

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-244-256

PROSPECTS FOR THE USE OF GAS TURBINE ENGINES IN MARINE POWER PLANTS

O. K. Bezjukov, V. A. Zhukov, M. S. Kapustyansky

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The information about the appearance of steam and gas turbine engines in the fleet, the current state and prospects of their use is presented in the paper. The information about the technical characteristics of marine gas turbine engines is given, the directions of their improvement are determined in order to expand their use in civil shipbuilding. It is shown that the basis for the creation of marine gas turbine engines are industrial and aviation gas turbine engines. For their successful conversion into shipboard systems, it is necessary to choose a design scheme depending on the purpose and displacement of the vessel, upgrade the systems in accordance with the requirements of the operating conditions, and ensure a rational choice of structural materials. The most important tasks in the creation of marine gas turbine installations are to ensure the deep utilization of secondary energy resources by optimizing the parameters of the working process and the design of heat exchange equipment, as well as to ensure the possibility of using the traditional and alternative fuels, including gas. The choice of a heat recovery scheme and the development of a fuel treatment system are complex tasks, when solving which it is necessary to take into account many factors, namely, the purpose of the vessel, the need for heat for their own needs, the availability of free space, the operating modes of the power plant, the limits of the complexity of the working cycle. Promising areas for the use of gas turbine engines in the fleet are the creation of hybrid power plants based on them, including for the vessels with electric propulsion, as well as environmentally safe installations with closed cycles, including for facilities operating in the coastal shelf. The solution of complex scientific and technical problems associated with the expansion of using the gas turbine engines at civil marine facilities requires comprehensive research, including energy and exergetic assessment of the installations efficiency, numerical modeling of the processes, conducting field experiments and experimental design work.

Keywords: marine power plants, gas turbine engines, design schemes, secondary energy resources, energy efficiency, complex research

For citation:

Bezjukov, Oleg K., Vladimir A. Zhukov, and Mikhail S. Kapustyansky. "Prospects for the use of gas turbine engines in marine power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 244–256. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-244-256.

УДК 621.438

ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ НА ФЛОТЕ: ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. С. Капустянский

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург,
Российская Федерация

В статье приведена информация о появлении на флоте паро- и газотурбинных двигателей, их современном состоянии и перспективах использования, а также определены направления их совершенствования с целью расширения применения в гражданском судостроении. Показано, что базой для создания судовых газотурбинных двигателей являются промышленные и авиационные газотурбинные двигатели, для успешной конвертации которых в судовые необходимо в зависимости от назначения и водоизмещения судна выбрать конструктивную схему, модернизировать системы в соответствии с требованиями эксплу-

атационных условий, а также обеспечить рациональный выбор конструкционных материалов. Отмечается, что важнейшими задачами при создании судовых газотурбинных установок является обеспечение глубокой утилизации вторичных энергетических ресурсов за счет оптимизации параметров рабочего процесса и конструкции теплообменного оборудования, а также возможности использования традиционных и альтернативных видов топлива, включая газовые. Подчеркивается, что выбор схемы утилизации теплоты и разработка системы топливоподготовки являются комплексными задачами, в процессе решения которых необходимо учитывать множество факторов, а именно: назначение судна, потребность в тепле для собственных нужд, наличие свободного пространства, режимы работы энергоустановки и пределы усложнения рабочего цикла. Рассмотрены перспективные направления использования газотурбинных двигателей на флоте, такие как гибридные энергетические установки, в том числе для судов с электродвижением, работающих в прибрежном шельфе. Сделан вывод о том, что решение сложных научно-технических задач, связанных с расширением сферы использования газотурбинных двигателей на объектах гражданской морской техники, требует комплексных исследований, включающих энергетическую и эксергетическую оценку эффективности установок, численное моделирование процессов, проведение натурных экспериментов и опытно-конструкторских работ.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, газотурбинные двигатели, конструктивные схемы, вторичные энергетические ресурсы, энергоэффективность, комплексные исследования

Для цитирования:

Безюков О. К. Газотурбинные двигатели на флоте: история и перспективы / О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. С. Капустянский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 244–256. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-244-256.

Введение (Introduction)

Оценку перспектив использования газотурбинных двигателей (ГТД) в составе судовых энергетических установок (СЭУ) целесообразно начать с ретроспективы применения турбомашин на флоте. В 1897 г. катер *Turbinia* водоизмещением 44,5 т, оснащенный паротурбинной установкой мощностью 1545 кВт (2100 л. с.), разработанной Ч. Парсонсом, развив скорость 34,5 уз, наглядно продемонстрировал преимущество перед кораблями, оснащенными поршневыми паровыми двигателями, самый мощный из которых имел скорость 24 уз. Таким образом, паротурбинные двигатели (ПТД) зарекомендовали себя как наиболее предпочтительный тип энергоустановок для кораблей и судов, от которых требуется высокая скорость. В 1898 г. на английских верфях началось строительство турбинных миноносцев *Viper* и *Sobra*, оснащенных турбинами Ч. Парсонса. В 1906 г. был спущен на воду линейный крейсер *Drednought* водоизмещением 16 тыс. т. Паротурбинная установка Ч. Парсонса обеспечивала крейсеру скорость, равную 21 уз.

