

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И МОРСКОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ В МИРЕ

ОБЗОР. ЧАСТЬ 2

Современные и перспективные ГТУ морского назначения

ПАО "НПО "Сатурн":

Александр Вячеславович Логунов, главный специалист, д.т.н.,
Максим Николаевич Буров, главный конструктор по перспективным разработкам, к.т.н.,
Денис Викторович Данилов, ведущий инженер-технолог, к.т.н.

Проведен анализ исследовательских и практических работ в мире, направленных на развитие газотурбинного энергетического машиностроения. Рассмотрены мировые достижения в области создания энергетической газотурбинной техники.

The analysis of the world development and practical activities related to gas-turbine power engineering industry has been performed. The world achievements in the sphere of gas-turbine powerplants are considered.

Ключевые слова: Газотурбинные установки, энергетические ГТУ, парогазовые установки, электростанции, топливная эффективность.

Keywords: Gas-turbine units, Electric power generation gas turbines, Combined-cycle gas turbines, Power stations, Fuel efficiency.

Применительно к использованию в морском судостроении главными преимуществами ГТУ перед широко применяемыми дизельными двигателями являются:

- относительно небольшие размеры и масса,
- более высокая выходная мощность,
- относительно невысокие эксплуатационные расходы,
- пониженный уровень шума и вибраций.

Однако высокий расход топлива и стоимость деталей и компонентов турбины до сих пор ограничивают использование ГТУ круизными лайнерами (где требуется высокий уровень комфорта), а также военно-морской техникой для обеспечения скорости и маневренности.

Анализ доступных информационных данных позволил установить, что практически единственной японской национальной программой, направленной на разработку ГТУ для гражданского и, в первую очередь, прибрежного применения, является проект по созданию так называемой морской суперэкологичной турбины [1, 2]. Эта турбина нового поколения предназначена для оснащения гражданских судов ближнего плавания, для которых в 1997 г. Международной морской организацией (IMO - International Maritime Organization) конвенцией MARPOL были введены серьезные ограничения по выбросам в атмосферу.

Национальным проектом занимаются все японские фирмы, имеющие отношение к турбостроению: Kawasaki Heavy Ind., Ishikawajima-Harima Heavy Ind., Daihatsu Diesel Mfg. Co., на базе которых образовано технологическое научно-исследовательское объединение по разработке морской супер-турбины (Technological Research Association of Super Marine Gas Turbine). Проект осуществляется с конца 90-х и по настоящее время.

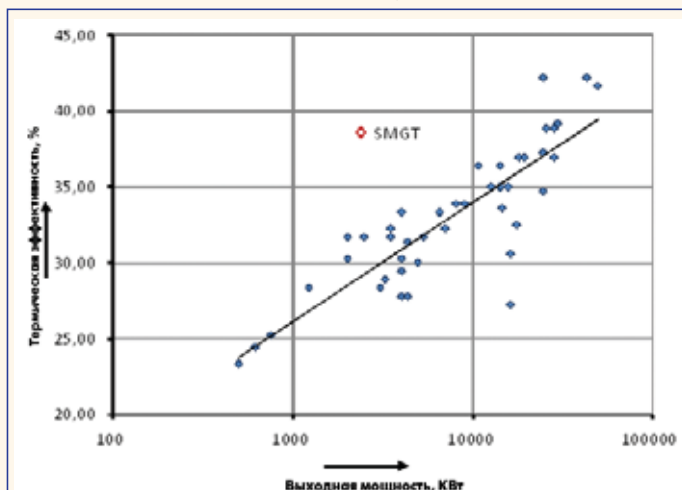


Рис. 1 Сравнительная тепловая эффективность ГТУ морского назначения. SMGT - перспективная японская супер-турбина

Конкретными задачами японского проекта на этапе 2001-2005 гг. являлось создание работающей на судовом дизельном топливе турбины с:

- термической эффективностью не менее 38 %,
- эмиссией NOx ниже 1 г/кВт (1/10 от эмиссии дизельных двигателей морского применения),
- пониженным на 30 % расходом топлива по сравнению с имеющимися промышленными турбинами этого класса мощности (рисунки 1, 2).

