

УДК 621.438

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОНВЕРТИРОВАННЫХ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ МОРСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ИХ РЕШЕНИЕ

М. Н. Буров

maxim.burov@uec-saturn.ru

Публичное акционерное общество «Объединенная двигателестроительная корпорация – Сатурн»
(ПАО «ОДК-Сатурн»)

Поступила в редакцию 23.09.2018

Аннотация. Рассмотрены основные, исторически сложившиеся подходы к созданию морских газотурбинных двигателей и установок. Рассмотрены основные проблемы, которые необходимо решать при конвертации авиационных газотурбинных двигателей для их применения в составе морских энергетических установок. Представлены основные примеры создания морских газотурбинных двигателей и установок на базе авиационных газогенераторов в России и за рубежом. Показана эволюция морских газотурбинных двигателей и установок, разработанных в ПАО «ОДК-Сатурн». Отмечается целесообразность применения адаптированных газогенераторов в наземных энергетических установках для ускорения доводки и повышения надежности.

Ключевые слова: морские газотурбинные установки; морской газотурбинный двигатель, газогенератор, ГТУ-20, М70ФРУ, М75РУ, базовый газогенератор.

ВВЕДЕНИЕ

В начальный период развития морских газотурбинных двигателей (ГТД) были проведены на практике два направления.

Первое основывалось на применении ГТД промышленного типа. Второе направление предполагало использование на судах легких ГТД авиационного типа.

ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ МОРСКИХ ГТД И ГТУ

Типичным представителем морских газотурбинных установок (ГТУ) промышленного типа является установка ГТУ-20, разработанная в 1961 г. на «Кировском заводе» (рис. 1). Установка состоит из двух двигателей ГТД-10, работающих в рекуперативном цикле с промежуточным охлаждением

мощностью 8,68 МВт каждый. Несмотря на умеренные параметры термодинамического цикла (температура газа перед турбиной 1023К, степень повышения полного давления в компрессоре 8,9), двигатель ГТД-10, благодаря использованию промежуточного охлаждения и рекуперации, имел достаточно высокий для своего времени КПД – 27,5%. ГТУ-20 устанавливалась на сухо-грузном судне «Парижская коммуна» (рис. 2). На судах проекта 580 применялась газотурбинная установка со свободно-поршневыми генераторами. По своим весовым показателям ее следует отнести к «тяжелым». Эти двигатели были созданы и установлены на суда в начале 60-х гг. прошлого века. На этом применение судовых ГТУ промышленного типа в СССР закончилось.

Десятилетием раньше в 1953 г. фирмой R&R был создан газотурбинный двигатель промышленного типа сложного цикла RM60

мощностью 5880 кВт (рис. 3), который применялся на канонерской лодке «Grey Goose» [1, 2].

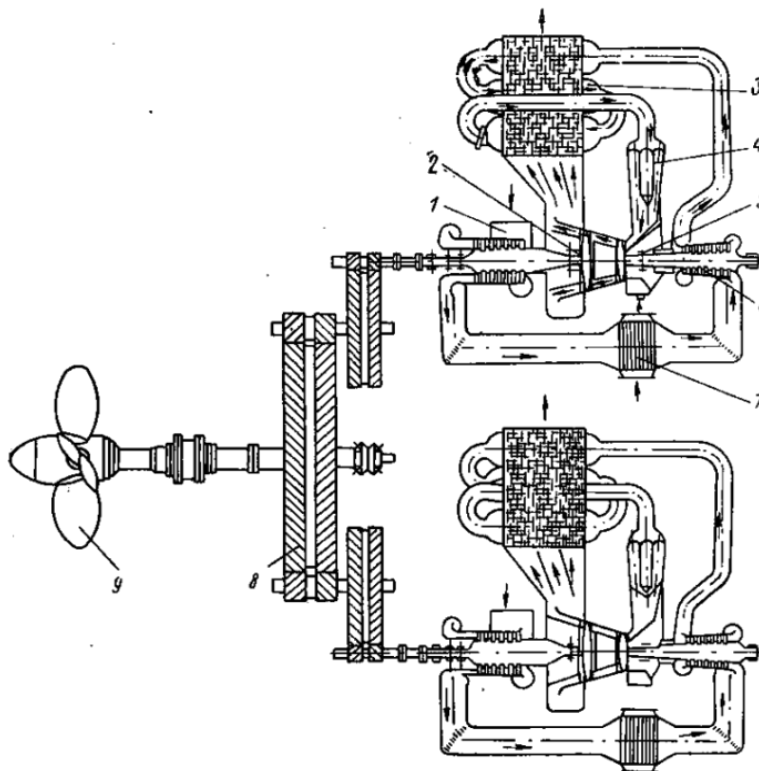


Рис. 1. Схема ГТУ-20



Рис. 2. Сухогруз «Парижская коммуна»

