

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-103-112  
УДК 629.5.03+629.5.064

М.Н. Буров  
ПАО «ОДК – Сатурн», Рыбинск, Россия

## ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ МОРСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

**Объект и цель научной работы.** Объектом работы являются морские энергетические установки (ЭУ), целью – анализ тенденций развития морских энергетических газотурбинных установок в России и за рубежом, выявление основных проблем конвертации авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) для применения в составе морских ЭУ, а также представление результатов создания современной российской базы морского газотурбостроения и тенденции развития морских ЭУ нового поколения.

**Материалы и методы.** Обобщен мировой и отечественный опыт морского газотурбостроения на основе анализа информации из открытых источников. Выполнены термогазодинамические расчеты морских ГТД и газотурбинных агрегатов простого и сложного цикла с целью обоснования рациональных направлений их развития.

**Основные результаты.** Выявлены основные закономерности в развитии морских ГТД и ЭУ. На примере работ ПАО «ОДК-Сатурн» показана эффективность создания семейства унифицированных двигателей различного назначения (морские, промышленные энергетические) на базе конвертированного авиационного газогенератора. Обоснованы пути дальнейшего совершенствования морских ГТД простого и сложного цикла. Представлены результаты работы ПАО «ОДК-Сатурн» в области создания жаропрочных коррозионностойких материалов.

**Заключение.** Сформулированы основные направления дальнейшего развития морских ЭУ и сделан вывод о том, что потенциал улучшения экономичности ГТД приближается к предельным значениям эффективного КПД для простого цикла, и дальнейшее развитие в данном направлении не приведет к существенному повышению топливной эффективности. Преимущества газотурбинных установок сложного цикла различных схем не очевидны и должны рассматриваться в контексте модели их эксплуатации в составе ЭУ конкретного корабля (судна). Дальнейшее совершенствование целевой эффективности ЭУ должно быть направлено на оптимизацию их конфигурации на основе базовых элементов (ГТД, дизель, редуктор, электрические системы) с максимальным использованием межпроектной унификации.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, морская энергетическая установка, газотурбинный двигатель сложного цикла.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-103-112  
UDC 629.5.03+629.5.064

M. Burov  
UEC-Saturn JSC, Rybinsk, Russia

## EVOLUTION AND MAIN DESIGN CHALLENGES OF NEW-GENERATION MARINE POWER PLANTS

**Object and purpose of research.** This paper discusses marine power plants, analysing the trends in marine gas turbine design in Russia and abroad and identifying the key challenges in the retrofitting of aircraft gas turbines for marine applications. The paper also describes the state of the art in Russian marine gas turbine engineering and outlines design trends in new-generation gas turbines.

**Materials and methods.** The paper generalizes global and Russian experience of marine gas turbine engineering based on available publications, as well as presents thermogasdynamic calculations for marine gas turbines and gas turbine assemblies of both basic and compound cycle in order to justify optimal trends in their development.

*Для цитирования:* Буров М.Н. История развития и основные проблемы создания морских энергетических установок нового поколения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; 3(393): 103–112.

*For citations:* Burov M. Evolution and main design challenges of new-generation marine power plants. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 3(393): 103–112 (in Russian).

**Main results.** This paper identified the main laws of marine gas turbine and power plant developments. The case study of UEC-Saturn projects illustrated the prospects offered by a family of unified marine and industrial engines based on a retrofitted airborne gas turbine. The study also justified the ways for further improvement of marine gas turbines (both basic- and compound-cycle). Finally, this paper illustrated UEC-Saturn JSC achievements in heat- and corrosion-resistant materials.

**Conclusion.** This study outlines the main ways for further progress in marine power plants and concludes that fuel efficiency improvement potential of gas turbines is already close to the maximum achievable efficiency of basic-cycle gas turbines, so further work in this field is unlikely to result in any significant gains in fuel efficiency. The advances of various compound-cycle gas turbine designs are not evident and must be explored in the context of their operational profile aboard specific ship. Further efforts in the efficiency improvement of power plants must be focused on the optimization of their configuration in terms of basic elements (gas turbine, diesel, gearbox, electric systems) with the maximum inter-design commonality.

**Keywords:** gas turbine, marine power plant, complex-cycle gas turbine.

*Author declares lack of the possible conflicts of interests.*

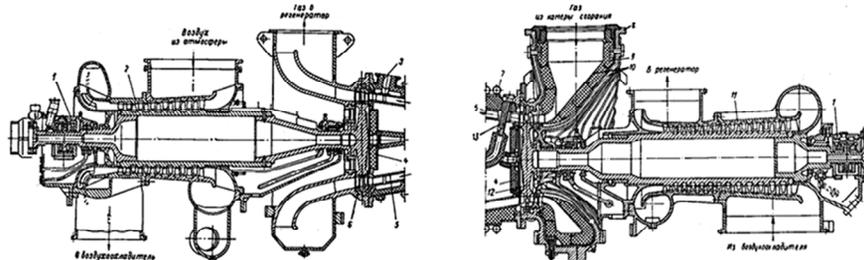
В СССР разработка корабельных газотурбинных двигателей (ГТД) началась в конце 30-х гг. на Ленинградском металлическом заводе под научным руководством сотрудника Научно-исследовательского института военного кораблестроения Г.И. Зотикова. После начала Великой Отечественной войны работы были практически прекращены [1]. В послевоенное время определились два пути развития морских ГТД. Первый путь – «тяжелые» (промышленного типа) газотурбинные установки (ГТУ) сложного цикла с регенерацией тепла уходящих газов и умеренной температурой газа перед турбиной. В качестве примера можно привести двигатель RM60, устанавливающийся на канонерскую лодку Grey Goose фирмы Rolls-Royce и отечественный ГТУ-10, эксплуатирующийся в составе установки ГТУ-20 на сухогрузном судне типа «Парижская коммуна» (рис. 1).

