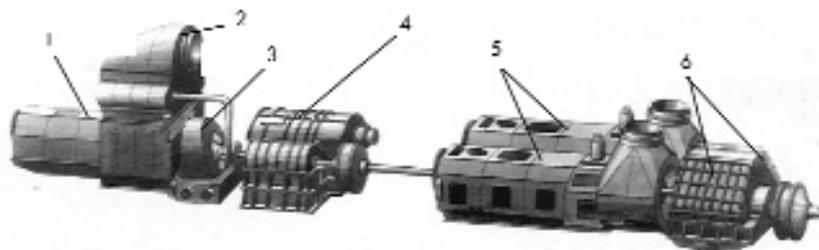


Рис. 20. Газо-газотурбинный агрегат М-21:

1 — маршевый ГТД; 2 — ТУК; 3 — паровая турбина; 4 — маршевый редуктор;
5 — форсажные ГТД; 6 — форсажные редукторы

При наличии ГТД мощностью 34—35 МВт более целесообразным следует считать их использование в качестве форсажных двигателей в составе агрегата М55Р или ему подобного, представленного на рис. 17. В этом случае суммарная мощность двигателей полного хода составит около 70 МВт, что наиболее полно удовлетворяет требованиям по обеспечению скорости полного хода. В качестве маршевых двигателей в этом случае могут использоваться дизели типа 16Д49 либо перспективные дизели типа Д500К производства ОАО «Коломенский завод».

Еще одним способом обеспечения скорости полного хода корабля может быть использование газогазотурбинного агрегата в виде «спарки» двух базовых ГТД М90ФР на одном суммирующем реверс-редукторе (см. рис. 19). При использовании двух таких агрегатов суммарная мощность двигателей составит 80 МВт, что позволит кораблю развивать скорость хода до 33 уз.

Перспективный эскадренный миноносец пр. 23560 (шифр «Лидер») по разным источникам будет иметь водоизмещение в диапазоне 10 000—14 000 т. Меньшему водоизмещению будет соответствовать вариант корабля с газотурбинной установкой, а большему — с атомной энергетической установкой. Тем не менее, учитывая направленность данной статьи, несмотря на стремление конструкторов оснастить корабль атомной установкой, попытаемся проанализировать использование в составе ГЭУ газотурбинных двигателей для двух значений водоизмещения корабля, указанных выше.

В частности, для эскадренного миноносца водоизмещением 10 000 т для обеспечения скорости полного хода 32 уз суммарная мощ-

ность главных двигателей, с учетом потерь в редукторах и валопроводах, должна составлять около 85 000 кВт (см. рис. 14).

Наиболее простым способом обеспечения данной скорости было бы использование газогазотурбинного агрегата в виде спарки двух базовых ГТД М90ФР на одном суммирующем реверс-редукторе наподобие агрегата МА4 проработки ПАО «ОДК-Сатурн» (см. рис. 19). В этом случае суммарная мощность двигателей при использовании двух таких агрегатов составила бы 80 МВт, что позволило бы кораблю достигать скорости хода, близкой к 32 уз, а именно около 31,5 уз.

При разработке перспективных ГТД мощностью 25 МВт любым из указанных в табл. 4 способов и при их использовании в составе спарки суммарная мощность двигателей составит 100 МВт, что с избытком удовлетворяет требованиям по скорости полного хода корабля, которая в данном случае возрастает до 33 уз.

Альтернативным способом обеспечения скорости полного хода корабля является использование двух газогазотурбинных агрегатов наподобие агрегата М-21 ракетного крейсера пр. 1164 (рис. 20). В составе такого агрегата предполагается использование двух базовых маршевых ГТД типа М70ФРУ-Р и четырех форсажных базовых ГТД М90ФР (схема СОGAG). Суммарная мощность двигателей составит 96,2 МВт, что существенно превышает значение, требуемое для обеспечения скорости хода 32 уз. Корабль, оснащенный такими агрегатами, сможет развивать скорость полного хода до 33 уз. Для реализации указанного способа не требуется разработки и создания перспективных

ГТД, но необходима разработка редукторов агрегата типа М21.

Для эскадренного миноносца водоизмещением 14 000 т для обеспечения скорости полного хода 32 уз суммарная мощность главных двигателей, с учетом потерь в редукторах и валопроводах, должна составлять около 106 МВт (см. рис. 14). Использование двух агрегатов наподобие М-21 (см. рис. 20) в составе двух базовых маршевых ГТД типа М70ФРУ-Р и четырех форсажных базовых ГТД М90ФР (схема СОGAG) суммарной мощностью 96,2 МВт позволит обеспечить кораблю скорость хода, близкую к 32 уз (порядка 31 уз). С одной стороны, целесообразность разработки перспективных двигателей для увеличения скорости полного хода корабля на 1 уз выглядит маловероятной. Но при разработке перспективных ГТД мощностью 25 МВт любым из указанных в табл. 4 способов и их использовании в качестве форсажных двигателей такого агрегата суммарная мощность ГЭУ составит 116,2 МВт, что с избытком удовлетворяет требованиям по скорости полного хода корабля, которая незначительно превысит 32 уз.

Более простым способом обеспечения скорости полного хода корабля было бы использование спарки двух перспективных ГТД мощностью по 25 МВт, разработанных на основе базовых М90ФР любым из указанных в табл. 4 способов на одном суммирующем реверс-редукторе (см. рис. 19). В этом случае суммарная мощность двигателей при использовании двух таких агрегатов составит 100 МВт, что обеспечит кораблю скорость хода около 31,5 уз.

Для перспективного легкого авианосца водоизмещением 44 000 т для достижения скорости полного хода 30 уз суммарная мощность главных двигателей, с учетом потерь в редукторах и валопроводах, должна составлять около 137 МВт (см. рис. 15).

Наиболее предпочтительным вариантом ГЭУ такого корабля была бы двухвальная установка, состоящая из двух агрегатов в виде спарки (см. рис. 19) двух перспективных ГТД мощностью по 34—35 МВт, разработанных любым из способов, указанных в табл. 4. Такое решение по схемному исполнению агрегатов

подтверждает целесообразность разработки перспективных ГТД большой мощности, а также разработки суммирующих реверс-редукторов для обеспечения совместной работы двух двигателей в составе агрегата.

