

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ КОРАБЕЛЬНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ 5-ГО ПОКОЛЕНИЯ

М. Н. Буров, канд. техн. наук (maxim.burov@uecsaturn.ru), **В. А. Пономарев**, канд. техн. наук (ПАО «ОДК-Сатурн»)

УДК 629.5.035.015.2

DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION TRENDS OF 5TH GENERATION GAS-TURBINE ENGINE

M. N. Burov, Candidate of Engineering science, **V. A. Ponomarev**, Candidate of Engineering science (UEC — Saturn)

Последние 60 лет вступают в строй корабли, в составе главных энергетических установок (ГЭУ) которых используются газотурбинные двигатели (ГТД). Постановление Совета Министров СССР о создании базы корабельного газотурбостроения в Николаеве вышло в 1954 г. Серийное производство корабельных ГТУ было основано на Южном турбинном заводе (ЮТЗ), а для их разработки создано специальное конструкторское бюро газотурбинных установок (СКБ ГТУ), впоследствии выделенное в отдельное предприятие — Союзное проектное бюро (СПБ) «Машпроект». ЮТЗ был переименован в промышленное объединение (ПО) «Заря». На протяжении сорока лет было выпущено около трех десятков типов легких корабельных ГТД и ГТУ на их базе для энергетики и газовой отрасли. Кроме корабельных ГТД создавались корабельные агрегаты, включающие в себя редукторы и передачи различного типа [1].

Распад СССР привел к тому, что отечественный флот оказался зависимым от иностранных поставок корабельных ГТД. В 1992 г. Управление кораблестроения флота инициировало создание в России собственной базы для разработки и серийного производства морских ГТД. По решению правительственной комиссии базовым предприятием для разработки корабельных ГТД в Российской Федерации (РФ) было определено ОАО «Рыбинское конструкторское бюро моторостроения» (РКБМ), в 1997 г. вошедшее в состав ОАО «Рыбинские моторы» (в настоящее время ПАО «ОДК-Сатурн»).

В 2000 г. в соответствии с концепцией применения газотурбинных двигателей и агрегатов на надводных кораблях был определен типовой ряд корабельных двигателей мощностью от 7000 до 27 000 л. с., который должен был обеспечить потребности морского флота. За основу для создания корабельных ГТД взяли газогенератор изделия «77» — перспективного авиационного двигателя 5-го поколения, разработанного в РКБМ. Он был адаптирован для морского и промышленного применения, и в период с

1993 по 2008 гг. на базе унифицированного газогенератора в ОАО «НПО «Сатурн» было создано семейство морских и промышленных ГТД мощностью от 4 до 10,5 МВт.

Первый российский морской двигатель М75РУ прошел государственные стендовые испытания (ГСИ) в 2006 г. Он предназначен для применения в составе энергетических установок патрульных и ракетных катеров, десантных кораблей, в том числе на воздушной подушке, а также морских объектов гражданского назначения.

Следующим двигателем семейства, созданным в ОАО «НПО «Сатурн», стал газотурбинный двигатель М70ФРУ, имеющий в два раза большую мощность.

Двигатель является базовым для создания ГТД, предназначенных для использования в составе главных газотурбинных агрегатов водоизмещающих кораблей и кораблей с динамическим поддержанием.

Увеличение мощности по сравнению с М75РУ было достигнуто путем добавления высоконапорной нулевой ступени компрессора, разработанной с помощью современных методов проектирования. В 2008 г. успешно завершились ГСИ двигателя. Созданы модификации двигателя М70ФРУ с выводом вала вперед (М70ФРУ-2) и с реверсивной силовой турбиной (М70ФРУ-Реверс). Можно считать, что в этих двигателях используется унифицированный газогенератор.

К 2018 г. была успешно реализована программа освоения серийного производства в ПАО «ОДК-Сатурн» двигателя мощностью 20 МВт (27 500 л. с.), разработанного ЗАО «Турборус» (совместное предприятие с украинским ГП НПК «Зоря» — «Машпроект» и НПО «Сатурн»). Также был серийно освоен корабельный газотурбинный агрегат (ГА) М55, разработанный на его базе.