Второй путь – «легкие» ГТД авиационной конструкции с более высокими параметрами простого цикла. Первая морская ГТУ М-1 была создана

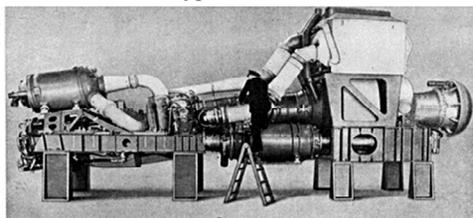
в СССР под руководством С.Д. Колосова на базе авиационного турбовинтового двигателя (рис. 2). Мощность установки составляла 2,94 МВт, и применялась она на торпедном катере пр. 183ТК.

Сложность процессов конвертации и значительные отличия условий работы ГТД на корабле от самолетных, проблемы с освоением серийного производства конвертированного авиационного двигателя привели С.Д. Колосова к выводу о том, что ГТД, предназначенные для работы в корабельных условиях, необходимо разрабатывать специально. Сейчас можно считать, что эти трудности были исключительно организационного и субъективного характера, т.к. зарубежные авиадвигательные фирмы по результатам эксплуатации морских ГТД «тяжелого» типа специальной постройки решили, что из-за относительно малой серийности нецелесообразно финансировать программы их создания. Зарубежное морское газотурбостроение пошло по пути конвертирования авиационных ГТД, т.е. создания морских ГТД на базе

Газотурбинный двигатель сложного цикла ГТУ-10 (1961 г.)



Газотурбинный двигатель сложного цикла RM60 (R&R 1953 г.)



Мощность: 5880 кВт

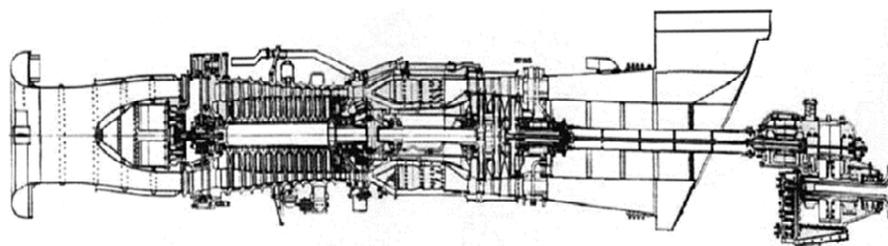
Применение: канонерская лодка «Grey Goose»

**Рис. 1.** Морские газотурбинные двигатели «тяжелого» типа

**Fig. 1.** "Heavy" marine gas turbines

**Рис. 2.** Первая советская корабельная газотурбинная установка «легкого» (авиационного) типа М-1

**Fig. 2.** M-1, first "light" (airborne) Soviet gas turbine



освоенных в производстве авиационных двигателей. Такой подход позволяет использовать большой опыт эксплуатации авиационных двигателей (наработка некоторых двигателей составляет десятки миллионов часов) и уменьшить сроки и затраты на разработку морского варианта. Практически все современные зарубежные корабельные и судовые двигатели созданы на базе авиационных газогенераторов (рис. 3).