Как альтернативный вариант, не требующий разработки и создания перспективных ГТД, может быть рекомендовано использование базовых двигателей в составе двух агрегатов типа М-21 (см. рис. 20) с маршевыми ГТД типа М70ФРУ-Р и форсажными ГТД типа М90ФР (в двухвальном исполнении ГЭУ). Однако такое техническое решение позволит обеспечить кораблю скорость полного хода не более 27,5 уз.

При использовании в составе агрегата типа М-21 (см. рис. 20) перспективных маршевых ГТД, разработанных на основе базовых двигателей М70ФРУ-Р мощностью 10,2 МВт, и перспективных форсажных ГТД, разработанных на основе базовых двигателей типа М90ФР мощностью 25 МВт можно нарастить суммарную мощность двигателей для двухвальной установки корабля до 120,4 МВт. Указанное техническое решение позволит обеспечить скорость полного хода корабля до 29 уз.

Для перспективного тяжелого авианосца водоизмещением 100 000 т обеспечение скорости полного хода 30 уз потребует нарастить суммарную мощность главных двигателей, с учетом потерь в редукторах и валопроводах, до 216 МВт (см. рис. 15). Для четырехвальной главной энергетической установки корабля эту задачу можно решить несколькими способами.

При использовании базовых ГТД типа М70ФРУ-Р и М90ФР и установки четырех агрегатов типа М-21 (см. рис. 20) суммарная мощность двигателей для обеспечения скорости полного хода (без ТУК и паровой турбины) составит $4 \times [8,1 + (2 \times 20)] = 192,4$ МВт, что позволит кораблю развивать скорость полного хода не более 29 уз. Если нарастить агрегат ТУК с паровой турбиной, то суммарная мощность двигателей составит $4 \times [8,1 + 2 + (2 \times 20)] = 200,4$ МВт, что позволит кораблю развивать скорость полного хода порядка 29,5 уз. Исходя из указанных соображений, целесообразность разработки перспективных двигателей для увеличения

скорости полного хода на 0,5—1 уз представляется маловероятной.

Более простым окажется техническое решение, предусматривающее установку четырех агрегатов, каждый из которых представляет собой спарку двух перспективных ГТД мощностью по 25 МВт (см. рис. 19), разработанных по любому из указанных в табл. 4 вариантов. Суммарная мощность главных двигателей составит $4 \times (2 \times 25) = 200$ МВт, что также позволит кораблю развивать скорость полного хода до 29,5 уз. Однако, несмотря на более простую схему ГЭУ в техническом исполнении, для ее реализации потребуются разработка и создание перспективного ГТД на основе базового ГТД типа М90ФР, а также создание суммирующего реверс-редуктора.

Для обеспечения кораблю скорости полного хода 30 уз и более можно рекомендовать также использование четырех агрегатов типа М-21 (см. рис. 20), где в качестве форсажных двигателей можно применить перспективные ГТД мощностью по 25 МВт, разработанные на основе базовых ГТД М90ФР. Суммарная мощность двигателей для обеспечения скорости полного хода (без ТУК и паровой турбины) в этом случае составит $4 \times [8,1 + (2 \times 25)] = 232,4$ МВт.

Исследование возможных вариантов использования базовых и потенциальных перспективных корабельных ГТД в составе различных агрегатов энергетических установок кораблей различных классов, результаты которого представлены в табл. 5, позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, в настоящее время практически отсутствует острая необходимость в перспективных ГТД для обеспечения ходкости и маневренности кораблей основных классов, учитывая высокие затраты на их разработку и создание.

Использование базовых ГТД типов М90ФР и М70ФРУ-Р разработки ПАО «ОДК-Сатурн» позволит обеспечить серийно строящимся и перспективным кораблям приемлемые значения ходкости и маневренности. При этом следует отметить, что скорости полного хода у большинства из них незначительно (на 1—2 уз) будут занижены (см. табл. 5) по сравнению с требуемыми значениями (не менее 32 уз для кораблей основных классов,

за исключением авианосцев, и не менее 30 уз для авианосцев). Существенное снижение скорости полного хода при использовании базовых двигателей может наблюдаться только у перспективного легкого авианосца (скорость полного хода не более 27,5 уз) в двухвальном исполнении ГЭУ. С другой стороны, скорость полного хода близкого по водоизмещению английского авианосца «HMS Queen Elizabeth» составляет 25 уз, что не делает наш корабль ущербным по скоростным характеристикам.

Во-вторых, если все же исходить из необходимости разработки и создания перспективного ГТД мощностью 25 МВт любым из указанных в табл. 4 способов, то наличие такого двигателя позволит практически полностью устранить указанные выше недостатки. Это означает, что серийно строящиеся и перспективные корабли основных классов будут полностью удовлетворять требованиям по маневренным и скоростным характеристикам, не уступая по ним основным зарубежным аналогам (см. табл. 5).

В-третьих, необходимость разработки корабельных газотурбинных двигателей мощностью 34—35 МВт для обеспечения ходкости и маневренности перспективных кораблей может быть обоснована только для перспективных фрегатов водоизмещением от 6500 т и более, а также для легкого авианосца с комбинированной ГЭУ. Использование таких двигателей на фрегатах целесообразно в составе агрегатов схемного исполнения CODOG (см. рис. 17) или COD-LOG, а на легком авианосце — в составе агрегатов в виде спарки двух ГТД (см. рис. 19). Для кораблей остальных классов необходимость использования ГТД большой мощности (34 МВт и более) в составе различных агрегатов не просматривается (см. табл. 5).