На основе двигателя М70ФРУ-2 ПАО «ОДК-Сатурн» разработаны и серийно изготавливаются ГА М35Р-1 и М35Р-2 для корабля на воздушной подушке (КВП) пр. 12322 и агрегат М70 для КВП пр. 12061.

Таблица 1

Морские газотурбинные двигатели ПАО «ОДК-Сатурн», готовые к серийному выпуску

ТГД	M75PY	E70/8PD	M70FPU	M70FPU-2 (вал вперед)	M70FPU- Реверс
Агрегат	—	E70/PD	—	M35P-1 M35P-2 M70P	—
Мощность ТГД на валу сил. турб. (СТ), максимальная, кВт	5150	—	10300	—	—
Мощность ТГД на валу сил. турб. (СТ), номинальная, кВт	4400	8 163	8 830	7353	8 088
Топливо	Диз.	Диз./газообр. Автом. переключ. без останова ТГД	Диз.	Диз.	Диз.
Сертификат РМРС	Нет	Да	Нет	Нет	Нет
Наличие реверса	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Габаритные размеры, ДхШхВ, м	3,3х1,5х1,9	4х2х2	3,45х1,6х1,9	4,715х1,55х1,7	3,725х2,1х2,0
Ресурс назначенный, ВК (КДП), ч	40 000 (8 000)	100 000	40 000 (8 000)	8 000	40 000
Ресурс межремонтный, ВК/(КДП), ч	20 000 (4 000)	25 000	20 000 (4 000)	4 000	20 000
Срок службы до кап. ремонта, лет	10 (8)	15	15 (8)	8	10
Срок службы до списания, лет	30 (25)	30	30 (25)	25	30

Полученные результаты свидетельствуют о том, что за прошедшие 26 лет в России создана собственная база для разработки и серийного производства морских ТГД и агрегатов на их основе (табл. 1).

В настоящее время можно утверждать, что корабельные ТГД являются одними из основных двигателей в составе комбинированных и всережимных главных энергетических установок кораблей водоизмещением до 10–11 тыс. т. Вместе с тем их относительно низкая серийность требует принятия такой стратегии развития, которая не приведет к чрезмерным расходам на протяжении всего жизненного цикла. В этих условиях необходимо:

— обеспечить максимальную унификацию ТГД в каждом из потребных диапазонов мощности для различных объектов применения и возможность быстрой и дешевой конвертации ТГД для кораблей морского флота в варианты для гражданского применения, что позволит увеличить серийность производства,

уменьшить себестоимость и повысить надежность ТГД;

— формировать мощный ряд ТГД с учетом требуемых мощностей газоперекачивающих агрегатов ОАО «Газпром», что также позволит увеличить серийность производства;

— при выборе конкретного облика ТГД того или иного назначения в наибольшей мере учитывать условия его эксплуатации для обеспечения экономической эффективности.

С учетом изложенных принципов в ПАО «ОДК-Сатурн» разработан эскизный проект конструктивного ряда газотурбинных двигателей с комплектующим оборудованием. В его основу положено максимальное использование имеющегося опыта разработки ПАО «ОДК-Сатурн» морских и авиационных ТГД. Предлагается создание корабельных ТГД из данного мощностного ряда разделить на два этапа. В первую очередь следует модернизировать существующие морские ТГД M70FPU и двигатели мощностью 20 МВт. Во вторую

очередь разрабатывать семейство ТГД 5-го поколения.

Работы первого этапа могут идти в такой последовательности:

— форсирование двигателя M70FPU до мощности 11 500 кВт в нереверсивном исполнении и до 10 200 кВт с реверсом за счет применения разработанного в ПАО «ОДК-Сатурн» нового коррозионно-стойкого жаропрочного сплава СЛЖС-5;

— увеличение мощности 20-мегаваттного двигателя, сначала путем наращивания параметров цикла и расхода воздуха за счет применения сплава СЛЖС-5, а затем за счет разработки нового компрессора низкого давления с добавлением 1-й нулевой ступени и модификации турбин, что позволит довести максимальную мощность до 25 МВт.