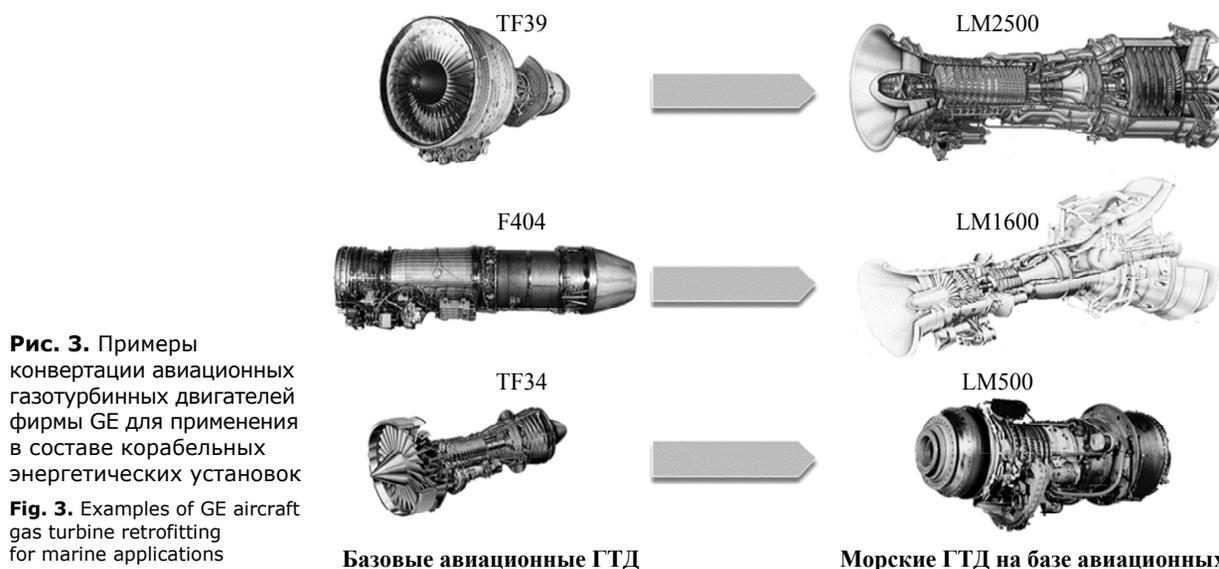
В итоге в СССР была создана специализированная база корабельного газотурбостроения. Серийное производство корабельных ГТУ было основано на Южном турбинном заводе в г. Николаеве. Там же появилось Специальное конструкторское бюро газотурбинных установок (СКБ ГТУ), впоследствии выделенное в отдельное предприятие СПБ «Машпроект». ЮТЗ был переименован в ПО «Зоря». На протяжении сорока лет было выпущено около трех десятков типов легких корабельных ГТД и ГТУ на их базе для энергетики и газовой отрасли [2].

С распадом Советского Союза возникла необходимость создания в России собственной базы морского газотурбостроения. В 1992 г. по решению

правительственной комиссии базовым предприятием для разработки корабельных ГТД в РФ было определено ОАО «Рыбинское конструкторское бюро моторостроения» (в настоящее время входит в состав ПАО «ОДК-Сатурн»). С учетом опыта рыбинских конструкторов в создании уникальных двигателей для военной авиации, за основу для создания морских ГТД был взят газогенератор перспективного авиационного двигателя (рис. 4).

В 2000 г. в соответствии с концепцией создания и применения газотурбинных двигателей и агрегатов на надводных кораблях морского флота был определен типоряд корабельных двигателей мощностью от 7000 до 27 000 л.с., который должен был обеспечить потребности флота в газотурбинных двигателях.

Основная сложность, с которой пришлось столкнуться при конвертации авиационного газогенератора в морскую, – это требование по обеспечению работоспособности в морской среде. Дело в том, что коррозионностойкие жаропрочные материалы существенно уступают по своим прочностным характеристикам авиационным. Так, при значении параметра Ларсона – Миллера  $26 \cdot 10^3$  длительная

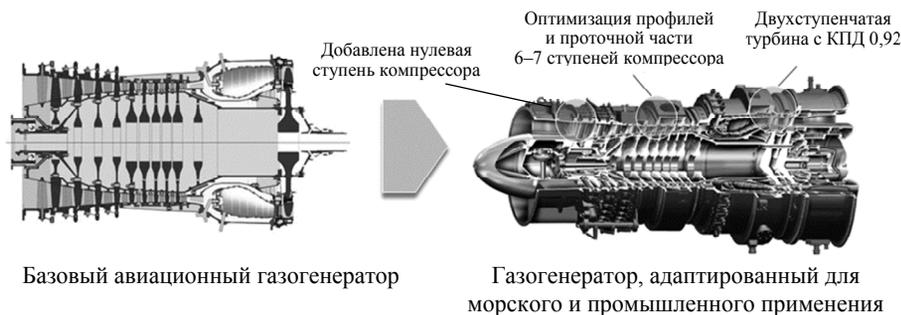


**Рис. 3.** Примеры конвертации авиационных газотурбинных двигателей фирмы GE для применения в составе корабельных энергетических установок

**Fig. 3.** Examples of GE aircraft gas turbine retrofitting for marine applications

Базовые авиационные ГТД

Морские ГТД на базе авиационных



**Рис. 4.** Адаптация перспективного российского авиационного газогенератора для применения в качестве базы для семейства морских и промышленных газотурбинных двигателей  
**Fig. 4.** Adaptation of a promising Russian aircraft gas turbine as a prototype for a future family of marine and industrial gas turbines

прочность коррозионнотстойкого жаропрочного сплава ЧС88У-ВИ более чем на 60 % ниже по сравнению с авиационным сплавом ЖС32 (рис. 5).

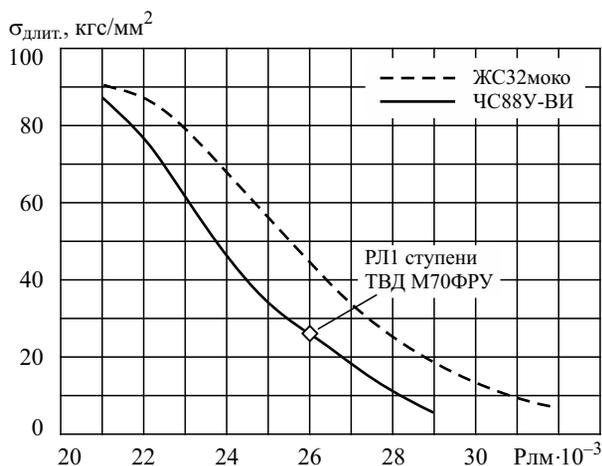
Это привело к необходимости снижения предельной температуры газа перед турбиной на ~250 К и частоты вращения ротора высокого давления на ~10–12 % при выборе облика семейства морских ГТД на базе данного газогенератора, а также к разработке новой двухступенчатой тур-

бины высокого давления с более эффективной системой охлаждения. Кроме того, для улучшения топливной эффективности была выполнена оптимизация профилей и проточной части ряда ступеней компрессора.