Паровые турбомшины устанавливались также на гражданских судах. Так, одним из трех главных двигателей океанского лайнера *Titanic* являлась паровая турбина мощностью 11777 кВт (16 000 л. с.). Ротор турбины диаметром 3,7 м и массой около 131 т вращался с частотой 165–190 мин⁻¹. В настоящее время ПТД не утратили своей актуальности — ряд современных судов (рис. 1 и 2) оснащен паротурбинными силовыми установками. К паротурбинным СЭУ относятся также ядерные энергетические установки ледоколов. В настоящее время в состав действующего флота входят атомоходы «Россия», «Советский Союз», «Ямал», «50 лет Победы», «Таймыр» и «Вайгач», плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов», атомный лихтеровоз-контейнеровоз «Севморпуть». Перспективными разработками являются ледоколы пр. 22220 (рис. 3) и 210510 (рис. 4).

ГТД быстрого (взрывного) сгорания в закрытой камере постоянного объема был разработан в 1906–1908 гг. российским инженером В. В. Каровидиным. ГТД Каровидина при частоте вращения турбины 10 000 мин⁻¹ развивал мощность 1,2 кВт (1,6 л. с.). В 1913 г. М. Н. Никольским был спроектирован газотурбинный двигатель с трехступенчатой газовой турбиной мощностью 120 кВт (160 л. с.). Дальнейшие усовершенствования в конструкцию газотурбинных двигателей внесли В. И. Базаров, В. В. Уваров и Н. Р. Брилинг. В 30–40-е гг. XX в. работы по созданию и совершенствованию корабельных ГТД велись под руководством Г. И. Зотикова на Ленинградском металлическом заводе, однако в начале Великой Отечественной войны они были прекращены [1]. Возобновление

работ по созданию корабельных ГТД относится к 50-м гг. XX в. В качестве основы для разработки корабельного ГТД рассматривались два варианта [2]:

- стационарные (промышленные) ГТД сложного цикла с регенерацией теплоты отработавших газов и умеренной температурой газа перед турбиной;
- авиационные ГТД простого цикла с более высокими параметрами рабочего тела.



Рис. 1. Танкер Knock Nevis дедвейтом 564763 т с паротурбинной энергетической установкой мощностью 37300 кВт (<https://im0-tub-ru.yandex.net/i?id=7f3edc6a20bbaa47788c6250eb9a5d9e&ref=rим&n=33&w=117&h=150>)



Рис. 2. Танкер-газовоз «Гранд Анива» дедвейтом 74000 т и паротурбинной установкой мощностью 29000 л. с. (https://www.turbinst.ru/uploads/posts/2017-05/thumbs/1493799323_tanker-gazovoz-grand-aniva-dlya-perevozki-spg-1.jpg)



Рис. 3. Универсальный атомный ледокол пр. 22220 «Арктика»
(<https://mtdata.ru/u10/photo80B6/20600927129-0/original.jpg>)

ПТД относятся к двигателям с внешним подводом теплоты, на смену которым пришли двигатели внутреннего сгорания — газотурбинные двигатели (ГТД), превосходящие ПТД по массогабаритным и экономическим показателям. Важнейшую роль в создании ГТД сыграли российские ученые и инженеры. Так, в 1892 г. П. Д. Кузьминский сконструировал первый в мире ГТД с газовой реверсивной турбиной радиального типа. Процесс сгорания в двигателе Кузьминского протекал при постоянном давлении в открытой камере и получил название «медленное сгорание».



Рис. 4. Перспективный атомный ледокол пр. 210510 «Лидер»
с ядерной паротурбинной установкой мощностью 120 МВт
(<https://im0-tub-ru.yandex.net/i?id=cac0601f49bcfbfd7105c0074a98fb2e2-l&n=13>)

Первая корабельная ГТУ мощностью около 3 МВт была создана под руководством С. Д. Колосова на базе авиационного турбовинтового двигателя. Различия в условиях эксплуатации авиационных и корабельных ГТУ и связанные с этим проблемы адаптации авиационных ГТД на флоте привели С. Д. Колосова к выводу о необходимости специальной разработки морских ГТД. Однако

последующий отечественный и зарубежный опыт создания кораблей с газотурбинными установками показал, что конвертация авиационных ГТД путем необходимых доработок является наиболее рациональным способом проектирования корабельных ГТД [3].

В настоящее время ГТД находят широкое применение на боевых надводных кораблях различных классов и различного водоизмещения в Военно-морском флоте. Газотурбинными и дизель-газотурбинными энергетическими установками оснащены корабли водоизмещением до 10 000 т и более. По количественному составу энергоустановки с ГТД составляют в ВМФ РФ 61 %, в зарубежном ВМФ — 70 %. Перед отечественными предприятиями поставлена задача создания корабельного ГТД пятого поколения [4], [5].