На втором этапе предлагается сначала создать корабельный ТГД 5-го поколения простого цикла, а затем на его базе разработать ТГД сложного цикла (с промежуточным охлаждением и регенерацией), что может обеспечить достаточно массовое использование их на гражданских морских объектах. Двигатели 5-го поколения должны быть разработаны на основе унифицированного газогенератора.

Создание базового корабельного ТГД 5-го поколения и двигателя сложного термодинамического цикла мощностью 20–40 МВт на его основе с КПД в ISO более 43 % обеспечит конкурентоспособность российских морских ТГД с современными быстроходными морскими дизелями.

Для описания предложений по работам второго этапа следует определить, что входит в понятия поколений корабельных ТГД и что собой представляют морские двигатели 5-го поколения.

Корабельные ТГД принято хронологически разделять на поколения [2, 3, 4]. Так как эта классификация не упоминается в нормативных документах, то в литературе наблюдается разноречивость в последовательности и временных интервалах создания поколений. В зарубежных источниках разделение на поколения отличается от принятого в отечественной практике [5]. В работе [6] предложен метод разделения корабельных ТГД простого цикла по поколениям, понимая под этим определенный

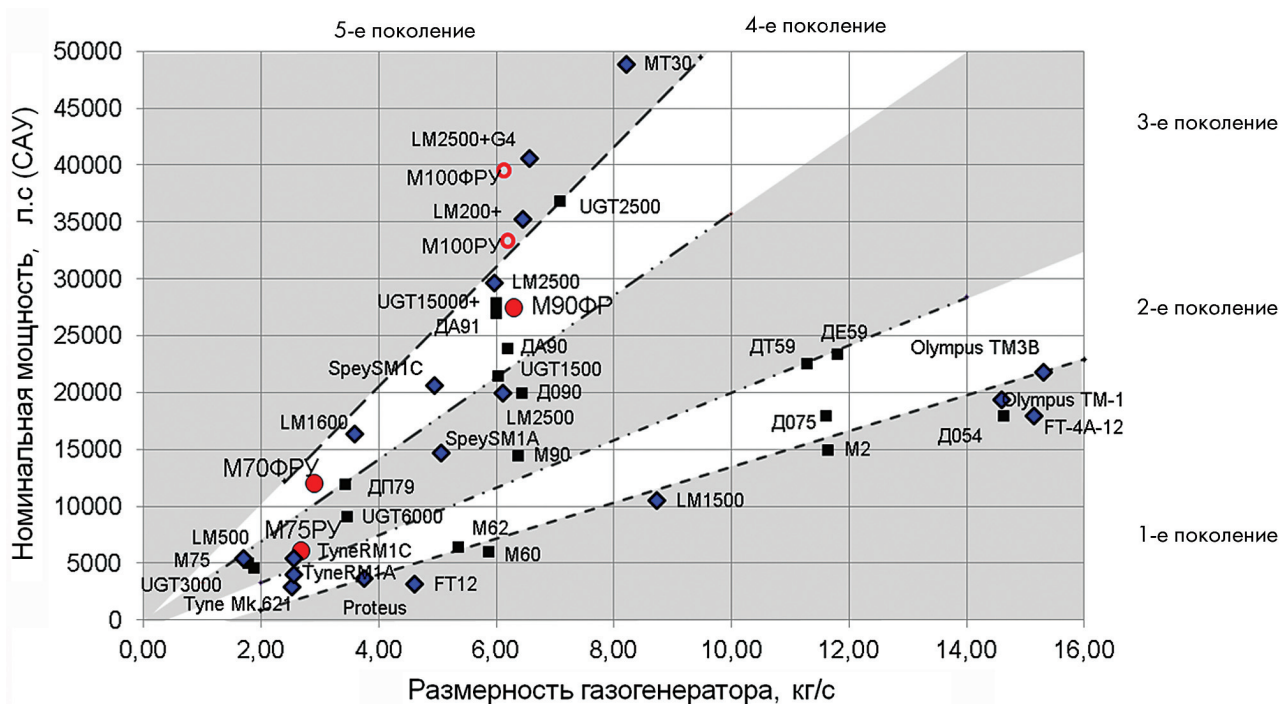


Рис. 1. Номограмма определения принадлежности корабельного ГТД к одному из поколений с использованием размерности газогенератора

уровень совершенства двигателя, не используя напрямую параметры цикла, тем более что они могут быть неизвестны для зарубежных ГТД или известны с определенной погрешностью. Такой подход позволяет более корректно сравнивать ГТД разных производителей и оценивать место проектируемых двигателей безотносительно параметров цикла.