Первый российский морской двигатель М75РУ (рис. 6) прошел ГСИ в 2006 г. Он предназначен для применения в составе энергетических установок (ЭУ) патрульных и ракетных катеров, десантных кораблей.

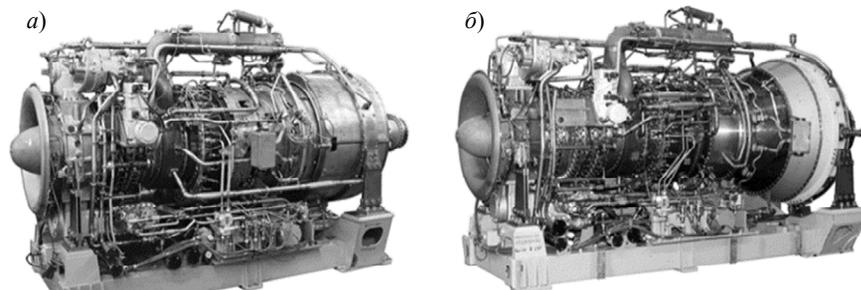
Следующим двигателем семейства, созданным в России ОАО «НПО «Сатурн», стал ГТД М70ФРУ (рис. 6). Для расширения мощностного ряда к компрессору была добавлена «нулевая» ступень, что позволило увеличить расход воздуха и степень повышения полного давления в компрессоре [4]. В настоящее время на базе модификации двигателя М70ФРУ (М70ФРУ-2) созданы газотурбинные агрегаты (ГТА) для кораблей с динамическим поддержанием, где немаловажную роль играет относительно малый вес, присущий морским двигателям авиационного типа. Также разработана модификация с реверсивной силовой турбиной для водоизмещающих кораблей.

Вскоре была создана модификация М70ФРУ – двигатель Е70/8РД, адаптированный для применения в составе силовых установок гражданских морских судов. Его принципиальной отличительной чертой является двухтопливная камера сгорания с функцией автоматического перехода с газового



**Рис. 5.** Сравнение длительной прочности коррозионнотстойкого жаропрочного сплава ЧС88У-ВИ и авиационного ЖС32

**Fig. 5.** Long-term strength comparison of corrosion- and heat-resistant alloy ChS88U-VI and aircraft alloy ZhS32

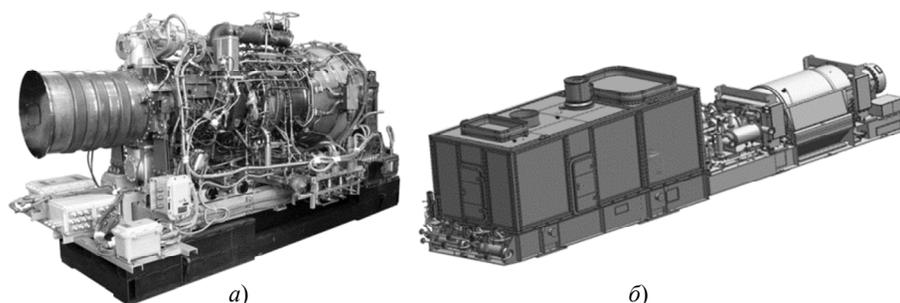


**Рис. 6.** Первые российские морские газотурбинные двигатели на базе авиационного газогенератора: а) М75РУ; б) М70ФРУ

**Fig. 6.** First Russian marine gas turbines retrofitted from airborne prototypes

**Рис. 7.** Двигатель E70/8РД (а) и газотурбогенератор СГТГ-8 (б) на его основе

**Fig. 7.** Gas turbine E70/8RD and its derivative, SGTG-8 gas turbogenerator



топлива на дизельное и наоборот. Также на 30 % были улучшены эмиссионные характеристики камеры сгорания. На базе двигателя E70/8РД создан судовый газотурбогенератор мощностью 8 МВт (СГТГ-8), приемочные испытания которого были успешно завершены в 2013 г. (рис. 7). Газотурбогенератор предназначен, в том числе, для освоения шельфовых месторождений нефти и газа, где может использоваться в составе силовых агрегатов газозавозов, а также для энергообеспечения нефте- и газодобывающих платформ. Основные технические решения, отработанные на СГТГ-8, могут быть положены в основу создания ЭУ для кораблей, использующих принцип электродвижения.