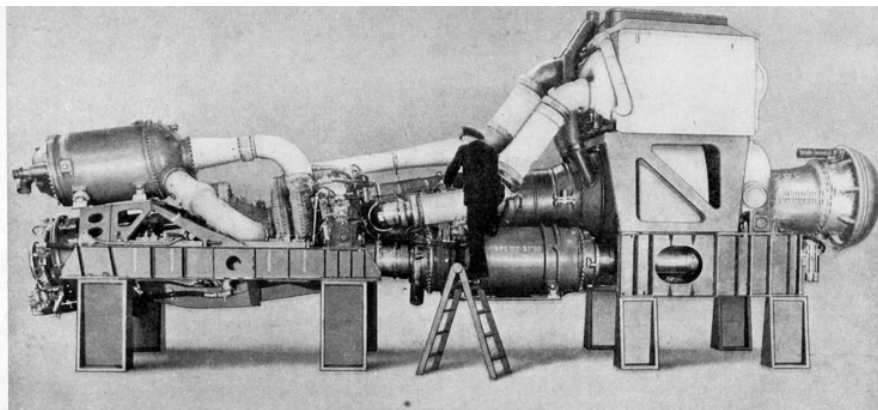


Рис. 3. Двигатель RM60 фирмы R&R

Второе направление предполагало использование на судах легких ГТД авиационного типа или напрямую конвертированного авиационного двигателя. Судовые установки авиационного типа применялись на кораблях с подводными крыльями (КПК) и кораблях на воздушной подушке (КВП), быстроходных транспортных судах. Однако относительно высокий уровень расхода топлива обусловил сохранение ГТУ на небольшом количестве типов скоростных судов-паромов и боевых кораблях различных классов вплоть до авианосцев. Первая морская газотурбинная установка М-1 (рис. 4) была создана в СССР под руководством С. Д. Колосова на базе авиационного турбовинтового двигателя (ТВД) [3].

Мощность установки составляла 2942 кВт, и применялась она на торпедном катере проекта 183ТК.

Сложность процессов конвертации и значительные отличия условий работы ГТД на корабле от самолетных привели разработчиков к выводу, что ГТД, предназначенные для работы в морских условиях, необходимо разрабатывать специально. В итоге была создана специализированная база корабельного газотурбостроения в г. Николаеве. Сейчас можно считать, что эти трудности были исключительно организационного и субъективного характера, так как зарубежные авиадвигательные фирмы успешно проектируют и производят морские версии авиационных ГТД.

Развитие зарубежных корабельных ГТД пошло по пути использования авиационных прототипов и унификации узлов и деталей авиационных и морских ГТД. Такой подход позволяет все основные затраты на научно-технический задел (НТЗ), научно-исследовательские работы (НИР) и опытно-конструкторские работы (ОКР) отнести к авиационному двигателю, серийность которого всегда больше таковой у корабельного ГТД. Остаются затраты на приспособление к применению в морских условиях и на испытания как на стендах, так и в натурных условиях. Однако эти затраты неизбежны и при специальной разработке и производстве корабельного ГТД.

Рассмотрим несколько наиболее характерных примеров конвертации авиационных ГТД для применения в составе корабельных и судовых энергетических установках.

Корабельный ГТД LM2500 был создан в конце 60-х гг. фирмой General Electric на базе двухконтурного турбореактивного двигателя TF39, предназначенного для военно-транспортного самолета С-5А фирмы Lockheed. Основные усилия были направлены на обеспечение высокой экономичности, безотказности и большого ресурса при эксплуатации в морских условиях. В качестве силовой турбины используется шестиступенчатая турбина вентилятора с частотой вращения на максимальном режиме 3600 об/мин.