Оценка возможностей и перспектив использования ГТД в гражданском судостроении является актуальной, учитывая, что требования, предъявляемые к энергетическим установкам гражданских судов, существенно отличаются от требований, предъявляемых к корабельным ГТУ. При проведении анализа перспектив использования ГТД на судах необходимо принимать во внимание следующие факторы:

- опыт использования ГТД на морском и речном флоте;
- программу развития гражданского судостроения в Российской Федерации;
- возможности повышения энергоэффективности судовых ГТУ и обеспечения их соответствия экологическим требованиям;
- технологические возможности отечественных машиностроительных предприятий.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Опыт строительства и эксплуатации гражданских судов с ГТД имеется как в нашей стране, так и за рубежом. Судно на подводных крыльях пр. 1708 типа «Буревестник», построенное в 1964 г. на судостроительном заводе «Красное Сормово», было оснащено конвертированными авиационными двигателями типа АИ-20 (2 × 3660 л. с.), вмещало 150 пассажиров и имело дальность плавания около 500 км.

В серии теплоходов типа «Капитан Смирнов» пр. № 1609 в качестве главных использована газопаровая установка, состоящая из двух газотурбинных двигателей М-25 мощностью по 25000 л. с. и двух утилизационных паровых турбин. В работе [6] приведены данные об отечественных и зарубежных грузовых судах с газотурбинными энергетическими установками. Данные о судах приведены в табл. 1, технические характеристики энергетических установок судов — в табл. 2. На основании данных, приведенных в этих таблицах, можно сделать вывод о том, что газотурбинные двигатели первого поколения, использовавшиеся (1965–1980 гг.) в гражданском судостроении, имели мощность 8,7–27,5 МВт, применяемые на крупнотоннажных судах различного назначения водоизмещением более 15 тыс. т, использовали жидкие сорта топлива нефтяного происхождения. Основным недостатком ГТД являлся более высокий по сравнению с дизелями расход топлива.

Таблица 1

Грузовые суда, оснащенные ГТД

Название судна	Парижская коммуна	Капитан Смирнов	Айрон монарх	Лусайн	Сивен принс	Адмирал Каллэгэн	Финджет	Евролайнер	Шеврон орегон
Тип судна	Сухогруз	Ролкер	Ролкер	Метановоз	Паром	Ролкер	Паром	Контейнеровоз	Танкер
Год введения в эксплуатацию	1968	1978	1973	1974	1975	1967	1977	1971	1975
Изготовитель	СССР	СССР	Австралия	Норвегия	Австралия	ФРГ	Финляндия	ФРГ	США
Дедвейт, т	16 185	36 000	15 450	20 900	5 550	24 000	23 000	23 100	35 560
Эксплуатационная скорость, уз	18,2	25	20	19,7	18	26	30,5	26	15

Таблица 2

Характеристики судовых ГТУ

Название судна	Парижская коммуна	Капитан Смирнов	Айрон монарх	Лусайн	Сивен принс	Адмирал Каллэгэн	Финджет	Евролайнер	Шеврон орегон
Тип установки	Промышленная	Комбинированная	Промышленная	Промышленная	Промышленная	Авиационная	Авиационная	Авиационная	Промышленная
Цикл работы установки	Регенеративный+охлаждение	Простой	Регенеративный	Регенеративный	Регенеративный	Простой	Простой	Простой	Регенеративный
Тип передачи	Механическая	Механическая	Механическая	Механическая	Электрическая	Механическая	Механическая	Механическая	Электрическая
Частота вращения гребного винта, мин ⁻¹	103	130	125	125	200	145–135	135	170	100
Мощность ГТД, кВт:	8700	2 x 17300	12850	14700	8900	2 x 15300	2 x 20000	2 x 27500	9200
Вид топлива	Дизельное тяжелое	Дизельное	Тяжелое	Дизельное	Дизельное	Дизельное	Дизельное	Дизельное	Дизельное
Удельный расход топлива г/(кВт·ч)	320–324	238	272	–	–	293–312	272	–	269

Потребности гражданского флота РФ составляют [7]: плавучие буровые установки и платформы — 30 ед., суда обеспечения — 90 ед., ледоколы — 18 ед., научно-исследовательские суда — 35 ед., танкеры — 40 ед., суда для перевозки сжиженного газа — 30 ед. По имеющимся в средствах массовой информации данным (сообщение ТАСС: <https://tass.ru/ekonomika/5539685>), Минпромторг РФ поддержал разработку и создание судна на подводных крыльях «Циклон» (рис. 5) полным водоизмещением 70,8 т, вместимостью 150 пассажиров для эксплуатации на Дальнем Востоке и в Калининграде. На судне планируется установить два турбовальных газотурбинных двигателя АИ-20А мощностью по 2,7 МВт, которые должны обеспечить дальность плавания судна до 500 км при крейсерской скорости 95 км/ч и максимальную эксплуатационную скорость — 100 км/ч.