Один из вариантов разделения корабельных ГТД по поколениям приведен на рис. 1.

Использование в качестве фактора оценки совершенства ГТД (принадлежности к какому-либо поколению) размерности газогенератора оправдано тем, что при равной мощности его меньшая размерность обеспечивается более высокими параметрами термогазодинамического цикла и КПД лопаточных машин.

Примененный подход позволил разделить на поколения как отечественные, так и зарубежные корабельные ГТД в едином ключе, основываясь на отечественной классификации по поколениям [2–4]. Результаты представлены в табл. 2.

Данный способ разделения корабельных ГТД не предусматривает использования значений удельного расхода топлива, а отражает уровень совершенства конструкции, применяемых материалов и техноло-

гий. Посмотрим, насколько это оправдано. Этот важный показатель совершенства корабельного ГТД зависит от параметров цикла. Покажем, как он менялся при переходе от одного поколения к другому. Из представленных на рис. 2 данных видно, что существует явная зависимость удельного расхода топлива от мощности. Чем меньше размеры проточной части газозовоздушного тракта (меньше размерность газогенератора), тем меньше эффективный КПД ГТД (при одинаковом совершенстве компрессора), что связано с высотой проточной части

лопаточных машин. Диапазоны значений удельных расходов топлива для разных поколений перекрываются. Наименьшие значения удельного расхода топлива 1, 2, 3 и 5-го поколений меньше, чем наибольшие значения для предыдущего поколения. А отличие между этими показателями для 3-го и 4-го поколений составляет 2,9 % (рис. 3). Отсюда следует, что оценку уменьшения удельных расходов топлива ГТД при переходе к очередному поколению необходимо выполнять с учетом его изменения по мощности. Аппроксимация имеющихся данных дает сле-

Таблица 2

Результаты разделения корабельных ГТД простого цикла на поколения предлагаемым методом	
Поколение	Корабельный газотурбинный двигатель
1	G6, G6/2, FT4A, FT4A 2, FT4A 6, FT4A 12, FT12A 3, FT12A 4, LM1500, Proteus 10M/533, Olympus TM 1, Olympus TM 3B, M2(D052), M25, M3(D054), M3A(D054A), D2(D072), D3, M60(D061), M8
2	Tyne Mk.621, Tyne RM1A, M8E(DE59, D050), M8K(DK59), M8KF(DT59), M62(D063)
3	LM2500, Spey SM1A, LM500, Tyne RM1C, M75(DC76, DE76), M70(D077, DN71, DP71, DM71, DC71), M90(D090, DA90), M75PY
4	LM1600, LM2500, Spey SM1C, M70ФРУ, DA91, M80(DA80)
5	LM2500+, LM2500+G4, MT30