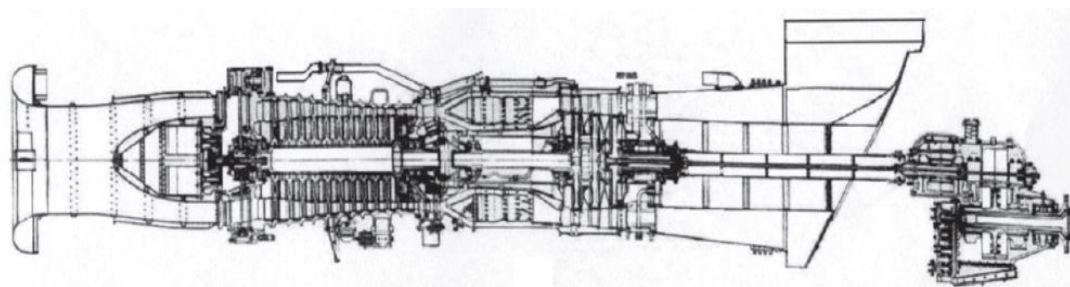


Рис. 4. Газотурбинная установка М-1

Всего на боевых кораблях разных стран, вступивших в строй с 1975 по 2017 гг., было установлено не менее 1057 ГТД LM2500 разных модификаций трех поколений. Из них 668-ю ГТД были оснащены корабли ВМС США. Общий выпуск LM2500 должен быть, естественно, больше, так как срок их службы меньше такового у кораблей.

Корабельный ГТД LM500 был создан в конце 70-х гг. фирмой General Electric на базе двухконтурного турбореактивного двигателя TF34, предназначенного для палубного противолодочного самолета S-3A фирмы Lockheed. Газогенератор выполнен одновальным. Компрессор – 14-ступенчатый. Камера сгорания кольцевая. Турбина двухступенчатая. В качестве силовой турбины используется четырехступенчатая турбина вентилятора с частотой вращения на максимальном режиме 7000 об/мин. Отбор мощности производится со стороны компрессора, для чего вал силовой турбины проходит внутри ротора турбокомпрессора. В состав ГТД входит планетарный редуктор, частота вращения выходного фланца которого может составлять от 1250 до 4000 об/мин по требованию заказчика. Мощности на максимальном и номинальном режимах были соответственно 5500 и 5000 л.с. [4].

Четвертое поколение зарубежных морских ГТД представляет собой усовершенствованные ГТД третьего поколения и вновь конвертированные авиационные турбореактивные двухконтурные двигатели.

Фирма General Electric постоянно совершенствует ГТД LM2500, увеличивая его мощность, снижая удельный расход топлива при увеличении надежности. Вторая модификация LM2500 получена путем внедрения новой конструкции охлаждаемой рабочей лопатки ТВД, заимствованной с ТРДД CF6-50.

Представителем морского ГТД 5-го поколения является ГТД простого цикла MT30 (Marine Trent) фирмы Rolls-Royce. Двигатель MT30 создан на основе ТРДД Trent (Trent 500, Trent 700 и Trent 800) и эксплуатируется с 2008 г.

При создании ГТД сложного цикла с промежуточным охлаждением и регенерацией тепла WR-21 мощностью 25 МВт фирмы Westinghouse и Rolls-Royce также пошли по пути использования компоновки и узлов авиационного ГТД.

Узлы газогенератора WR-21 являются модификацией узлов авиационных двигателей семейства RB211. Компрессор низкого давления (КНД) и компрессор высокого давления (КВД) заимствованы с RB211-535. КНД – компактный, 6-ступенчатый, с неизменяемой геометрией, осевой компрессор со степенью повышения давления 2,9.

В нашей стране с распадом Советского Союза возникла необходимость создания собственной базы морского газотурбостроения. В 1992 г. по решению правительственной комиссии базовым предприятием для разработки корабельных ГТД в РФ было определено ОАО «Рыбинское конструктор-

ское бюро моторостроения» (в настоящее время ОКБ ПАО «ОДК-Сатурн»). Учитывая опыт рыбинских конструкторов в создании уникальных двигателей для военной авиации, за основу для создания морских ГТД был взят газогенератор перспективного авиационного двигателя [5].

Основной сложностью, с которой пришлось столкнуться при конвертации авиационного газогенератора в морской – это требование по обеспечению работоспособности в морской среде. Дело в том, что существующие коррозионностойкие жаропрочные материалы существенно уступают по своим прочностным характеристикам

авиационным. Так, например, при значении параметра Ларсона–Миллера $26 \cdot 10^3$ длительная прочность коррозионностойкого жаропрочного сплава ЧС88У-ВИ более чем на 60% ниже, чем у авиационного сплава ЖС32 (рис. 5) [6].

Это привело к необходимости разработки новой турбины высокого давления с более эффективной системой охлаждения и существенному снижению температуры газа перед турбиной. Кроме того для улучшения топливной эффективности была выполнена оптимизация профилей и проточной части ряда ступеней компрессора (рис. 6).