В период 2000–2007 гг. на базе унифицированного газогенератора ПАО «ОДК-Сатурн» было создано семейство двигателей для «Газпрома» ГТД-4/6,3/10РМ мощностью 4, 6,3 и 10 МВт соответственно. Работы по созданию промышленных ГТД в интересах АО «Газпром» позволили провести опережающую прочностную и параметрическую доводку базового газогенератора, а также обеспечить отработку технологий в серийном производстве и поддержание технологической готовности производства в период 2002–2013 гг. в условиях отсутствия заказов от морского флота. По состоянию на апрель 2020 г. суммарная наработка двигателей рассматриваемого семейства в эксплуатации на объектах АО «Газпром» превысила 500 тыс. ч.

Учитывая, что базовые морские ГТД создавались с учетом высоких требований флота к топливной эффективности, двигатели для ГПА, унифицированные с морскими, оказались одними из лучших в своем классе по уровню КПД (рис. 8).

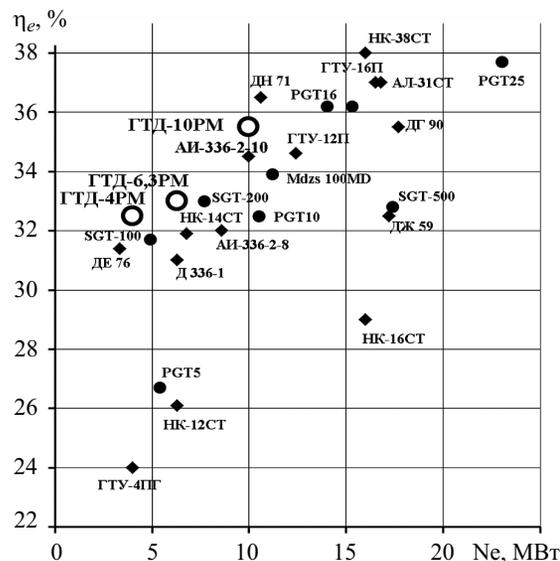
К 2018 г. на ПАО «ОДК-Сатурн» была успешно реализована программа освоения серийного производства двигателя мощностью 20 МВт для применения в составе газотурбинных и дизель-газотурбинных агрегатов кораблей. Таким образом, можно утверждать, что на сегодняшний день в Рос-

сии создана собственная база морского газотурбостроения.

Решив задачу обеспечения флота российской корабельной энергетикой в ближнесрочной перспективе, необходимо определить направления перспективного развития морских ГТД и ГТА, связанные с необходимостью обеспечения:

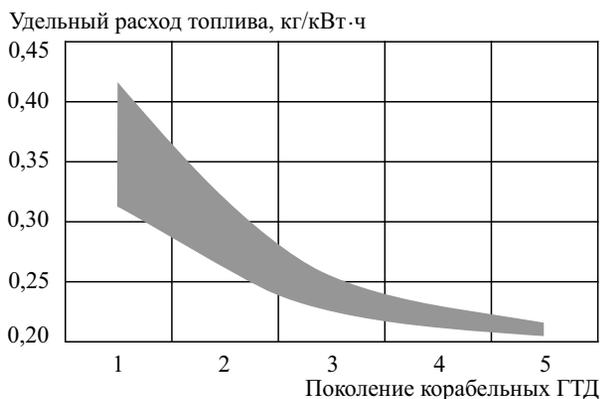
- высокой экономичности в широком диапазоне эксплуатационных режимов;
- систем корабля электрической энергией;
- увеличения ресурса и надежности;
- минимизации стоимости производства и эксплуатации.

Повышение топливной эффективности ГТД может достигаться за счет повышения КПД лопаточных машин, увеличения КПД термодинамического цикла, а также применения сложного цикла



**Рис. 8.** Сравнение семейства унифицированных промышленных ГТД-4/6,3/10РМ с аналогами

**Fig. 8.** Unified gas turbines of GTD-4/6,3/10PM family versus their foreign counterparts



**Рис. 9.** Развитие топливной эффективности морских газотурбинных двигателей от поколения к поколению

**Fig. 9.** Progress in fuel efficiency of marine gas turbines from generation to generation

(рекуперация, промежуточное охлаждение, пароутилизационный контур и т.д.). Однако кривая эффективности морских ГТД, аналогично авиационным двигателям, при переходе от поколения к поколению постепенно выполаживается (рис. 9). Это значит, что каждый дальнейший шаг по повышению экономичности ГТД при существенных материальных и временных затратах дает все меньший результат.

Дело в том, что уровень аэродинамического совершенства лопаточных машин сегодня вплотную приближается к своему теоретическому максимуму и в будущем уже не будет являться существенным фактором повышения КПД двигателя и агрегата. То же самое можно сказать и про параметры цикла. Так, предельный достигнутый на сегодняшний день уровень температур газа перед рабочим колесом турбины в морских ГТД при развитии охлаждения рабочих лопаток и ограниченной наработке на максимальном режиме составляет немногим более 1500 К. Дальнейшее повышение температуры газа при использовании существующих коррозионностойких материалов горячей части потребует увеличения охлаждения турбины, что, в свою очередь, негативно скажется на мощностных, экономических и ресурсных характеристиках ГТД, тем самым практически полностью обесценив ожидаемый эффект.