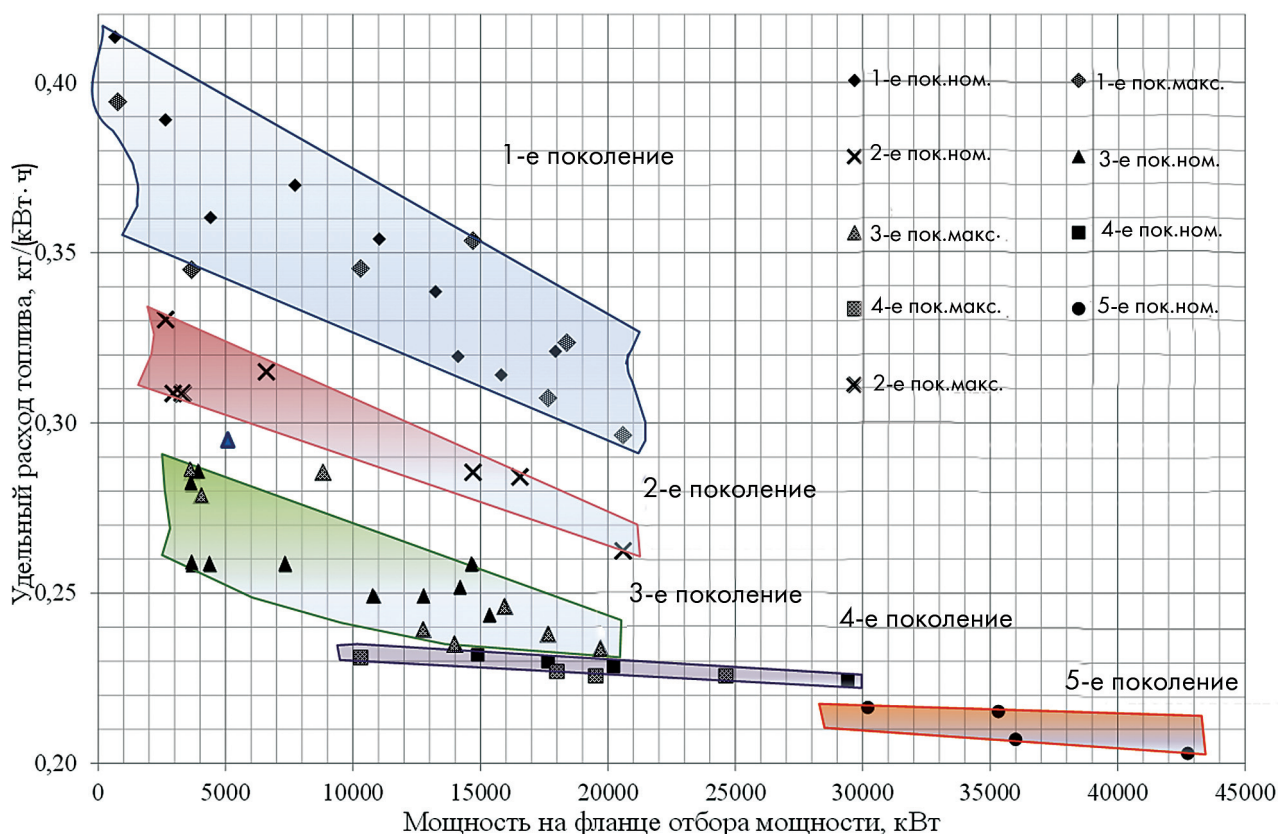


Рис. 2. Зависимости удельного расхода топлива корабельных ГТД различных поколений от мощности на номинальном и максимальном режимах в корабельных условиях и в ISO

дующие результаты (где большие значения относятся к меньшим мощностям):

2-е поколение к 1-му — от 10,4 до 17,5 %;

3-е поколение к 2-му — от 10,9 до 16,1 %;

4-е поколение к 3-му — от 4,8 до 13,8 %;

5-е поколение к 4-му — от 6,3 до 10,5 %.

Наблюдается тенденция сокращения разрыва в удельном расходе топлива между поколениями. Несколько выбивающееся из общего ряда значение в 4,8 % может быть объяснено малым количеством точек, что в соответствующем диапазоне мощностей не достаточно адекватно отражает реальную ситуацию.

Такое изменение удельного расхода топлива корабельных ГТД при переходе от поколения к поколению объясняется постепенным приближением к предель-

ным для простого цикла значениям эффективного КПД. Приведенные данные ясно показывают, что использование удельного расхода топлива корабельных ГТД в качестве однозначного критерия для определения принадлежности к тому или иному поколению, как это предлагается в работе [7], нецелесообразно, так как приводит к ошибочным решениям. Нарастивание параметров цик-

ла с целью всемерного уменьшения расхода топлива может привести к снижению надежности двигателя, увеличению числа ремонтов, в том числе со съемом для капитального ремонта. Потенциальная экономия средств за счет уменьшения потребления топлива может быть обнулена расходами на ремонты, сокращением числа находящихся в первой линии кораблей и снижением боевой готовности.