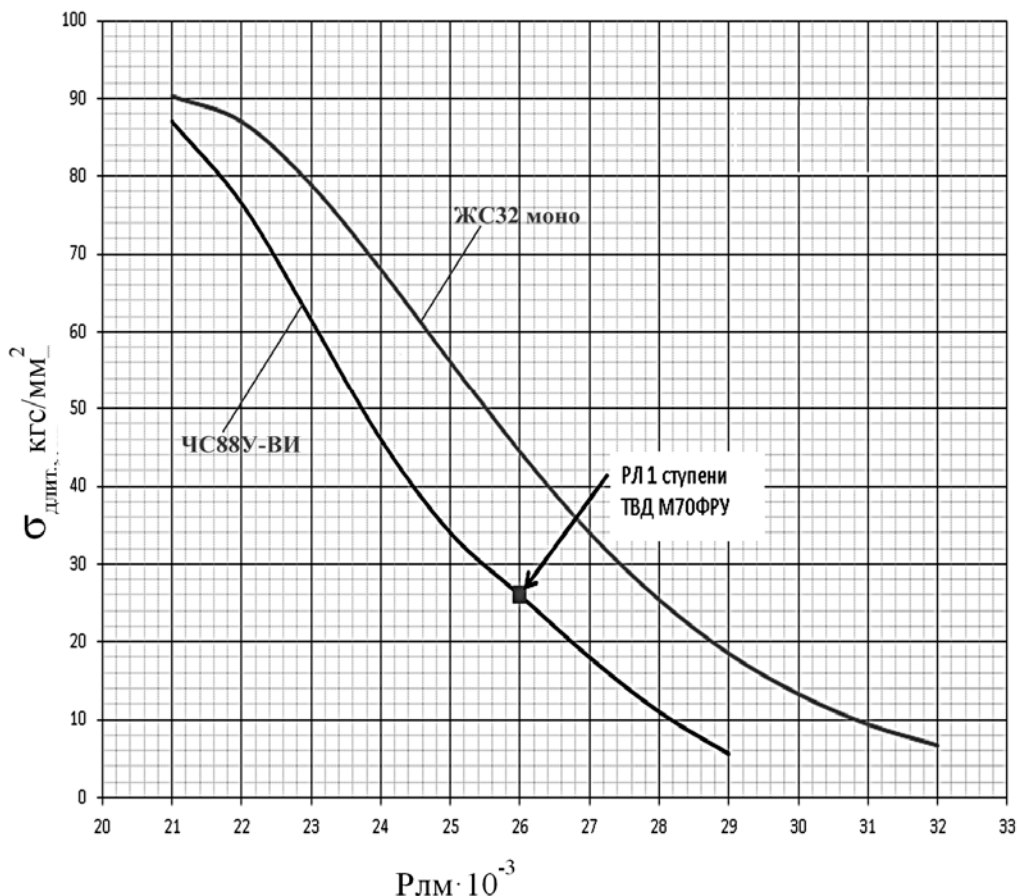


Рис. 5. Кривая Ларсона–Миллера для российских морских и авиационных жаропрочных сплавов

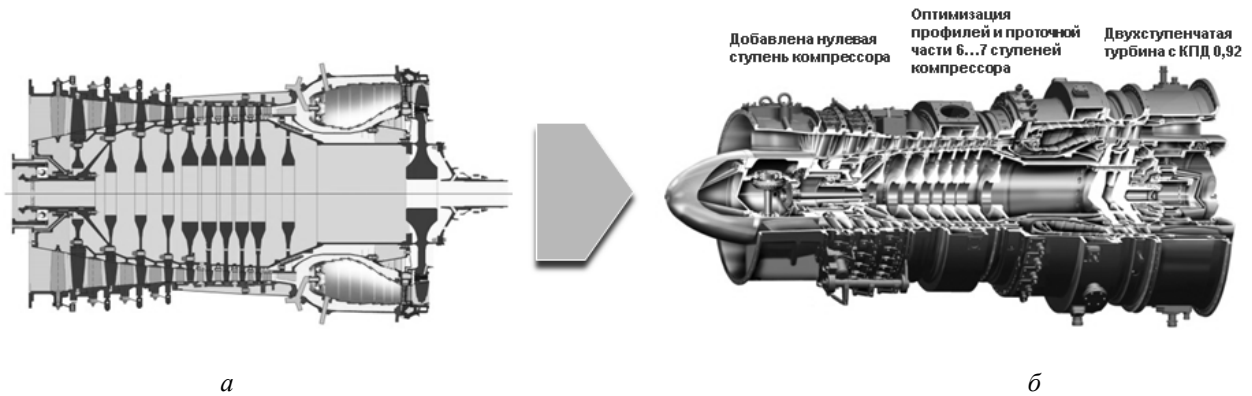


Рис. 6. Газогенератор двигателя: *a* – базовый авиационный газогенератор, *б* – газогенератор, адаптированный для морского и промышленного применения