Из проведенных ранее исследований известно, что достичь термической эффективности турбины 38% и более на простом цикле даже при $T_{вх}$ порядка 1200°C невозможно. Поэтому в супер-турбине японского проекта использован регенеративный цикл с рекуператором в выходном канале и 2-вальная газовая турбина, состоящая из газогенераторной системы и силовой турбины. Сопловые и рабочие лопатки 1-й ступени 2-ступенчатой турбины газогенератора, работающие при $T_{вх}=1200^\circ\text{C}$ (что на 50°C выше, чем у существовавших в середине прошлого десятилетия промышленных ГТУ того же класса мощности), изготовлены из жаропрочных никелевых сплавов и имеют внутреннее охлаждение (рисунок 3).

Фирма General Electric (GE) на базе своих авиационных ГТД разрабатывает и поставляет на мировой рынок применяемые, в первую очередь, в морском судостроении ГТД серии LM мощностью 13...47 МВт [3].

Двигатели LM1600, LM2G0G, LM2500, LM2500+ и LM6000 работают на газовом или дизельном топливе и имеют выходную мощность при частоте 50-60 Гц: 13,75; 18-22; 30-31; и 40,8-43 МВт соответственно, а термическую эффективность до 41 %.

Двигатели состоят из газогенератора и силовой турбины с различным числом ступеней высокого и низкого давления (от 1 у LM1600

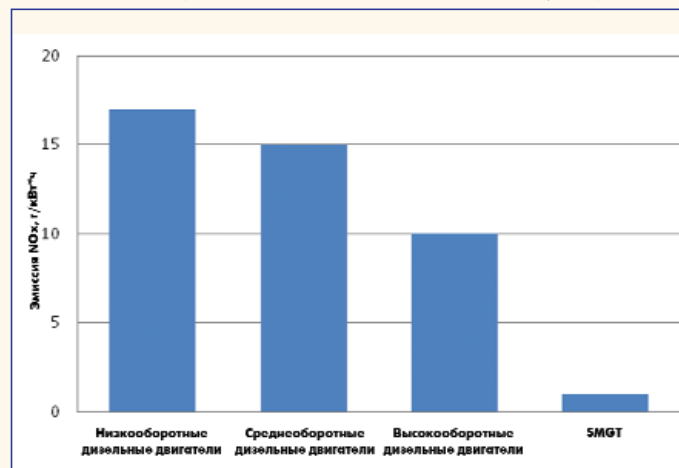


Рис. 2 - Сравнительные данные по эмиссии NOx низко-, средне-, высокооборотных дизельных судовых двигателей и супер-экологичной турбины японского проекта

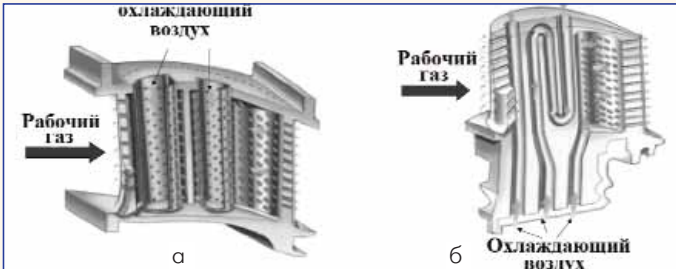


Рис. 3 Конструкция охлаждаемых (с выходом на пленку) сопловых (а) и рабочих (б) лопаток 1-ступени газогенератора в соответствии с проектом морской "супер-турбины" (Япония)

до 6 у LM2500+ и до 14 у LM6000). Усовершенствованные модификации газогенератора, например, в составе LM2500+, создают степень сжатия 22:1. С 1998 г. ГТУ LM2500+ применяется для оснащения коммерческих морских судов. В этих ГТУ используют защитные покрытия сопловых и рабочих лопаток 1-ой ступени турбины высокого давления. На рис. 4 показана газотурбинная установка компании GE Marine LM 2500 мощностью 35,3 МВт. Установка предназначена для новых боевых прибрежных кораблей типа Jackson (LCS-6). Компания должна поставить 20 ГТУ LM 2500 для обеспечения строительства 10 кораблей в течение 5 лет. В настоящее время GE разрабатывает аналогичные установки мощностью 47 МВт.