Для получения больших эффективных КПД, чем у ГТД простого цикла, предлагается перейти к использованию сложного цикла. За достаточно долгий период применения ГТД на кораблях и судах предпринималось несколько попыток создать ГЭУ на основе ГТД сложного цикла [8]. По заказу ВМС США американские фирмы Allison и Garret в сотрудничестве с фирмой Rolls-Royce в 80-х годах прошлого века начали исследования по созданию на основе ГТД Sprey ГТД

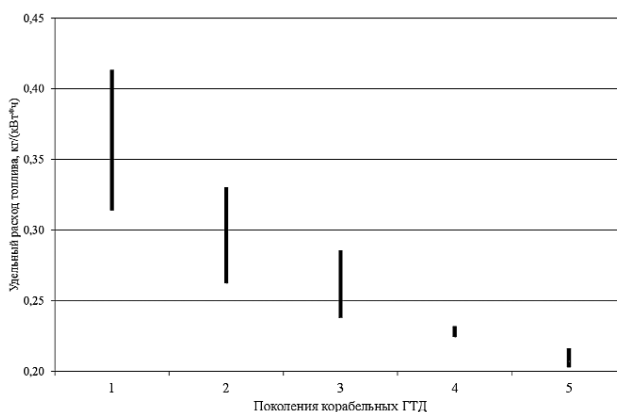


Рис. 3. Диапазоны изменения удельного расхода топлива корабельных ГТД различных поколений на номинальном и максимальном режимах в корабельных условиях и в ISO

для двигателя сложного цикла составляет 44 % в корабельных условиях при максимальной мощности 40 МВт и 46 % в условиях ISO. Главное преимущество этого двигателя — уменьшение расхода топлива на долевых режимах, которые для боевых кораблей имеют наибольшую продолжительность. Выигрыш составляет 27 % против ГТД простого цикла на 30 % мощности.

Поскольку главными в создании двигателя сложного цикла являются теплообменные аппараты и каналы, связывающие их с остальными узлами ГТД, то решающее влияние на энергетическую эффективность корабельного двигателя сложного цикла окажут требования к размерам машинного отделения, в котором должен быть установлен двигатель. Следствием неудачного сочетания габаритов, отводимых для двигателя, может стать чрезмерная плотность компоновки теплообменных аппаратов и каналов, которая приведет к большим потерям полного давления.

Если при создании ГТД сложного цикла не удастся обеспечить малые потери в каналах и узлах, благодаря которым реализуется сложный цикл, то его эффективный КПД будет на уровне ГТД 5-го поколения простого цикла или даже ниже при существенном увеличении стоимости производства и эксплуатации, а также массы и габаритов.

Чтобы получить требуемые потери в теплообменных аппаратах и каналах, следует выполнить их полнотурное моделирование. Идентифицированные подобным образом расчетные модели уменьшат риски, связанные с несоответствием фактических данных расчетным. Вместе с тем, если при детальных расчетах или по результатам испытания моделей выяснится недостаточная эффективность будущей эксплуатации ГТД сложного цикла в составе корабельных ГЭУ, то отказ от этого проекта не станет фатальным, так как ГТД 5-го поколения простого цикла будет реализован.

Предложение использовать в качестве базы для корабельного ГТД авиационного двигателя 5-го поколения ПД-14, высказанное в работе [7], само по себе вполне рационально. Возражение вызывает утверждение, что это рядовое, малозатратное и легкое занятие. В действительности в корабельном ГТД удастся

использовать только аэродинамические проекты компрессора и турбины. Вновь придется спроектировать компрессор низкого давления, камеру сгорания для работы на турбинном топливе, турбину низкого давления и силовую турбину, что видно из [9]. Если еще учесть замену материалов на коррозионно-стойкие, какого либо выигрыша в стоимости, сроках и эффективности по сравнению с предложениями ПАО «ОДК-Сатурн» не просматривается. Если еще учесть полное отсутствие опыта в разработке морских ГТД ПАО «ОДК-Авиадвигатель», то аргументы о целесообразности разработки корабельного ГТД эффективной мощностью 16 МВт на основе ПД-14 выглядят малоубедительными.