Первый российский морской двигатель М75РУ мощностью 7000 л.с. прошел государственные сертификационные испытания (ГСИ) в 2006 г. Он предназначен для применения в составе энергетических установок патрульных и ракетных катеров, десантных кораблей (рис. 7).

Следующим двигателем семейства, созданным в ОАО «НПО «Сатурн», стал газотурбинный двигатель М70ФРУ мощностью 14000 л.с. (рис. 8). Для расширения мощност-

ного ряда до 14000 л.с (10МВт) к компрессору была добавлена «нулевая» ступень, что позволило увеличить расход воздуха до 32 кг/с и степень повышения полного давления в компрессоре до 18.

В настоящее время на базе модификации двигателя М70ФРУ созданы газотурбинные агрегаты для кораблей на воздушной подушке типа «Зубр» и «Мурена», где немаловажную роль играет относительно малый вес, присущий морским двигателям авиационного типа.

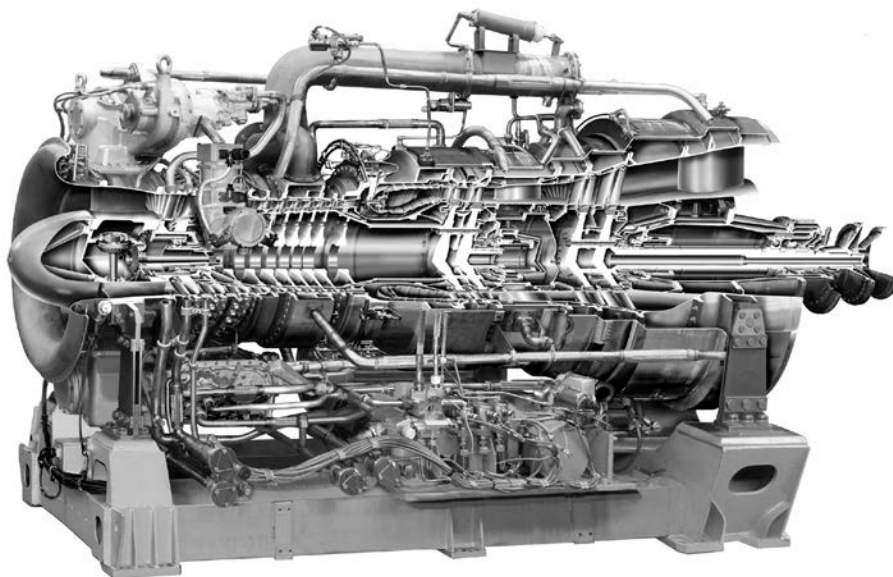


Рис. 7. Морской двигатель М75РУ

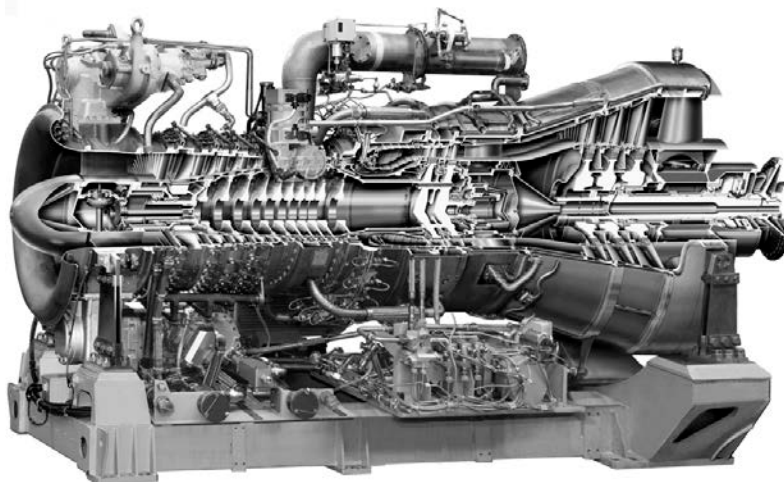


Рис. 8. Морской двигатель М70ФРУ

В период с 2000 по 2008 г. параллельно с морскими ГТД на основе единого газогенератора создавалось семейство промышленных двигателей и агрегатов мощностью от 4 до 10 МВт. Учитывая исторически сложившуюся невысокую потребность в морских ГТД, эксплуатации двигателей более чем на 70%, унифицированных с морскими в составе газоперекачивающих агрегатов, позволила провести опережающую доводку данных двигателей и обеспечить требуемые показатели надежности.