Для решения задачи повышения температуры газа в цикле ПАО «ОДК-Сатурн» активно разрабатывает и паспортизирует специальные морские жаропрочные сплавы. Сегодня создан и внедрен в конструкцию серийного двигателя М70ФРУ-2

коррозионностойкий монокристаллический жаропрочный сплав СЛЖС-5, предназначенный для изготовления рабочих лопаток турбины. По уровню стойкости к солевой коррозии и жаропрочности СЛЖС-5 превышает показатели созданных в последние годы лучших мировых аналогов. При этом в процессе работы не образуются охрупчивающие фазы, что обеспечивает повышенную стабильность структуры и прочностных характеристик. Работы по паспортизации данного сплава и его внесению в отраслевой перечень-ограничитель материалов проводились в тесной кооперации с НИЦ «Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей».

Тем не менее сплав СЛЖС-5 не способен полностью удовлетворить потребность в новых жаропрочных материалах. Проблема в том, что наряду с явными преимуществами монокристаллическая структура накладывает ряд технологических ограничений. Прежде всего это связано с анизотропией свойств монокристаллической отливки, а также чувствительности технологии к геометрии отливки. По этой причине получение монокристаллической отливки соплового аппарата турбины, являющегося сложнопрофильным элементом, – крайне сложная задача, что отрицательным образом сказывается на выходе годного в литейном производстве, и в конечном итоге приводит к существенному увеличению себестоимости производства и ремонта двигателей.

Выходом из этой ситуации видится использование литейных сплавов с поликристаллической структурой с существенно более высокими прочностными характеристиками.

Решение поставленных задач по созданию новых коррозионностойких жаропрочных сплавов позволит в среднесрочной перспективе разработать модификации уже созданных и серийно освоенных ПАО «ОДК-Сатурн» двигателей с более высокими параметрами термодинамического цикла. Это даст возможность при сохранении габаритов увеличить максимальную мощность и топливную эффективность морских ГТД, поддерживать постоянную мощность при увеличении температуры наружного воздуха, а также обеспечить увеличение ресурса и тем самым снизить стоимость жизненного цикла в целом. Кроме того, новые материалы являются необходимым условием создания научно-технического задела в обеспечение разработки семейства морских ГТД и ЭУ нового поколения.

При рассмотрении вопросов обеспечения ресурса и надежности нельзя не упомянуть задачу построения развитой системы параметрической

диагностики, позволяющей не только выявлять возникающие дефекты, но и прогнозировать их появление и развитие для своевременного принятия обоснованных решений.

Что касается применения сложного цикла, то, несмотря на существенный прирост топливной эффективности за счет утилизации тепла уходящих газов, применение таких установок на боевых кораблях не всегда целесообразно по компоновочным и эксплуатационным соображениям.

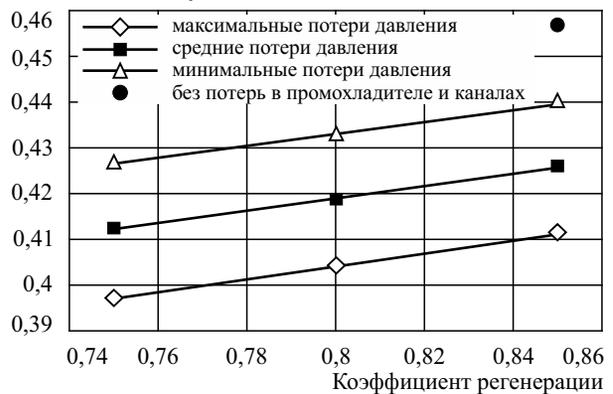
Успех в создании ГТД сложного цикла, например, с промежуточным охлаждением и рекуперацией, напрямую зависит от эффективности теплообменных аппаратов (промежуточного охладителя и рекуператора).

Выполненная расчетная оценка влияния потерь полного давления в промежуточном охладителе и рекуператоре, а также эффективного КПД ГТД (рис. 10) показала, что 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 V поколения простого цикла. Таким образом, первоочередной задачей при создании ГТД сложного цикла должно быть максимально точное определение потерь полного давления в теплообменниках (с учетом подводящих и отводящих каналов), а также степени регенерации, вплоть до получения экспериментальных данных на полноразмерных моделях.

Следует отметить, что при выполнении анализа степени регенерации промежуточного охладителя и регенератора принимались постоянными и равными 0,91 и 0,86 соответственно, что, учитывая ограничения по их габаритам, является весьма оптимистичным показателем (особенно для регенератора). Влияние этого параметра на характеристики двигателя сложного цикла также весьма существенно. Данный вопрос требует отдельного тщательного изучения с применением методов многокритериальной оптимизации, поскольку величина степени регенерации, как правило, находится в противоречии с уровнем потерь давления и габаритно-массовыми характеристиками теплообменных устройств.

Также при выборе схемы ГТД сложного цикла необходимо учитывать, что эксплуатация ЭУ водоизмещающих кораблей ведется преимущественно (более 90 %) на режимах менее 0,7 от номинального (рис. 11) [3], а характерным свойством ГТД является существенное ухудшение, в отличие от дизеля, его топливной эффективности при дросселировании (рис. 12).