Выше были рассмотрены основные предпосылки, обуславливающие целесообразность разработки перспективных ГТД в соответствии с их целевым предназначением, т. е. для обеспечения ходкости и маневренности надводных кораблей основных классов. При этом предполагалось использование ГТД в составе различных агрегатов, которые уже освоены в производстве

Таблица 5

Анализ предполагаемых схемных решений ГЭУ при использовании на кораблях базовых (созданных) или перспективных газотурбинных двигателей

| Схемное исполнение агрегатов ГЭУ | Скорость полного хода корабля при работе двигателей в составе агрегатов, уз | | | | | | |
|--|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| | Базовый ГТД М90 ФР 20 МВт | Вариант 1 (поколение 4+) 25 МВт | Вариант 2 (поколение 4+) 25 МВт | Вариант 3 (поколение 4+) 25 МВт | Вариант 4 (поколение 4++) 34 МВт | Вариант 5 (поколение 4++) 34 МВт | Вариант 6 (поколение 5) 35 МВт |
| Перспективный корвет пр. 20386 $D = 3400$ т | | | | | | | |
| МАЗ | 32 | — | — | — | — | — | — |
| 2 x М55Р | 32 | — | — | — | — | — | — |
| Фрегат пр. 22350 $D = 4500$ т | | | | | | | |
| 2 x М55Р | 30 | 32 | 32 | 32 | — | — | — |
| М7Н (М9) | 33 | — | — | — | — | — | — |
| Перспективный фрегат пр. 22350М $D = 6500$ т | | | | | | | |
| М7Н (М9) | 31 | 32 | 32 | 32 | — | — | — |
| 2 x М55Р | — | — | — | — | 32,5 | 32,5 | 32,5 |
| 2 x МА4 (спарка) | 34 | — | — | — | — | — | — |
| Перспективный фрегат пр. 22350М $D = 8000$ т | | | | | | | |
| М7Н (М9) | 30 | 32 | 32 | 32 | 33 | 33 | 33 |
| 2 x М55Р | — | — | — | — | 32 | 32 | 32 |
| 2 x МА4 (спарка) | 33 | — | — | — | — | — | — |
| Перспективный эскадренный миноносец пр. 23560 (шифр «Лидер») $D = 10\ 000$ т | | | | | | | |
| 2 x МА4 (спарка) | 31,5 | 33 | 33 | 33 | — | — | — |
| 2 x М21 | 33 | — | — | — | — | — | — |
| Перспективный эскадренный миноносец пр. 23560 (шифр «Лидер») $D = 14\ 000$ т | | | | | | | |
| 2 x М21 | 31 | 32 | 32 | 32 | — | — | — |
| 2 x МА4 (спарка) | — | 31,5 | 31,5 | 31,5 | — | — | — |
| Перспективный легкий авианосец $D = 44\ 000$ т | | | | | | | |
| 2 x МА4 (спарка) | — | — | — | — | 30 | 30 | 30 |
| 2 x М21 | 27,5 | 29 | 29 | 29 | — | — | — |
| Перспективный тяжелый авианосец (шифр «Шторм») $D = 100\ 000$ т | | | | | | | |
| 4 x М21 | 29 | 31 | 31 | 31 | — | — | — |
| 4 x МА4 (спарка) | — | 29,5 | 29,5 | 29,5 | — | — | — |

либо были освоены в производстве ранее для кораблей ВМФ СССР и, в принципе, могут быть разработаны для современных и перспективных кораблей. За рамки исследований было выведено использование перспективных ГТД в составе единых электроэнергетических систем кораблей с полным электродвижением. Проблемы создания кораблей с полным электродвижением, или «полностью электрических кораблей» являются предметом отдельного комплексного исследования и поствостановления.

В своих исследованиях авторы учитывали, что кроме свойств, обуславливающих целевое предназначение ГТД, последние должны обладать еще комплексом других (сервисных) свойств, таких как, например, надежность или топливная экономичность и др. Эти свойства также могут либо сужать, либо расширять сферу использования ГТД в корабельной энергетике, предопределяя, таким образом, целесообразность либо нецелесообразность их совершенствования.

Абстрагировавшись от выводов о желательности разработки перспективных ГТД мощностью 25 МВт, а в отдельных случаях даже 34—35 МВт, проведем технико-экономическое исследование целесообразности разработки последних, подразумевая при этом, что экономический эффект от использования перспективных ГТД, выражающийся в снижении затрат на топливо, многократно превзойдет затраты на разработку и создание двигателей, которые обозначены в табл. 4.

Для этих целей сравним расход топлива кораблем в течение года (можно даже времени «большого цикла» ~10 лет) для заданной модели использования корабля, т. е. коэффициента оперативного напряжения $k_{он}$ и спектра скоростей мирного времени, при комплектовании ГЭУ базовыми (т. е. уже созданными) и перспективными двигателями, которые могут быть разработаны сообразно различным вариантам, представленным в табл.4.

Зависимость для определения расхода топлива кораблём в течение года имеет вид

$$B_r^T = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (b_{ei} Ne_i) t^{X^4} \bar{t}_j, \quad (4)$$

где B_r^T — суммарный расход топлива кораблем в течение года; $j=1, m$ — число полос спектра мощностей использования ГЭУ, определяемое сообразно числу полос спектра скоростей эксплуатации корабля; b_{ei} — удельный расход топлива i -го двигателя на j -м режиме; $i=1, n$ — количество главных двигателей в составе ГЭУ; Ne_i — нагрузка (развиваемая мощность) i -го главного двигателя на j -м режиме, определяемая исходя из спектра мощностей; t^{X^4} — количество ходовых часов корабля в течение года; \bar{t}_j — относительная длительность j -го режима спектра скоростей.