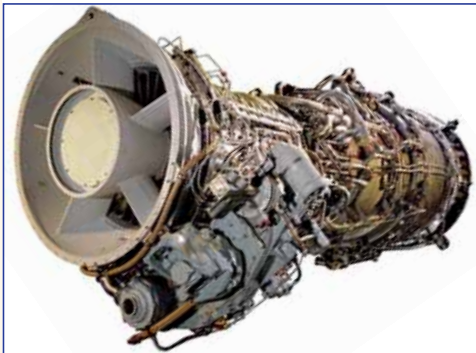


Рис. 4 Газотурбинная установка General Electric LM 2500

ет ряд усовершенствований в системе привода, обеспечивающих прямое соединение вала низкого давления с нагрузкой. Рабочие лопатки турбины LM6000 и её усовершенствованного варианта LM6000 PC/PD- охлаждаемые.

В настоящее время GE на двигателях LM6000 отработывает концепцию LM6000 Sprint (Sprey Inter-cooled Turbine), предусматривающую инжекцию атомизированной воды как в турбину низкого давления, так и в турбину высокого давления, и LM6000 STIG (Steam Injected Gas Turbine), базирующуюся на повышении эффективности цикла за счет инжекции больших объемов пара.

Первые две ГТУ LM6000 Sprint начали эксплуатироваться в 1998 г, за 1,5 года их наработка составила 20 тыс. час. На графике (рис. 6) представлены данные по повышению выходной мощности за счет реализации концепции Sprint. Концепция STIG по предварительным данным позволяет повысить эффективность ГТУ на 2-4 % в зависимости от типа.

Фирма Rolls-Royce (RR) поставляет на гражданский и военный рынок морского судостроения высокоэффективные газовые турбины MT7 (4,5 МВт), WR-21 (25 МВт), Sprey (19,5 МВт), а также генераторы AG9140 (ВСУ авиационного назначения) и RR4500 (4,5 МВт).

WR-21 представляет собой ГТД с рекуператором и промежуточным охлаждением совместной разработки США, Великобритании и Франции (основной разработчик RR), осуществленной в период 1990...2000 гг. для использования в перспективном военном судостроении. Затраты на разработку составили около \$1,2 млрд. По сравнению с LM2500 (ГТ простого цикла) WR-21 имеет на 25...30% более низкий расход топлива, но при заметном возрастании стоимости. Улучшенная топливная экономичность позволила снизить затраты на топливо и функционирование эсминцев класса DD-21 на \$1,5 млн./год, а также обеспечила воз-

В таблице 1. представлены некоторые сведения, имеющиеся по этим ГТУ на период 2000г.

Двигатель LM6000 сдан в коммерческую эксплуатацию в 1998 г. (рис. 5). По сравнению с базовым авиационным двигателем CF6-80C2 он имеет

Таблица 1
Наработка базовых ГТД и ГТУ фирмы GE на 2000 г

Марка ГТУ	Марка базового ГТД	Авиационные ГТД		Промышленные ГТУ	
		Количество	Наработка, млн. час	Количество	Наработка, млн. час
LM1600	F404	3400	7	146	3,5
LM2500	TF39/ CF-6-6	1130	32,3	1787	31,2
LM6000	CF6-80C2	2806	58,7	300	3,2

можность повышения вооружённости эсминцев, их скорости, увеличение времени стоянок, дальности и т.п. В 2000 г. ВМС Великобритании выбрало WR-21 для оснащения своего 7500-тонного эсминца серии 45 (типа DDG-1000 с ГТД LM2500) в составе интегрированной системы с электрическим приводом [4].

Одной из первых разработок фирмы RR после длительного отсутствия на рынке морских газовых турбин является двигатель MT30, развивающий мощность 36 МВт при температуре окружающей среды до 38°C и до 40 МВт при 15°C, предназначенный как для оснащения коммерческих круизных лайнеров, так и военной техники, в первую очередь, сторожевых кораблей, авианосцев и эскадренных миноносцев.

MT30 является морским вариантом авиационного ГТД Trent 800 и соответствует ему практически на 80% (топливо - природный газ с инжекцией воды 25 част/млн.)

В турбине MT30 используются аналогичные охлаждаемые рабо-

чие лопатки; рабочие и статорные лопатки имеют 3х-мерный профиль. При адаптации к условиям морского применения число компонентов никелевого жаропрочного сплава было снижено на 60%. Газовая турбина имеет модульную конструкцию массой 77 т и длиной 4,5 м. Общая длина генератора составляет 8,6 м. Сравнительно небольшая масса MT30 обеспечивает высокое отношение мощность/масса, а компактность и модульная конструкция создают условия для достаточно легкой интеграции двигателя в новые проекты.