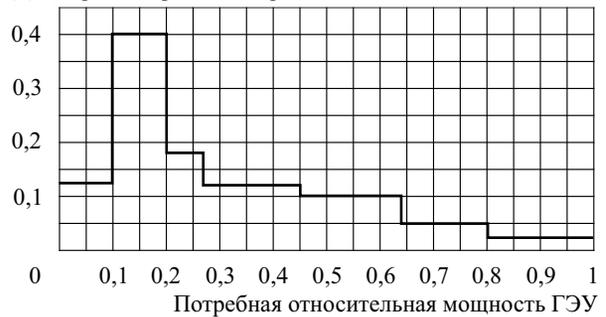
Мощность на валу, кВт



**Рис. 10.** Результаты оценки КПД двигателя с промежуточным охлаждением и рекуперацией в зависимости от потерь в теплообменных аппаратах

**Fig. 10.** Efficiency assessment results for an engine with intermediate cooling and recuperation depending on heat exchange losses

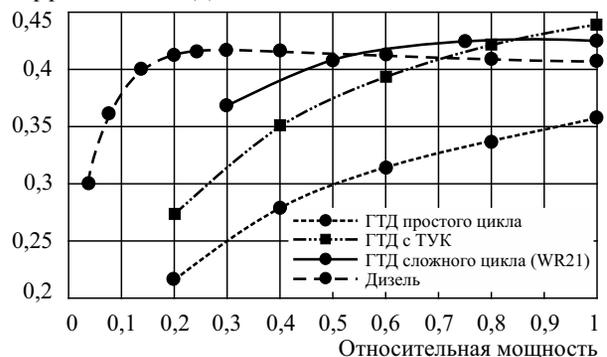
Доля времени работы на режиме



**Рис. 11.** Типовой спектр использования мощности энергетической установки водоизмещающего корабля

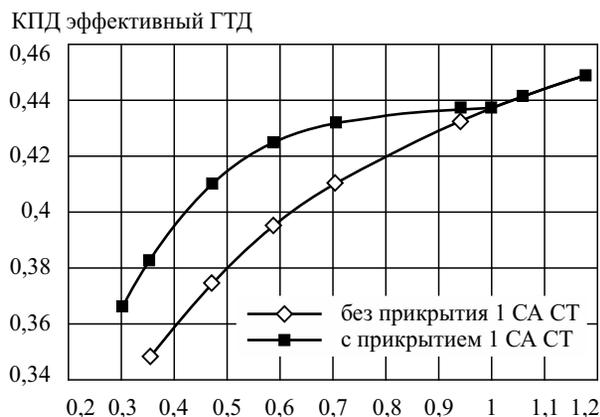
**Fig. 11.** Typical power consumption profile of a displacement ship

Эффективный КПД



**Рис. 12.** Сравнение топливной эффективности газотурбинного двигателя простого и сложного циклов с высокооборотным дизелем

**Fig. 12.** Fuel efficiency: basic- and compound-cycle gas turbine vs a high-speed diesel



**Рис. 13.** Влияние эффективности регулирования пропускной способности турбины на КПД газотурбинного двигателя с промежуточным охлаждением и рекуперацией

**Fig. 13.** Flow rate throttling vs efficiency of a gas turbine with intermediate cooling and recuperation

Этот факт распространяется и на ГТД сложного цикла – как с промежуточным охлаждением, так и с теплоутилизационным контуром, в независимости от типа последнего. Дело в том, что эффективность рекуператора зависит от перепада температур между нагревающим и нагреваемым воздухом, в том числе от температуры газа на выходе из турбины. Эффективность теплоутилизационного контура, независимо от его типа, также зависит от температуры газа за турбиной ГТД.

Обеспечить эффективность двигателя сложного цикла с промежуточным охлаждением и рекуперацией (типа WR21) или ГТД с теплоутилизационным

контуром возможно за счет регулирования пропускной способности турбины винта, что позволит поддерживать относительно высокий уровень температуры газа за турбиной (рис. 13), но существенно усложнит конструкцию турбины и снизит ее эффективность [4].

Таким образом, к явным преимуществам ГТД сложного цикла следует отнести высокую топливную эффективность на номинальном режиме, сопоставимую с эффективностью высокооборотных дизелей, а также высокую маневренность, которая вследствие наличия теплообменных аппаратов несколько уступает ГТД простого цикла, но выше, чем у дизельных двигателей. Наряду с преимуществами нужно отметить ряд недостатков, ограничивающих область применения таких установок:

- снижение эффективности при дросселировании двигателя, свойственное ГТД;
- увеличение габаритных размеров и массы по сравнению с ГТД простого цикла той же мощности;
- усложнение конструкции и, как следствие, увеличение стоимости производства и эксплуатации.

Перечисленные недостатки ни в коей мере не могут быть главным аргументом против исследований в области создания ГТД сложного цикла, но решение об их применении и выборе схемы должно исходить из назначения энергетической установки и модели ее эксплуатации.

Тем не менее, несмотря на необходимость совершенствования ГТД и работ в направлении сложных циклов, на сегодняшний день наиболее перспективным является направление оптимизации конфигурации ЭУ корабля в целом. Такая оп-



**Рис. 14.** Предлагаемая ПАО «ОДК-Сатурн» концепция поэтапного создания морских энергетических установок нового поколения

**Fig. 14.** Suggested step-by-step development concept for marine power plants of a new generation

тимизация должна выполняться с учетом минимизации стоимости жизненного цикла при безусловном обеспечении целевой эффективности корабля с учетом ожидаемых спектров использования мощностей ЭУ.