В соответствии со спектром скоростей корабля для применения зависимости (4) необходимо построить спектр мощностей использования ГЭУ, который без труда может быть

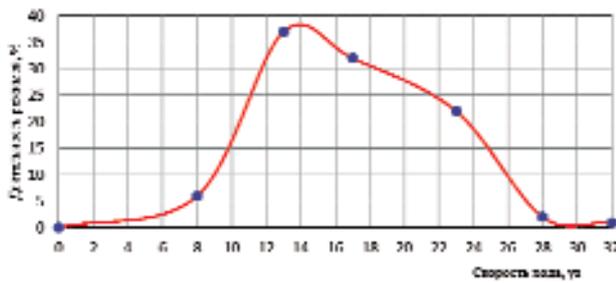


Рис. 21. Приблизительный вид спектра скоростей использования кораблей основных классов в мирное время

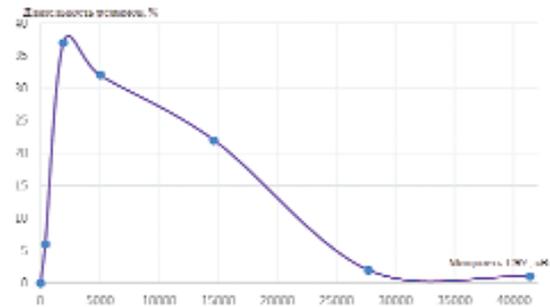


Рис. 22. Вид спектра мощностей использования ГЭУ корвета

создан на основе модели эксплуатации корабля, определяемой спектром скоростей ходового времени. В качестве примера возьмем приблизительный вид спектра скоростей эксплуатации кораблей основных классов, представленный в табл. 6 и на рис. 21.

Каждой полосе спектра скоростей корабля соответствует определенное значение валовой мощности в соответствии с буксировочными кривыми, представленными на рис. 14, 15. В соответствии со значением валовой мощности в каждой полосе спектра, с использованием зависимости (3) можно рассчитать суммарную мощность главных двигателей для обеспечения данной скорости хода, построив, таким образом, спектр мощностей использования ГЭУ.

Например, спектр мощностей использования ГЭУ для корабля типа корвет в соответствии со спектром скоростей (см. рис. 21) и буксировочной кривой (см. рис. 14) будет иметь вид, представленный на рис. 22.

Удельный расход топлива b_{ei} является индивидуальной характеристикой каждого двигателя, которая обычно предоставляется предприятием-изготовителем при поставке двигателя потребителю (на корабль). Например, для базового ПД М90ФР значение удельного расхода топлива в зависимости от развиваемой мощности имеет вид, показанный на рис. 23.

Как правило, предприятия-изготовители вместо удельного расхода топлива предоставляют характеристики часового расхода топлива (рис. 24), что, в принципе, в одинаковой степени характеризует топливную экономичность двигателя. Произведение удельного расхода топлива на мощность двигателя [вы-

ражение в скобках зависимости (4)] представляет собой тот же самый часовой расход топлива $(b_e N_e) = B_{\text{ч}}$.

Количество ходовых часов корабля в течение года в выражении (4) определяется в соответствии с моделью использования корабля в зависимости от коэффициента оперативного напряжения:

$$\tau^{\text{ч}} = k_{\text{он}} \cdot 365 \cdot 24, \quad (5)$$

где $k_{\text{он}} = T_m / T_{\text{ц}}$ — коэффициент оперативного напряжения, T_m — время пребывания корабля в море, ч; $T_{\text{ц}}$ — время «большого цикла», ч.

Коэффициент оперативного напряжения обычно выдается проектанту при проектировании корабля и является одним из граничных условий. Значения коэффициентов оперативного напряжения обосновываются соответствующими профильными научными организациями исходя из моделей использования кораблей. При анализе интенсивности использования корабля в составе флота в период его эксплуатации коэффициент оперативного напряжения определяется расчетными способами, что впоследствии позволяет проводить сравнительную оценку теоретического значения $k_{\text{он}}$ со значениями, подтверждаемыми практикой эксплуатации.

Таблица 6

| Спектр скоростей эксплуатации кораблей основных классов | |
|---|--|
| Скорость хода, уз | Длительность режимов ходового времени в мирное время, % (отн. ед.) |
| 8 | 6 (0,06) |
| 12–14 | 37 (0,37) |
| 16–18 | 32 (0,32) |
| 22–24 | 22 (0,22) |
| 28 | 2 (0,02) |
| 32 уз (ППХ) | 1 (0,01) |

Относительная длительность j -го режима (t_j) в выражении (4) определяется как относительная доля ходового времени корабля в конкретной j -й полосе спектра скоростей (значение берется из табл. 6).

Таким образом, при наличии характеристик топливной экономичности базовых и перспективных ГТД в виде кривых удельного расхода топлива (см. рис. 23) или линейных зависимостей для часового расхода топлива (см. рис. 24), а также при заданной модели эксплуатации корабля (коэффициента оперативного напряжения и спектра скоростей) с использованием выражения (4) можно оценить годовой расход топлива при работе ГТД в составе конкретных агрегатов, приведенных в табл. 5.

Определенную сложность в данном исследовании представляет отсутствие характеристик топливной экономичности перспективных двигателей, предполагаемых к разработке способами, перечисленными в табл. 4, в виде кривых удельного расхода топлива или зависимостей для часового расхода топлива. Преодолеть ее можно путем использования имеющейся, пусть даже ограниченной, информации об экономичности перспективных двигателей в виде значений удельных расходов топлива на номинальном режиме (см. табл. 2–4) [6].

Однако для перспективного двигателя, предлагаемого к разработке ПАО «ОДК-Сатурн» (вариант 5, рис 11), имеются характеристики удельного расхода топлива для четырех точек его нагрузки (см. табл. 3) [6], используя которые, можно рассчитать значения часового расхода топлива для указанных точек (точки 1–4 на рис. 25) и построить соответствующую графическую зависимость (см. рис. 25).