В Великобритании новые двигатели RR использованы в программах разработки перспективных авианосцев, способных нести от 34-х до 40 самолетов STOVL, из которых два (Queen Elizabeth и Princeof Wales), общей стоимостью \$3,9 млрд. поступят на вооружение королевских ВМС в 2014 - 2016 гг.

Следует отметить, что на протяжении нескольких десятилетий корабли ВМС США (NAVY) оснащались исключительно двигателями LM2500 фирмы GE и MT7RR [5].

Во второй половине прошлого десятилетия NAVY осуществило несколько программ, обеспечивших применение MT30 в перспектив-



Рис. 5 ГТД LM 6000 фирмы GE

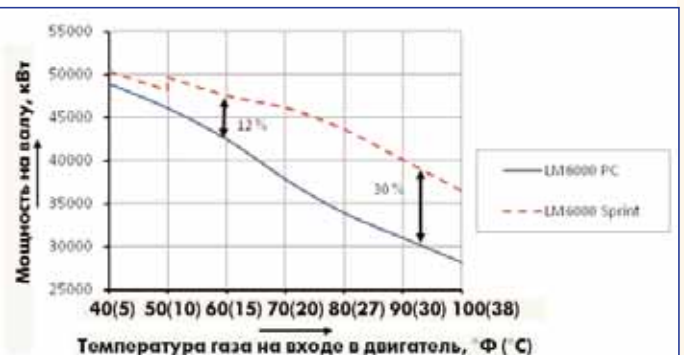


Рис. 6 Повышение рабочих параметров ГТУ LM6000 фирмы GE за счет реализации концепции Sprint (инжекция атомизированной воды)



Рис. 7 - Буксировка эскадренного миноносца Zumwalt по реке Кеннебек после спуска на воду на верфи Bath Iron Works

ных разработках, а также, вероятно, замену существенной части силовых установок уже функционирующей техники на более мощный и экономичный MT30.

Например, двигатель MT30 использован NAVY для оснащения кораблей класса Freedom, разработанных по программе Littoral Combat Ship (LCS) - боевых береговых кораблей, предназначенных для выполнения широкого круга задач, в т.ч. минирования, противолодочных и защитных функций. Первый из кораблей этого класса принят в 2006 г., планируется построить ещё 56. Использование нового двигателя обеспечило повышение их скорости, оперативной гибкости и манёвренности.

MT30 также использован для оснащения перспективных эскадренных миноносцев класса "Замволт" (Zumwalt) (рис. 7), разрабатываемых NAVY по контрактам с Northrop Grumman и рядом других фирм оборонного значения. На корабле установлены две энергетические установки на базе MT30, которые обеспечивают электроэнергией все системы судна, включая электропривод гребных винтов. Боевые единицы этой серии поступят на вооружение в 2016 - 2018 гг. Стоимость каждого эсминца в 2008 г. оценивалась в \$1,4 млрд. Однако, предполагалось, что она может возрасти до \$3,2 млрд.; затраты на эксплуатацию в течение жизненного цикла эсминца этого класса оцениваются в \$4,0 млрд.

В перспективе RR планирует поставлять на мировой рынок также газовые турбины мощностью 55 и 60 МВт морского и промышленного назначения [6].

Следует добавить, что с начала 2000 гг. ВМС США с целью снижения потребления нефти активно разрабатывают новые концепции комбинированного силового оснащения своей техники, а именно: использование турбинных установок с электрическим приводом и топливных элементов. Кроме того, рассматривается возможность применения альтернативных видов топлив.

Интегрированная газовая турбина с электрическим приводом, в зависимости от типа судна и его профиля обеспечивает 10-25%-ное снижение расхода топлива. Турбину такого типа, разработанную на базе коммерческой силовой установки для круизных лайнеров, имеет грузовой военный транспорт NAVY серии TAKE-1. Применение ГТ с электрическим приводом и усовершенствованным индукционным двигателем планировалось на последней серии эсминцев DDG-1000, а также при дополнительном усовершенствовании электрической системы на подводных лодках.