Рис. 5. Судно «Циклон»
(<http://sudostroenie.info/mobver/novosti/24285.html>)

Большинство из указанных ранее и перспективных судов имеют энергетические установки мощностью в несколько МВт. Учитывая, что в настоящее время в Российской Федерации не производятся дизельные двигатели большой мощности [8], ГТД, выпускаемые в странах СНГ, имеют реальные перспективы применения в морской технике. ГТУ по принципу передачи мощности потребителю можно разделить на прямодействующие, непосредственно связанные с потребителем и включающие механизмы передачи мощности. ГТУ первого типа вследствие высокой частоты вращения ГТД могут найти применение только в том случае, если приводной механизм (электрогенератор, компрессор, вентилятор и др.) допускает высокую частоту вращения.

Главные ГТД могут иметь зубчатую или электрическую передачу. Наибольшее распространение имеет зубчатая передача, КПД которой достигает 97–98 %. Электропередача используется на судах специального назначения: ледоколах и пассажирских судах. Ограниченный набор элементов ГТД (компрессор, камера сгорания, турбина) не исключает различных вариантов конструктивных схем. Типовые схемы ГТД, имеющие перспективы использования на морской технике, приведены на рис. 6.

Разделение приводов воздушного компрессора и пропульсивной установки имеет в своей основе применение нескольких турбин, последовательно или перекрестно включенных в газовый тракт установки. Одна из турбин является пропульсивной (передающей мощность на движитель), другие турбины являются приводными для компрессоров. В схемах ГТД с регенерацией теплоты возможно достижение более высоких КПД, чем в прямоточных типах установок. Эффективность внедрения системы регенерации во многом зависит от конструкции теплообменных аппаратов и их гидравлического сопротивления, определяющего потерю давления в воздушно-газовом тракте. Применение регенерации в двухвальной установке нивелирует снижение КПД двигателя на частичных нагрузках. Возможности повышения энергетической эффективности судовых ГТУ и методы оценки использования вторичных энергетических ресурсов рассмотрены в работах [9], [10].

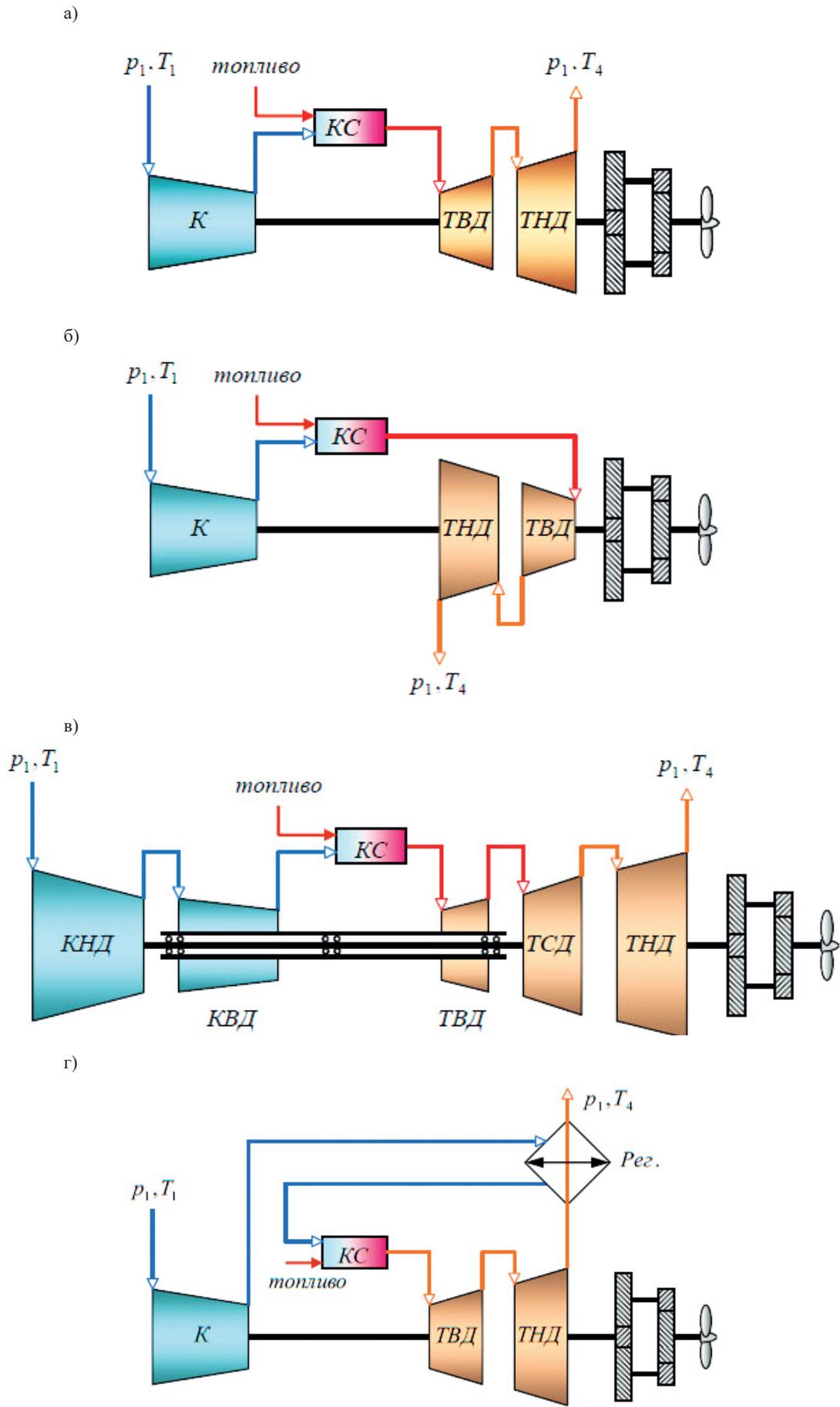
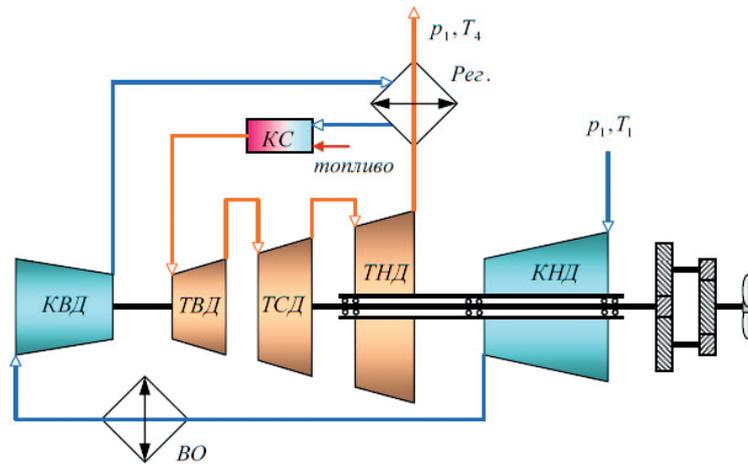