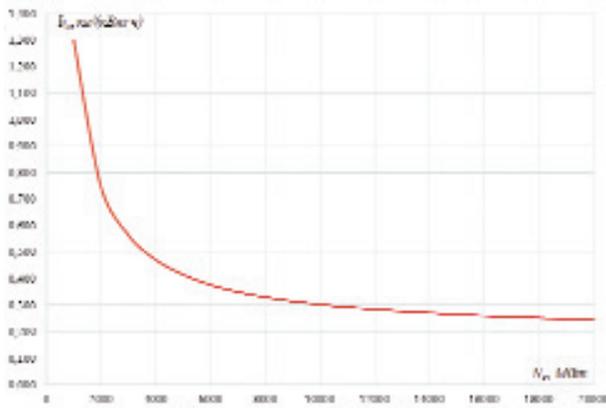


Рис. 23. Удельный расход топлива ГТД М90ФР

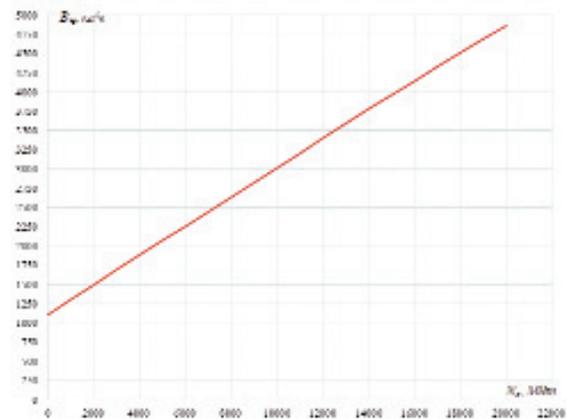


Рис. 24. Часовой расход топлива ГТД М90ФР

Учитывая линейный характер зависимости, можно продолжить линию до пересечения с осью ординат (штриховая линия рис. 25) для получения значения расхода топлива на холостом ходу ($N_e^{xx} = 0$).

Для удобства сравнения на рис. 25 отложим значения часового расхода топлива на номинальных режимах остальных перспективных ГТД (точки 5, 6 и 7), которые рассчитываются с использованием информации об удельных расходах топлива (см. табл. 2, 4) [6].

Анализируя полученные результаты, видим, что точка 5, характеризующая часовой расход топлива перспективных двигателей, разрабатываемых по вариантам 1 и 2 (удельные расходы совпадают), практически сливается с точкой 3, характеризующей расход топлива ГТД, разрабатываемого по варианту 5 на нагрузке, близкой к 25 МВт. Точка 6, характеризующая расход топлива ГТД, разрабатываемого по варианту 3 на нагрузке 25 МВт, также практически сливается с точкой 3. Аналогично точка 7, характеризующая расход топлива ГТД, разрабатываемого по варианту 4 на нагрузке 34 МВт, практически сливается с точкой 1, характеризующей расход топлива ГТД, разрабатываемого по варианту 5 на номинальной нагрузке 34 МВт. Более того, отложив на данном рисунке часовой расход топлива базового ГТД М90ФР (точка 8), представленного выше на рис. 24, мы уви-

дим, что графики также сольются практически в одну линию.

На рис. 25 также отмечена точка 9, характеризующая часовой расход топлива на номинальном режиме перспективного двигателя ПАО «Авиадвигатель» (вариант 6 конвертации из авиационного). Можно убедиться в том, что точка ложится ниже прямой, характеризующей расход топлива двигателей ПАО «ОДК-Сатурн», что свидетельствует о совершенстве двигателя в плане топливной экономичности. Проведя из точки 9 линию, параллельную прямой часового расхода топлива двигателей ПАО «ОДК-Сатурн» (штрихпунктирная линия), можно с точностью инженерных расчетов предположить характер изменения часового расхода топлива перспективным двигателем ПАО «Авиадвигатель».

Таким образом, можно сделать предварительный вывод о том, что изменение часового расхода топлива газотурбинных двигателей разработки ПАО «ОДК-Сатурн», как базовых, так и перспективных (варианты разработки 1–5), с несущественной погрешностью (в 1–2%) может быть описано одной линейной зависимостью (одной прямой). Это означает, что применение на кораблях перспективных двигателей, предлагаемых к разработке ПАО «ОДК-Сатурн» (варианты 1–5), никак не повлияет на расход топлива по сравнению с применением на них базовых двигателей типа М90ФР. Другими словами, практически отсутствует целесообразность разработки перспективных ГТД (варианты разработки 1–5) с целью снижения эксплуатационных затрат (имеются в виду затраты на топливо).

Сказанное поясним примером. При сравнении расхода топлива в течение года кораблем класса фрегат для двух вариантов ГЭУ: с базовыми ГТД М90ФР мощностью 2x20 МВт в агрегатах типа М55Р либо перспективных ГТД, разрабатываемых по любому из вариантов 1–3 (см. табл. 4), мощностью 2x25 МВт — используется формула (4). При ее использовании суть расчетов заключается в определении мощности работающих двигателей в каждой полосе спектра скоростей корабля, определении часового расхода топлива двигателями для данной мощности ($b_e N_e$) = $B_{\text{ч}}$, суммиро-

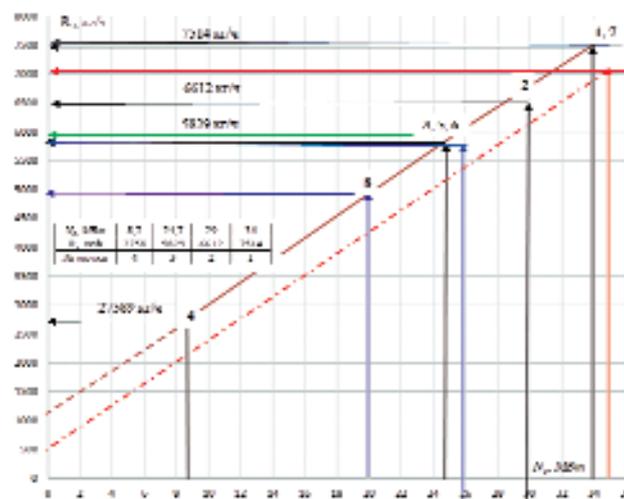


Рис. 25. Часовой расход топлива перспективных ГТД ПАО «ОДК-Сатурн» и ПАО «Авиадвигатель»: — — — — перспективные двигатели ПАО «ОДК-Сатурн» (варианты 1–5); — двигатель, конвертированный из авиационного ПД-35 (вариант 6)

вании расхода топлива по количеству работающих двигателей и суммировании расхода топлива по количеству полос спектра.