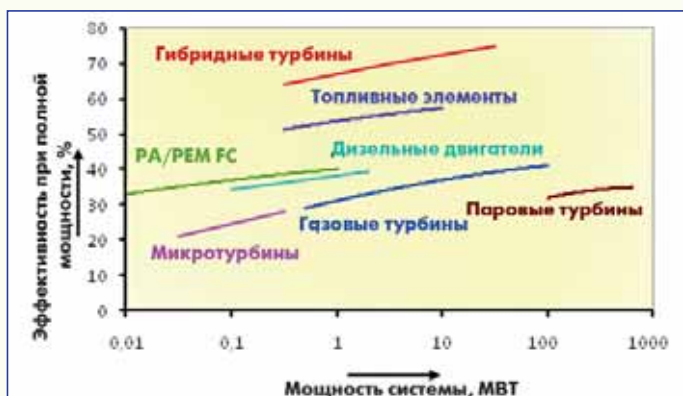


Рис. 8 - Сравнительная топливная эффективность электрических силовых установок

Поскольку военные корабли обычно редко развивают максимальную скорость, судовые силовые установки в большинстве случаев работают с неполной загрузкой и низкой эффективностью (16...18%).

Системы, базирующиеся на технологии топливных элементов (Fuel Cell-FA), разрабатываемые ONR (Office of Naval Research - департамент исследований ВМС США), имеют топливную эффективность от 37 до 52 % [4, 7].

Топливная эффективность гибридной системы топливный элемент-комбинированная турбина достигает по представленным NAVY данным почти 80% (рис. 8).

Кроме того, использование технологии топливных элементов в гибридных системах обеспечивает снижение эксплуатационных расходов, уменьшение ИК и звуковых сигнатур, радарных проекций, т.е. снижение заметности практически по всем параметрам. Известно, что технология топливных элементов используется на немецкой подводной лодке серии 212. Кроме того в Европе эта технология намерена для гражданского применения.

Выводы:

1. В настоящее время в мире прослеживается четкая тенденция по переходу энергетики на природный газ как основной вид топлива и газотурбинные установки в качестве ведущих силовых агрегатов для привода электрогенераторов.

2. Развитыми странами мира выделяется существенное финансирование на работы по повышению эффективности и топливной экономичности газотурбинных установок. Уже эксплуатируются большие ГТУ мощностью свыше 400 МВт. Температура рабочих газов современных ГТУ на входе в турбину перешла за отметку 1500°C, что на 150-200°C выше, чем на установках предыдущего поколения.

3. Возросшие требования к современным газотурбинным установкам указывают на экономическую оправданность использования авиа-космических технологий и материалов для проектирования и постройки современных ГТУ, в том числе монокристаллических жаропрочных сплавов, легированных рением. Поэтому ведущими фирмами мира ведутся активные работы по созданию специальных высокохромистых монокристаллических сплавов, легированных рением.

4. Нынешний период характеризуется активными работами по созданию ГТУ, представляющих собой компактные и одновременно мощные силовые установки для морской техники гражданского и военного назначения. Новым поколением "морских" ГТУ будут оснащены перспективные авианосцы, эсминцы, сторожевые корабли. ■

Литература

1. Sugimoto, T. R&D Plan for the Next-Generation Marine Gas Turbine (Super Marine Gas Turbine) [Text] / T. Sugimoto, et.al. // - Tokyo: - 1999, - P. 1000.
2. Arai, M. Research and Development of Gas Turbine for Next-Generation Marine Propulsion System (Super Marine Gas Turbine) [Text] / M. Arai, T. Sugimoto, K. Imai et.al. // Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2003, Tokyo, 2-7 November 2003. - P. 7.
3. Badeer, G.H. GE Aeroderivative Gas Turbines - Design and Operating Features [Text] / G.H. Badeer // GE Power Systems, - 2000, - P. 20.
4. O'Rourke, R. Navi Ship Propulsion Technologies: Options for Reducing Oil Use - Background for Congress [Text] / R. O'Rourke // CRS Report for Congress, Order Code RL 33360. - 2006. - P. 35.
5. Thisdell, D. Rolls-Royce Osprey engines to go directly to hovercraft application [Text] / D. Thisdell // Flight International, - 2012, - № 10, - P. 37-41.
6. Rolls-Royce The MT30 Marine Gas Turbine. Powering the world's future fleets [Text] / Rolls-Royce // Rolls-Royce Power Engineering plc, - 2014, - P. 10.
7. Nickens, A. Hybrids on the High Seas: Fuel Sells for Future Ships [Text] / A. Nickens // Navi Newsstand, - 2004, - № 8, - P. 52-57.

Связь с авторами: danilov_d.v@rambler.ru