Рис. 6. Конструктивные схемы ГТД (начало)

д)



е)

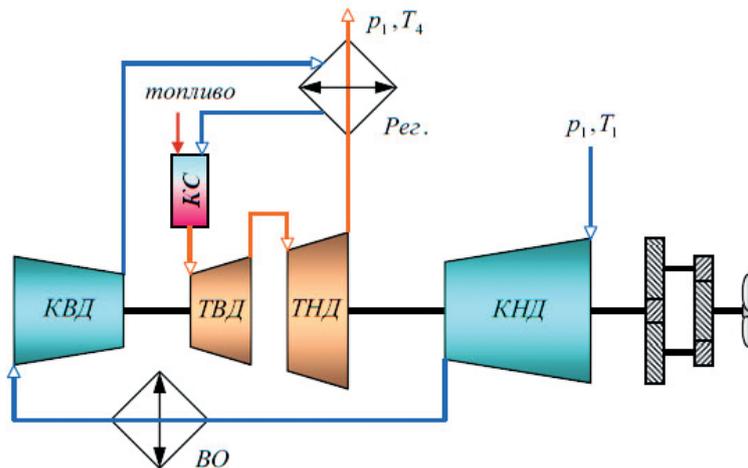


Рис. 6. Конструктивные схемы ГТД (окончание):

- а* — двухвальный ГТД с последовательным соединением турбин (по газовому тракту);
- б* — двухвальный ГТД с перекрестным соединением турбин (по газовому тракту);
- в* — трехвальный ГТД с последовательным соединением турбин (по газовому тракту);
- г* — двухвальный ГТД с последовательным соединением турбин (по газовому тракту) и регенерацией теплоты отработавших газов;
- д* — трехвальный ГТД с последовательным соединением турбин (по газовому тракту), промежуточным охлаждением воздуха и регенерацией теплоты отработавших газов;
- е* — двухвальный ГТД с последовательным соединением турбин (по газовому тракту), промежуточным охлаждением воздуха и регенерацией теплоты отработавших газов

Конвертация авиационных и промышленных ГТД в судовые требует учета особых условий эксплуатации, анализ которых проведен в работах [11]–[13]. Основными выявленными эксплуатационными факторами являются солевые отложения и износы проточных частей компрессоров, а также износ лопаток турбин, оказывающие влияние на снижение экономических и экологических показателей работы судовой ГТУ. Проблемы повышения эксплуатационной надежности ГТД, применяемых в судовых энергетических установках рассмотрены в работах [14], [15]. Совершенствованию систем диагностирования судовых ГТД посвящены работы [16]–[18].