Учитывая сложность поставленных задач, для обеспечения технологической готовности к разработке и изготовлению морских двигателей и агрегатов нового поколения в долгосрочной перспективе необходимо уже сейчас при непосредственном участии отраслевых институтов и институтов флота приступить к формированию концепции поэтапного создания перспективных корабельных ЭУ, а также перечня необходимых для достижения поставленных целей базовых и критических технологий. Концепция, предлагаемая ПАО «ОДК-Сатурн», представлена на рис. 14.

С учетом объективно малой серийности морских ЭУ при формировании концепции должна максимально использоваться межпроектная унификация, заключающаяся в разработке ЭУ кораблей различных классов на базе ограниченной номенклатуры базовых элементов, таких как ГТД, редуктор, дизель, система автоматического управления и диагностики и т.д. Такой подход позволит повысить качество и надежность создаваемой техники, а также снизить стоимость разработки и технического обслуживания.

## Выводы

### Conclusion

1. Мировой и отечественный опыт создания и эксплуатации морских ГТД в составе главных ЭУ кораблей ВМФ и гражданских морских судов показал преимущества ГТД авиационного типа.
2. Основной проблемой конвертации авиационных ГТД для морского применения является необходимость применения специальных коррозионностойких материалов, свойства которых значительно уступают свойствам авиационных материалов.
3. В среднесрочной перспективе необходимо максимально использовать модернизационный потенциал разработанных ПАО «ОДК-Сатурн» двигателей за счет применения современных методов проектирования, перспективных материалов и технологий.
4. Потенциал улучшения экономичности ГТД приближается к предельным значениям эффективного КПД для простого цикла, и дальнейшее

развитие в данном направлении не приведет к существенному повышению топливной эффективности.

5. Преимущества ГТУ сложного цикла различных схем не очевидны и должны рассматриваться в контексте модели их эксплуатации в составе ЭУ конкретного корабля (судна).
6. Дальнейшее совершенствование целевой эффективности ЭУ должно быть направлено на оптимизацию их конфигурации на основе базовых элементов (ГТД, дизель, редуктор, электрические системы и т.д.) с максимальным использованием межпроектной унификации.
7. Для своевременного обоснования и создания научно-технического задела в области корабельной энергетики необходима опережающая разработка отраслевыми институтами и институтами флота технических требований к морским ЭУ на долгосрочную перспективу.

## Библиографический список

1. *Прасников В.Б.* Первый газотурбинный корабль отечественного ВМФ (Опытный большой торпедный катер пр.183Т) // Судостроение. 2004. № 6. С. 27–31.
2. *Романов В.И.* НПП «Машпроект» 45 лет // Известия Академии инженерных наук Украины. 1999. Вып. 1. С. 10–17.
3. *Барановский В.В.* Обоснование выбора главных энергетических установок на стадии исследовательского проектирования кораблей // Судостроение. 2004. № 3. С. 25–28.
4. *Буров М.Н., Пономарев В.А.* Особенности судового ГТД сложного цикла V-го поколения // Корабельная энергетика из прошлого в будущее. Материалы Всероссийского научно-технического форума. Санкт-Петербург, 2018. С. 29–35.

## References

1. *V. Prasnikov.* First gas turbine-driven ship of the Russian Navy (Project 183T experimental large torpedo boat) // Sudostroyeniye. 2004. No. 6. P. 27–31 (*in Russian*).
2. *V. Romanov.* 45<sup>th</sup> anniversary of Mashproject LLC // Proceedings of the Academy of Engineering Sciences of the Ukraine. 1999. Issue 1. P. 10–17 (*in Ukrainian*).
3. *V. Baranovsky.* Justification of main power plant selection for ships at research design stage // Sudostroyeniye. 2004. No. 3. P. 25–28 (*in Russian*).
4. *M. Burov, V. Ponomarev.* Peculiarities of Gen 5 compound-cycle marine gas turbines // Materials of All-Russian scientific & technical forum Korabelnaya

energetika: iz proshlogo v budushee (Marine Power Engineering: From Past to Future). St. Petersburg, 2018. P. 29–35 (*in Russian*).

Ярославская обл., Рыбинск, пр. Ленина, д. 163. Тел.: +7 (915) 984-66-64. E-mail: Maxim.burov@uec-saturn.ru.

---

### **Сведения об авторе**

*Буров Максим Николаевич*, к.т.н., главный конструктор ПАО «ОДК – Сатурн». Адрес: 152903, Россия,

### **About the author**

*Maxim N. Burov*, Cand. Sci. (Eng.), Chief Designer, UEC-Saturn JSC. Address: 163, Lenina Prospekt, Rybinsk, Yaroslavskaia Region, Russia, post code 152903. Tel.: +7 (915) 984-66-64. E-mail: Maxim.burov@uec-saturn.ru.

Поступила / Received: 22.06.20  
Принята в печать / Accepted: 21.08.20  
© Буров М.Н., 2020