Часовой расход топлива двигателями определяется с использованием графиков на рис. 25. Для двигателей производства ПАО «ОДК-Сатурн», независимо от того, какие используются двигатели, базовые или перспективные, изменение часового расхода топлива характеризуется одной прямой (см. рис. 25). По этой причине, если нагрузка двигателей на режиме составляет фиксированную величину, например 2×20 МВт (см. рис. 25, точка 8), то часовой расход топлива будет одинаков, независимо от того, какими двигателями обеспечивается указанная нагрузка — базовыми М90ФР мощностью по 20 МВт или перспективными ГТД мощностью по 25 МВт.

Кроме того, перспективные двигатели, предлагаемые к разработке ПАО «ОДК-Сатурн», по топливной экономичности не могут соответствовать двигателям 5-го поколения. Известно, что КПД газотурбинных двигателей 4-го поколения характеризуется значением 36—37%. Для двигателей 5-го поколения эта величина составляет не менее 40—41%. Поэтому, декларируя минимальный удельный расход топлива на максимальном режиме $b_e = 0,221$ кг/(кВт·ч) для перспективного двигателя 5-го поколения (см. табл. 3) [6], производитель тем самым утверждает, что КПД такого двигателя при пересчете по формуле (6) составит не более 36,4%,

что соответствует двигателям 4-го поколения:

$$\eta_{ГТД} = \frac{3600}{Q_p^H b_e} = \frac{3600}{44700 \cdot 0,221} = 0,364, \quad (6)$$

где $Q_p^H = 44\,700$ кДж/кг — низшая теплотворная способность дизельного топлива.

В силу вышеизложенного целесообразность разработки и создания перспективных корабельных ГТД для обеспечения топливной экономичности может быть признана только в случае, если они соответствуют двигателям нового поколения по критериям экономичности.

По этой причине оценку годового расхода топлива при использовании на кораблях перспективных двигателей по сравнению с базовыми следует проводить, если это двигатели относятся к разным поколениям по критериям экономичности. В нашем случае — это вариант двигателей, конвертированных из авиационного ПД-35 (см. вариант 6 табл. 4), и любые двигатели разработки ПАО «ОДК-Сатурн», базовые или перспективные. Это возможно потому, что линия изменения часового расхода топлива такого двигателя (см. рис. 25) проходит ниже аналогичной линии, характеризующей расход топлива двигателями разработки ПАО «ОДК-Сатурн».

Ниже на рис. 26—29, представлены результаты расчетов сравнительной оценки годового расхода топ-

лива кораблями и финансовых затрат на него при использовании двигателей ПАО «ОДК-Сатурн» и ПАО «Авиадвигатель».

Учитывая, что потребности в двигателях большой мощности (34 МВт и более), как было указано выше (см. табл. 5), могут ограничиваться использованием на кораблях класса перспективный фрегат водоизмещением 6500—8000 т и легкий авианосец водоизмещением 44 000 т, то и сравнительная оценка ограничивается кораблями указанных классов.

Расчеты проводились с использованием зависимости (4) для коэффициента оперативного напряжения $k_{он} = 0,4$ и спектра скоростей, представленного на рис. 21 и в табл. 6. При оценке затрат на топливо исходили из оптовой стоимости дизельного топлива в 50 000 руб./т.

В результате анализа информации, представленной на рис. 26—29, установлено, что применение на кораблях ВМФ перспективных двигателей 5-го поколения для установленной модели использования кораблей (спектра скоростей и коэффициента оперативного напряжения) позволит сократить расход топлива и соответственно затраты на него в диапазоне 10—20% по сравнению с использованием двигателей 4-го поколения. Причем экономия топлива возрастает по мере увеличения водоизмещения кораблей.

Для кораблей класса фрегат экономия топлива и соответственно годовых затрат на него составит 10—13%, а для легкого авианосца — порядка 20%.

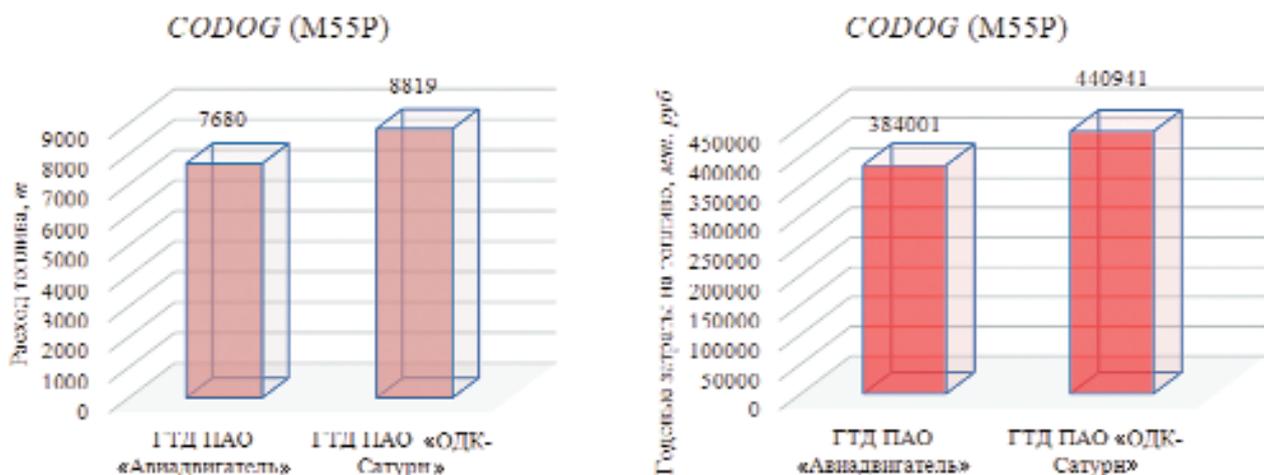


Рис. 26. Соотношение расхода топлива и затрат на него в течение года перспективным фрегатом пр. 22350М D = 6500 т (агрегат CODOG (M55P))