С целью повышения надежности элементов судовых ГТД предлагается использовать конструкционные материалы, отвечающие условиям эксплуатации [19], оптимизировать режимы работы ГТД [20] и тепловое состояние наиболее теплонагруженных элементов [21], [22], совершенствовать конструкцию основных элементов ГТД на основании всесторонних научных исследований [23], [24].

Результаты (Results)

В результате проведенного анализа научно-технической информации, представленной в отечественных и зарубежных источниках можно сделать следующие выводы.

1. Современные тенденции развития гражданского судостроения подтверждают возможности расширения использования в составе судовых энергетических установок газотурбинных двигателей. Наиболее рациональным является применение ГТД в СЭУ мощностью 2 МВт и более.

2. Использование ГТД в составе СЭУ позволяет решить проблему импортозамещения, поскольку в настоящее время в Российской Федерации отсутствует производство дизельных двигателей большой мощности, тогда как производство газотурбинных двигателей успешно реализовано на ряде отечественных предприятий.

3. Для использования на флоте в зависимости от назначения судна и его водоизмещения могут быть адаптированы как промышленные (стационарные), так и авиационные ГТД.

4. Основными задачами, решаемыми в процессе конвертации промышленных и авиационных ГТД в судовые, являются повышение их экономичности за счет совершенствования рабочих процессов и максимально полного использования вторичных энергетических ресурсов, а также повышение ресурсных показателей за счет учета особенностей эксплуатации и рационального выбора конструкционных материалов.

5. Существующие конструктивные схемы ГТД позволяют достаточно полно применять вторичные энергетические ресурсы при условии оптимального выбора параметров рабочего процесса и использования эффективного теплообменного оборудования.

Обсуждение (Discussion)

Задачи повышения надежности ГТД за счет совершенствования конструкции отдельных элементов, обеспечения допустимого теплового состояния, использования современных материалов успешно решаются разработчиками и производителями стационарных и авиационных ГТД. Особой задачей, требующей решения применительно к судовым ГТУ, является глубокая утилизация вторичных энергетических ресурсов, которая для авиационных ГТД, не является приоритетной, и в отличие от стационарных установок должна решаться в ограниченном пространстве машинно-котельного отделения. В связи с этим особое значение приобретает выбор параметров рабочего цикла и конструкции теплообменных аппаратов.

Особенность подобных исследований состоит в использовании природного газа и водорода в качестве альтернативного топлива для судовых газовых турбин и гибридных судовых энергетических установок на основе ГТД с возможностью использования различных видов топлива, а также разработке судовых газовых турбин замкнутого цикла, обладающих такими преимуществами, как возможность эксплуатации практически любого источника теплоты, компактность и экологическая безопасность.

Заключение (Conclusion)

Использование газотурбинных двигателей в гражданском судостроении имеет перспективы для определенных сегментов флота. Успешная реализация данных перспектив требует решения комплекса научно-технических задач, связанных с конвертацией промышленных и авиационных ГТД в судовые. К важнейшим задачам относятся повышение энергоэффективности судовых ГТУ за счет утилизации вторичных энергетических ресурсов, возможность использования традиционных и альтернативных видов топлива, создание гибридных судовых энергетических установок на базе ГТД, в том числе для буровых платформ и других объектов, работающих в прибрежных акваториях.