Применение в качестве базы перспективного авиационного газогенератора позволило существенно снизить затраты и сроки на создание НТЗ и проведение ОКР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ отечественного и зарубежного опыта создания морских ГТД и ГТУ показывает безусловное доминирование двигателей легкого типа, конвертированных из авиационных ГТД. При этом ключевой задачей является их адаптация для применения в условиях морской среды, которая решается, в первую очередь, за счет применения коррозионностойких материалов и покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Состояние** и перспективы развития газотурбинных установок иностранных кораблей и судов. Иностранное су-

достроение в 1962–1970 гг. Л.: Судостроение, 1970. 162 с. [*Current state and future development of gas turbine plants of foreign ships and vessels. Foreign shipbuilding in 1962–1970*, (in Russian). Leningrad: Sudostroenie, 1970.]

2. **Газотурбинные** установки зарубежных кораблей. Зарубежное кораблестроение (1975–1985 гг.). Л.: ЦНИИ «Румб», 1986. 152 с. [*Gas turbine plants of foreign ships. Foreign shipbuilding (1975–1985)*, (in Russian). Leningrad: CNII «Rumb», 1986.]

3. **Рыбалко В. В.** Корабельные газотурбинные энергетические установки (Проблемы разработки и эксплуатации). СПб: ВМИИ, 2003. 384 с. [*V. V. Rybalko Marine gas turbine power plants (Development and operation problems)*, (in Russian). Saint Petersburg, VMII, 2003.]

4. **Каталог** газотурбинного оборудования. Рыбинск: Газотурбинные технологии, 2007. 296 с. [*Gas turbine equipment catalogue*, (in Russian). Rybinsk: Gazoturbinnyye Tehnologii, 2007.]

5. **Буров М. Н., Пономарев В. А.** Анализ тенденций развития отечественных морских ГТД // Вестник РГАТУ. 2017. № 4(43). С. 3–11. [*M. N. Burov, V. A. Ponomarev, “Future development analysis for domestically produced marine GTEs”*, (in Russian), *Vestnik RGATU*, no. 4(43), pp. 3-11, 2017.]

6. **Буров М. Н.** Основные проблемы применения конвертированных авиационных ГТД в составе морских энергетических установок и их решение // Авиация и космонавтика – 2017: 16-я международная конференция. Москва: МАИ, 2017. С. 83–85. [*M. N. Burov, “Main problems of converted aircraft GTEs application in marine power plants and their solution”*, (in Russian), in *Aviatsiya i kosmonavtika*, pp. 83-85, 2017.]

ОБ АВТОРЕ

БУРОВ Максим Николаевич, главный конструктор по перспективным разработкам. Дипл. инженер-механик (Рыбинский авиацион. технолог. ин-т, 1994). Канд. техн. наук по тепл. электроракет. двиг-м (РГАТА, 1998). Иссл. в обл. авиационных, морских и промышленных ГТД.

METADATA

Title: Main problems of converted aircraft gtes application in marine power plants and their solution.

Author: M. N. Burov

Affiliation:

Public joint stock company "United engine corporation-Saturn" (PJSC UEC-Saturn)

Email: maxim.burov@uec-saturn.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 4 (82), pp. 62-69, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: This article addresses the main historically developed approaches to marine gas turbine engines and plants creation. It addresses the main problems which shall be solved during aircraft gas-turbine engines conversion for application thereof in marine power plants. Main examples of marine gas turbine engines and plants creation on the base of aircraft core engines in Russia and abroad are presented.

Key words: marine gas turbine plants; marine gas turbine engine.

About author:

BUROV, Maksim Nikolaevich, Chief Designer for Advanced Development. Licensed mechanic engineer (Rybinsk Institute of Aviation Technology, 1994). Candidate of engineering sciences in the field of heat electrojet engines (RSAAT, 1998). Researcher in the field of aircraft, marine and industrial GTEs