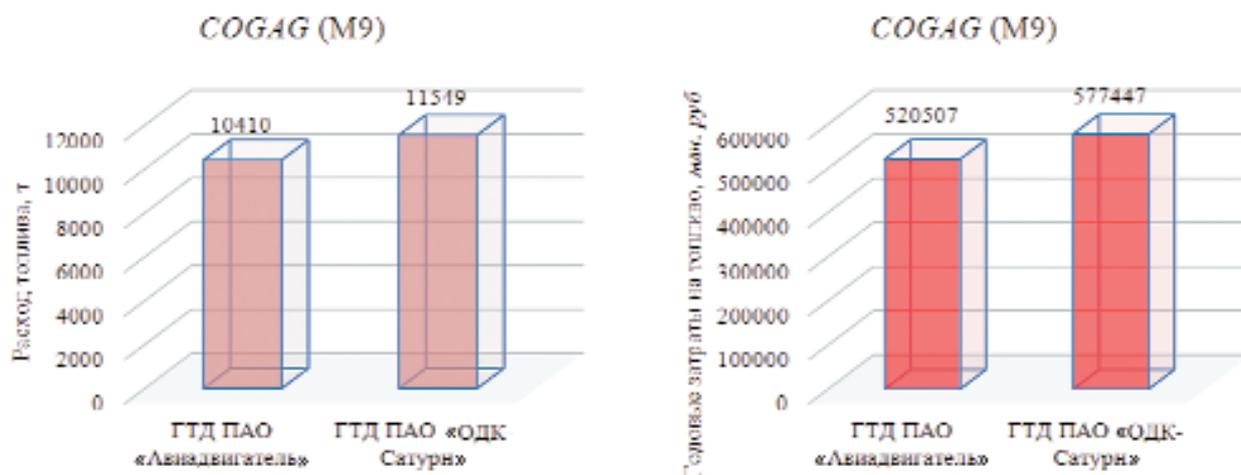


Рис. 27. Соотношение расхода топлива и затрат на него в течение года перспективным фрегатом пр. 22350M D = 8000 т (агрегат COGAG (M9))

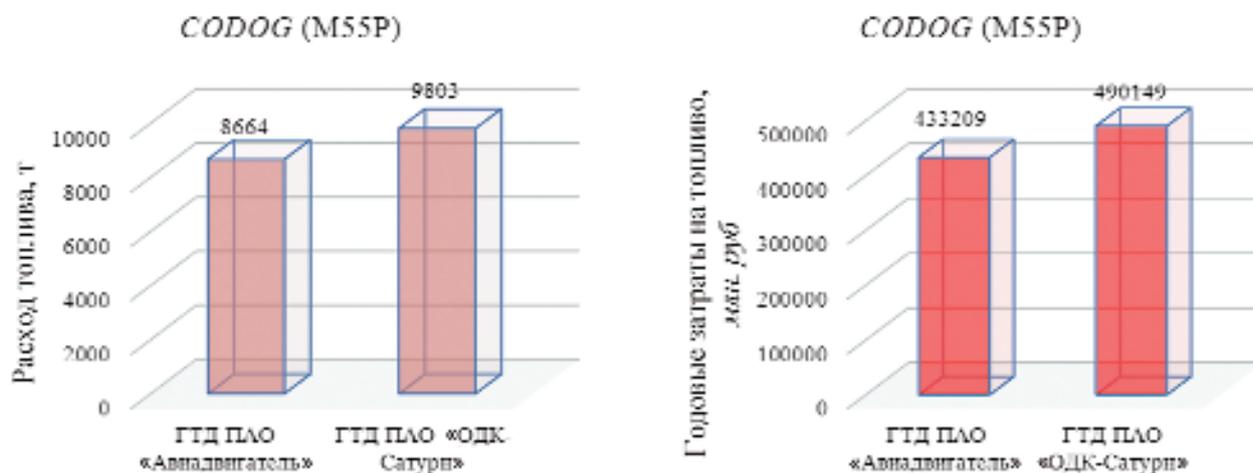


Рис. 28. Соотношение расхода топлива и затрат на него в течение года перспективным фрегатом пр. 22350M D = 8000 т (агрегат CODOG (M9))

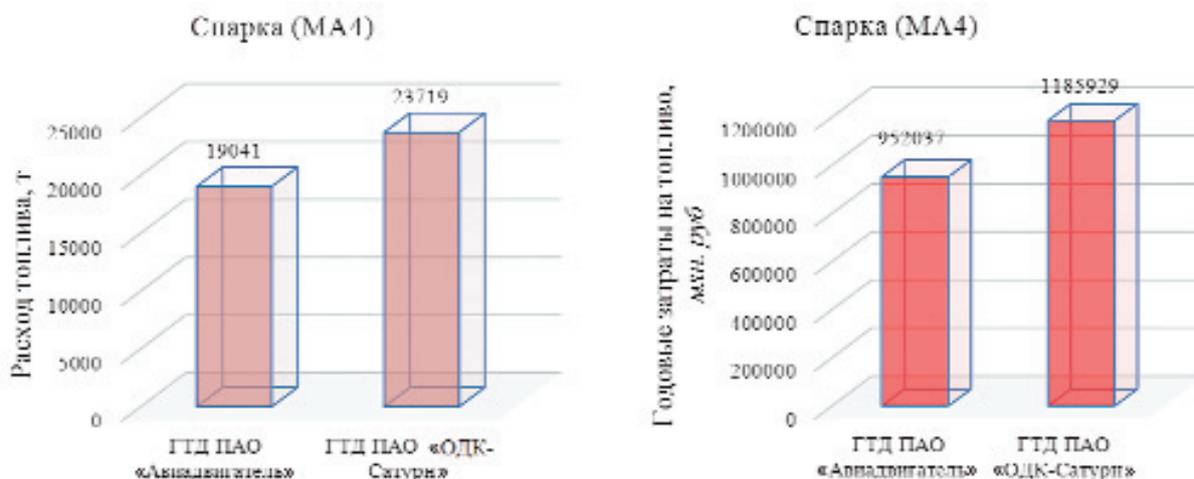


Рис. 29. Соотношение расхода топлива и затрат на него в течение года перспективным легким авианосцем D = 44 000 т (агрегат-спарка МА4)

При изменении интенсивности использования кораблей (спектра скоростей и коэффициента оперативного напряжения) изменятся только абсолютные значения расхода

топлива и затрат на него, но относительные значения, выражающие сокращение расхода топлива при использовании более совершенных двигателей 5-го поколения, останутся

неизменными в обозначенных выше диапазонах.