Решение сложного комплекса задач предполагает применение различных методов исследований, включая энергетические и эксергетические оценки рабочих циклов ГТД, численное моделирование процессов, протекающих в элементах ГТД и теплообменном оборудовании, экспериментальные исследования, а также сбор информации в условиях эксплуатации судовых ГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прасников В. Б.* Первый газотурбинный корабль отечественного ВМФ (Опытный большой торпедный катер пр. 183Т) / В. Б. Прасников // Судостроение. — 2004. — № 6 (757). — С. 27–31.
2. *Буров М. Н.* История развития и основные проблемы создания морских энергетических установок нового поколения / М. Н. Буров // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № 3 (393). — С. 103–112. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-103-112.
3. *Буров М. Н.* Основные проблемы применения конвертированных авиационных газотурбинных двигателей в составе морских энергетических установок и их решение / М. Н. Буров // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2018. — Т. 22. — № 4 (82). — С. 62–69.
4. *Буров М. Н.* К вопросу о формировании облика семейства морских ГТД 5-го поколения / М. Н. Буров, В. А. Пономарев // Актуальные проблемы морской энергетики. Материалы Восьмой международной научно-технической конференции. — СПб.: СПбГМТУ, 2019. — С. 40–47.
5. *Буров М. Н.* Направления разработки и создания корабельного газотурбинного двигателя пятого поколения / М. Н. Буров, В. А. Пономарев // Судостроение. — 2020. — № 4 (851). — С. 29–34.
6. *Болдырев О. Н.* Судовые энергетические установки / О. Н. Болдырев. — Северодвинск: Севмашвуз, 2003. — 171 с.
7. *Пашин В. М.* Инновации и перспективы создания морской техники / В. М. Пашин // Инновации. — 2011. — № 7 (153). — С. 3–10.
8. *Безюков О. К.* Состояние и перспективы судового двигателестроения в России / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 40–53. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-40-53.
9. *Ерофеев В. Л.* О возможностях использования вторичных энергетических ресурсов в судовых ДВС / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.
10. *Жуков В. А.* Использование вторичных энергетических ресурсов в судовых энергетических установках с газотурбинными двигателями / В. А. Жуков, М. С. Капустянский // Актуальные проблемы морской энергетики / Материалы девятой Междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2020. — С. 583–587.
11. *McCreath C. G.* Environmental factors that determine hot corrosion in marine gas turbine rigs and engines / C. G. McCreath // Corrosion Science. — 1983. — Vol. 23. — Is. 9. — Pp. 1017–1023. DOI: 10.1016/0010-938X(83)90028-8.
12. *Семенюк А. В.* Влияние эксплуатационных факторов на параметры рабочего процесса судовых газотурбинных двигателей / А. В. Семенюк, Л. А. Семенюк, Н. Н. Таращан // Вестник Морского государственного университета. — 2018. — № 83. — С. 84–89.
13. *Wirkowski P.* Parameterization of the operating conditions of the vessel's turbine engine in the aspect of the pollutant exhaust emission assessment / P. Wirkowski, J. Markowski // Transportation Research Procedia. — 2019. — Vol. 40. — Pp. 927–933. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.130.
14. *Мясников Ю. Н.* Эксплуатационные дефекты судовых дизельных и газотурбинных двигателей / Ю. Н. Мясников, В. С. Никитин, А. А. Равин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 3 (385). — С. 85–96. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-85-96.
15. *Глушкова Д. Б.* Повышение ресурса работы деталей судовых газотурбинных двигателей / Д. Б. Глушкова, Ю. Н. Дзюба // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2008. — № 42. — С. 24–27.
16. *Воробьев Ю. М.* Усовершенствование бортовых систем диагностирования судовых газотурбинных двигателей / Ю. М. Воробьев // Водный транспорт. — 2013. — № 2 (17). — С. 13–18.
17. *Жорник М. Н.* Оптико-электронная пирометрическая система / М. Н. Жорник, С. В. Веретенников, Е. Г. Колесова // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. — 2018. — № 4 (47). — С. 24–30.
18. *Campora U.* Marine gas turbine monitoring and diagnostics by simulation and pattern recognition / U. Campora, C. Cravero, R. Zaccone // International journal of naval architecture and ocean engineering. — 2018. — Vol. 10. — Is. 5. — Pp. 617–628. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2017.09.012.

19. *Vaferi K.* Thermo-mechanical simulation of ultrahigh temperature ceramic composites as alternative materials for gas turbine stator blades / K. Vaferi, M. Vajdi, S. Nekahi, S. Nekahi, F. S. Moghanlou, M. S. Asl, M. Mohammadi // *Ceramics International*. — 2021. — Vol. 47. — Is. 1. — Pp. 567–580. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.164.
20. *Володин Ю. Г.* Теплообмен при пуске судового газотурбинного двигателя / Ю. Г. Володин, О. П. Марфина, Ю. И. Матвеев, М. Ю. Храмов // *Вестник Волжской государственной академии водного транспорта*. — 2019. — № 58. — С. 153–158.
21. *Володин Ю. Г.* Особенности теплообмена в жаровой трубе судового газотурбинного двигателя в пусковом режиме / Ю. Г. Володин, Ю. И. Матвеев, М. Ю. Храмов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2018. — № 4. — С. 66–74. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-66-74.
22. *Liu J.* Effects of a pocket cavity on heat transfer and flow characteristics of the endwall with a bluff body in a gas turbine engine / J. Liu, S. Hussain, L. Wang, G. Xie, B. Sundén // *Applied Thermal Engineering*. — 2018. — Vol. 143. — Pp. 935–946. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.020.
23. *Fatsis A.* Design point analysis of two-shaft gas turbine engines topped by four-port wave rotors for power generation systems / A. Fatsis // *Propulsion and Power Research*. — 2019. — Vol. 8. — Is. 3. — Pp. 183–193. DOI: 10.1016/j.jprr.2019.06.001.
24. *Hughes M.* Challenges for gas turbine engine components in power generation / M. Hughes // *Procedia structural integrity*. — 2017. — Vol. 7. — Pp. 33–35. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.057.