Решить проблему создания перспективного ГТД 5-го поколения для кораблей ВМФ эффективной мощностью 34–35 МВт путем использования газогенератора авиационного двигателя ПД-35, как это предлагается в [7], в ближайшие 15 лет невозможно. Проект ПД-35 в законченном виде не существует даже «на бумаге». Сама его реализация, и тем более сроки сертификации, весьма неопределенные. Умалчивается, что при создании ПД-35 требуется разработать вновь не менее семи технологий, именуемых критическими, потому что без них нужного качества не получить. Декларируемой в работе [7] экономии на разработке корабельного ГТД 5-го поколения путем использования в качестве базы авиационного ГТД ПД-35 получить не удастся.

При создании корабельных ГТД 5-го поколения необходимо учесть опыт 60 лет разработки, производства и эксплуатации, не повторяя прошлых ошибок. Разработку НТЗ по 5-му поколению следует вести в направлении создания семейства унифицированных двигателей и межпроектной унификации агрегатов. Необходимо использовать все преимущества, которые дает использование авиационных прототипов. Двигатели должны быть действительно унифицированными, и число моделей следует свести к минимуму. Возможность вывода вала вперед не должна приводить к разработке новых дисков турбины компрессора, и её необходимо предусмотреть заранее. Поставка должна осуще-

ствляться в контейнере, имеющем минимум мест соединения с корабельными системами, который должен быть унифицирован по типам кораблей. Особое внимание следует уделить обеспечению эксплуатационной технологичности, ремонтопригодности и контролепригодности [10, 11].

При этом для увеличения серийности и эксплуатационной наработки необходимо максимально стремиться к межпроектной унификации основных элементов энергетической установки, а также рассматривать возможность альтернативного применения ГТД в составе гражданских морских судов и других объектов гражданской морской техники. ПАО «ОДК-Сатурн» готово к этой работе.

Литература

1. Буров М. Н., Пономарев В. А. Анализ тенденций развития отечественных морских ГТД // Вестник РГТУ, Рыбинск: РГТУ. 2017. № 4 (43).
2. Рыбалко В. В. Корабельные газотурбинные энергетические установки (проблемы разработки и эксплуатации). СПб.: ВМИИ, 2003.
3. Николаевские газотурбинные двигатели и установки. История создания/под общ. ред. В. И. Романова. Николаев: Ю-Информ, 2005.
4. Расчет и конструирование машин // Машиностроение. Энциклопедия. Раздел IV. Корабли и суда. Т. IV-20. Общая методология и теория кораблестроения. Кн. 1. СПб.: Политехника, 2003.
5. Газотурбинные установки зарубежных кораблей. Зарубежное кораблестроение (1975–1985 гг.). Л.: ЦНИИ «Румб», 1986.
6. Буров М. Н., Пономарев В. А. К вопросу о разделении корабельных ГТД на поколения (тезисы доклада) // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы 7-й Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции в рамках Второго Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее». СПб.: СПбГМТУ, 2018.
7. Половинкин В. Н., Барановский В. В., Колодяжный Д. Ю. Оценка целесообразности и способов разработки и создания корабельного газотурбинного двигателя 5-го поколения // Судостроение. 2019. № 1.
8. Состояние и перспективы развития газотурбинных установок иностранных кораблей и судов. Иностранное судостроение в 1962–1970 гг. Л.: Судостроение, 1970.
9. Снитко М. А., Ворожейкин Д. В. «Приземление» ПД-14 // LXVI научно-техническая сессия РАН по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научные и практические проблемы использования достижений авиадвигателестроения в наземных ГТУ». Тезисы докладов. Пермь, 2019.
10. Буров М. Н., Пономарев В. А. К вопросу о формировании облика семейства морских ГТД 5-го поколения. 2019.
11. Буров М. Н., Пономарев В. А. Особенности судового ГТД сложного цикла V поколения // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы 7-й Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции в рамках Второго Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее». СПб.: СПбГМТУ, 2018.