Окончательно целесообразность разработки перспективных корабельных ГТД с целью снижения

эксплуатационных затрат кораблей на топливо может подтвердиться только лишь в случае, если создаваемые перспективные двигатели соответствуют по критерию экономичности двигателям **нового** поколения, в нашем случае 5-го. Тогда снижение расхода топлива кораблями основных классов будет наблюдаться в пределах 10—20%, что составляет очень существенную величину, в особенности при большой серии кораблей и высокой интенсивности их использования. В противном случае целесообразность разработки перспективных ГТД может быть обоснована только обеспечением целевого предназначения кораблей в плане ходкости и маневренности.

Таким образом, в результате проведенного анализа установлено, что локализация производства корабельных ГТД на отечественных предприятиях позволяет обеспечить серийно строящимся и перспективным кораблям приемлемые значения по ходкости и маневренности, несмотря на незначительное снижение скорости полного хода кораблей основных классов по сравнению с требуемыми значениями.

Несмотря на различные предложения ПАО «ОДК-Сатурн» по разработке перспективных ГТД, в том числе и ГТД 5-го поколения, такая необходимость должна быть тщательно обоснована с позиций системного подхода и технико-экономического анализа, исходя из соображений обеспечения целевых свойств кораблей в плане ходкости и маневренности, а также из соображений топливной экономичности.

Установлено, что для обеспечения целевых свойств корабля в плане ходкости и маневренности может быть обоснована потребность в разработке и создании перспективного ГТД мощностью 25 МВт наименее затратным из указанных в табл. 4 способов.

Необходимость разработки корабельных газотурбинных двигателей большой мощности (34—35 МВт) для обеспечения ходкости и маневренности кораблей ограничивается небольшой численностью крупных кораблей основных классов.

Перспективные двигатели, предлагаемые к разработке ПАО «ОДК-Сатурн», по топливной экономичности не могут соответствовать дви-

гателям 5-го поколения, так как их КПД не превышает 36—37%. КПД корабельных ГТД 5-го поколения должен быть не ниже 40—41%.

Литература

1. Шинкоренко Д. Перспективы развития энергетических установок надводных кораблей ВМС зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2007. № 1; 3.
2. Шинкоренко Д. Разработка новых энергетических установок за рубежом — шаг к кораблям нового поколения // Зарубежное военное обозрение. 2010. № 11.
3. В России начата разработка авиадвигателя большой тяги ПД-35. URL: <http://24ri.ru/down/open/na-razrabotku-aviadvigatelja-pd-35-otvoditsja-10-let-i-180-mlrd-rublej.html>
4. Федоров И. Сегодня мы строим новый «Сатурн». URL: <http://vibrussia.ru/>. 15.08.2013.
5. ОДК формирует научно-технический задел для создания морских двигателей 5-го поколения.
6. Чупин П. В. Российский газотурбинный двигатель М90ФР. Доклад на секции НТО им. А. Н. Крылова 21.03.2018 г. СПб., 2018.
7. Иноземцев А. Военно-промышленный курьер. Двигатель ПД-14 — будущее российского авиапрома о двигателе ПД-14. URL: <http://vpk-news.ru/articles/17206>.
8. Из отчета НПО «Сатурн» за 2014 год. Приоритетные программы. ГТД морского применения. URL: <http://alexeyvvo.livejournal.com/123859.html>.
9. Чупин П. В. Результаты работы по импортозамещению украинских морских ГТД // Межотраслевая научно-практическая конференция «ВОКОР-2018». СПб.: ВУНЦ ВМФ «НИИ КиВ», 2018.

КАК УВЕЛИЧИТЬ МОЩНОСТЬ НА ВИНТЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ СУДНА ДО 10—12 МВт?

Л. Н. Токарев, докт. техн. наук (СПб ГЭТУ (ЛЭТИ)),
e-mail: tokset@yandex.ru

УДК 629.5.035

METHODS TO INCREASE ELECTRIC CAPACITY OF THE SHIP PROPULSION SYSTEM UP TO 10—12 MW

L. N. Tokarev, Doctor of Engineering science (SPb ETU «LETI»)

В электроэнергетических системах (ЭЭС) современных отечественных судов с электродвижением переменного тока принято осуществлять питание гребного электродвигателя и потребителей собственных нужд от сборных шин одного и того же главного распределительного щита (ГРЩ). Уровень напряжения в ЭЭС всех спроектированных российскими предприятиями и построенных судов составляет 960 В (действующее значение). При таких параметрах электроэнергии мощность на винте не превышает 2 МВт.

Причина ограничения мощности заключается в том, что существующие коммутационно-защитные

выключатели не способны при напряжении до 1000 В отключать ток короткого замыкания (ТКЗ) синхронных генераторов судовой электростанции, превышающий 120—150 кА. В результате единственным способом увеличения мощности на винте остается повышение напряжения синхронных генераторов свыше 1000 В, т. е. применение электрооборудования высокого напряжения. В качестве примера можно привести строящийся ледокол пр. 22220 (ЛК-60), в электростанции которого применены синхронные генераторы мощностью 36 МВт напряжением 10,5 кВ. В качестве гребных электродвигателей приняты два асинх-

ронных двухстаторных двигателя мощностью по 10 МВт, установленных на одном валу. Номинальное напряжение двигателей 3 кВ. Всего таких двигателей и соответственно винтов проектом предусмотрено три.

Автором предлагается техническое решение, позволяющее значительно увеличить мощность на винте, не увеличивая напряжения свыше 1000 В. Основное средство, позволяющее решить задачу, состоит в использовании генераторов и двигателей с несколькими обмотками статора. Вторым решением, не столь радикальным, может быть раздельное питание гребной установки и потребителей собственных нужд.

Проиллюстрируем сказанное, сравнив две системы электродвижения одновинтового судна, — с обычными одностаторными генераторами (рис. а) и с двухобмоточными генератором и гребным двигателем (рис. б). В обоих случаях для питания потребителей собственных нужд предусмотрены отдельные электростанции.