REFERENCES

1. Prasn timer, V. B. “The first gas turbine ship of national navy.” *Shipbuilding* 6(757) (2004): 27–31.
2. Burov, Maxim N. “Evolution and main design challenges of new-generation marine power plants.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 3(393) (2020): 103–112. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-103-112.
3. Burov, Maksim Nikolaevich. “Main problems of converted aircraft GTES application in marine power plants and their solution.” *Vestnik USATU* 22.4(82) (2018): 62–69.
4. Burov, M. N., and V. A. Ponomarev. “To the issue of shaping the image of v-generation ship GTES family.” *Aktual’nye problemy morskoi energetiki. Materialy Vos’moi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikheskoi konferentsii*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet, 2019. 40–47.
5. Burov, M. N., and V. A. Ponomaryov. “Development and construction trends of 5th generation gas-turbine engine.” *Shipbuilding* 4(851) (2020): 29–34.
6. Boldyrev, O. N. *Cudovye energeticheskie ustanovki*. Severodvinsk: Sevmashvtuz, 2003.
7. Pashin, V. “Innovations and prospects of naval engineering.” *Innovations* 7(153) (2011): 3–10.
8. Bezjukov, Oleg Konstantinovich, and Vladimir Anatoljevich Zhukov. “State and prospects of ship engine-building in Russia.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2017): 40–53. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-40-53.
9. Erofejev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Olesya V. Melnik. “On the possibilities of using secondary energy resources in marine engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.
10. Zhukov, V. A., and M. S. Kapustyanskii. “Ispol’zovanie vtorichnykh energeticheskikh resursov v sudovykh energeticheskikh ustanovkakh s gazoturbinnymi dvigatelyami.” *Aktual’nye problemy morskoi energetiki. Materialy devyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2020. 583–587.
11. McCreath, C. G. “Environmental factors that determine hot corrosion in marine gas turbine rigs and engines.” *Corrosion Science* 23.9 (1983): 1017–1023. DOI: 10.1016/0010-938X(83)90028-8.
12. Semenyuk, A. V., L. A. Semenyuk, and N. N. Tarashchan. “Vliyanie ekspluatatsionnykh faktorov na parametry rabocheho protsessa sudovykh gazoturbinnnykh dvigatelei.” *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 83 (2018): 84–89.
13. Wirkowski, Paweł, and Jarosław Markowski. “Parameterization of the operating conditions of the vessel’s turbine engine in the aspect of the pollutant exhaust emission assessment.” *Transportation Research Procedia* 40 (2019): 927–933. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.130.
14. Myasnikov, Yuri N., Vladimir S. Nikitin, and Aleksandr A. Ravin. “Service defects of ship diesel and gas-turbine engines.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 3(385) (2018): 85–96.
15. Glushkova, D., and Yu. Dzyuba. “Increasing service life of marine gas-turbine engine parts.” *Vestnik Khar’kovskogo natsional’nogo avtomobil’no-dorozhnogo universiteta* 42 (2008): 24–27.

16. Vorobjov, U. "Improving onboard diagnostic systems of gas turbine engines." *Vodnyi transport* 2(17) (2013): 13–18.
17. Zhornik M. N., S. V. Veretennikov, and E. G. Kolesova. "Optical-electronic pyrometric system." *Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University* 4(47) (2018): 24–30.
18. Campora, Ugo, Carlo Cravero, and Raphael Zaccone. "Marine gas turbine monitoring and diagnostics by simulation and pattern recognition." *International journal of naval architecture and ocean engineering* 10.5 (2018): 617–628. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2017.09.012.
19. Vaferi, Kouros, Mohammad Vajdi, Sanam Nekahi, Sahar Nekahi, Farhad Sadegh Moghanlou, Mehdi Shahedi Asl, and Mohsen Mohammadi. "Thermo-mechanical simulation of ultrahigh temperature ceramic composites as alternative materials for gas turbine stator blades." *Ceramics International* 47.1 (2021): 567–580. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.164.
20. Volodin, Y. G., O. P. Marfina, Y. I. Matveev, and M. Y. Khramov. "Heat exchange during start-up of a marine gas turbine engine." *Bulletin of VSAWT* 58 (2019): 153–158.
21. Volodin, Yuri Guryanovich, Yuri Ivanovich Matveev, and Mikhail Yurievich Khramov. "Characteristics of heat transfer in fire tube of marine gas turbine engine in starting mode." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2018): 66–74. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-66-74.
22. Liu, Jian, Safeer Hussain, Lei Wang, Gongnan Xie, and Bengt Sundén. "Effects of a pocket cavity on heat transfer and flow characteristics of the endwall with a bluff body in a gas turbine engine." *Applied Thermal Engineering* 143 (2018): 935–946. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.020.
23. Fatsis, A. "Design point analysis of two-shaft gas turbine engines topped by four-port wave rotors for power generation systems." *Propulsion and Power Research* 8.3 (2019): 183–193. DOI: 10.1016/j.jprr.2019.06.001
24. Hughes, Martin. "Challenges for gas turbine engine components in power generation." *Procedia structural integrity* 7 (2017): 33–35. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.057.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

Капустянский Михаил Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Жуков Владимир Анатольевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezjukov, Oleg K. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru

Zhukov, Vladimir A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

Kapustyansky, Mikhail S. — Postgraduate
Supervisor:
Zhukov, Vladimir A.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 18 февраля 2021 г.
Received: February 18, 2021.