

УДК 629.5.011; 629.5.016; 629.5.018; 629.123
EDN VQEZJD

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОСТАВЕ КСЭУ СУДОВ КЛАССА «АФРАМАКС»

А.А. Иванченко, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru

Л.С. Венцюлис, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: leonard446@gmail.com

Г.А. Конев, магистр, аспирант ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: sigen11@yandex.ru

В статье проанализированы возможности применения инновационных газотурбинных технологий в составе комбинированных энергетических установок крупнотоннажных судов класса «Афрамекс» с целью повышения энергоэффективности и экологических показателей флота. Разработаны концептуальные проекты КСЭУ мегаваттного класса, объединяющие достижения газотурбостроения, паротурбинных и электрохимических технологий, технологий использования возобновляемых источников энергии и интеллектуальных систем управления. Определены рациональные параметры ГТД и утилизационных контуров для достижения КПД свыше 60 % при существенном снижении эмиссии парниковых газов.

Ключевые слова: суда класса «Афрамекс», комбинированные судовые энергетические установки, газотурбинные двигатели, керамические композиты, органический цикл Ренкина, интеллектуальные системы управления, термодинамическая эффективность, эмиссия парниковых газов.

Для цитирования: Иванченко А.А. Перспективы применения инновационных газотурбинных технологий в составе КСЭУ судов класса «Афрамекс» / А.А. Иванченко, Л.С. Венцюлис, Г.А. Конев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 126 — 149. — EDN VQEZJD.

PROSPECTS OF INNOVATIVE GAS TURBINE TECHNOLOGIES APPLICATION IN INTEGRATED POWER PLANTS OF AFRAMAX TANKERS

A.A. Ivanchenko, DSc, Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul. 5/7, e-mail: IvanchenkoAA@gumrf.ru

L.S. Ventsulis, DSc, Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul. 5/7, e-mail: leonard446@gmail.com

G.A. Konev, MSc, post-graduate student, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul. 5/7, e-mail: sigen11@yandex.ru

The article analyzes the potential of innovative gas turbine technologies application in integrated power plants of Aframax-class large-capacity ships to improve fleet energy efficiency and environmental friendliness. Conceptual designs of megawatt-class IPPs have been developed, combining advances in gas turbine engineering, steam turbine and electrochemical technologies, renewable energy sources, and intelligent control systems. Rational parameters of gas turbine engines and waste heat recovery circuits have been determined to achieve efficiency over 60 % with a significant reduction in greenhouse gas emissions.

Keywords: Aframax-class tankers, integrated marine power plants, gas turbine engines, ceramic matrix composites, organic Rankine cycle, intelligent control systems, thermodynamic efficiency, greenhouse gas emissions.

For citation: Ivanchenko A.A., Ventsulis L.S., Konev G.A. Prospects of innovative gas turbine technologies application in integrated power plants of Aframax tankers. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 126 — 149. EDN VQEZJD.

ВВЕДЕНИЕ

Ужесточение экологических требований Международной морской организации (ИМО) к энергоэффективности и выбросам парниковых газов (ПГ) с отработавшими газами энергетических установок судов является ключевым драйвером инновационного развития судовой энергетики в средне- и долгосрочной перспективе [1]. Согласно Первоначальной стратегии ИМО по сокращению выбросов ПГ, принятой в 2018 г., международное судоходство должно снизить абсолютный объем эмиссии CO_2 как минимум на 50 % к 2050 г. (от уровня 2008 г.) при одновременном повышении операционной энергоэффективности судов на 40 % к 2030 г. [2]. В 2023 г. ИМО скорректировала целевые показатели Стратегии в сторону достижения углеродной нейтральности отрасли к середине столетия [3]. Это потребует внедрения инновационных энерго-сберегающих технологий и ускоренного перехода флота на низко- и безуглеродные виды топлива [4]. В этом контексте перспективным решением представляется создание интегрированных судовых энерго-комплексов нового поколения, функционирующих на энергии высокоэффективных тепловых двигателей, электрохимических генераторов, систем утилизации теплоты и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [5, 6]. По оценкам ведущих классификационных обществ, оптимальная комбинация указанных технологий способна обеспечить сокращение удельного расхода топлива на 20 — 35 % и выбросов CO_2 на 50 — 90 % по сравнению с традиционными СЭУ [7, 8]. Ключевым фактором конкурентоспособности перспективных комбинированных СЭУ (КСЭУ) является достижение рекордных значений КПД цикла энергопреобразования при приемлемой стоимости жизненного цикла. В этой связи значительный интерес представляет исследование возможности применения инновационных газотурбинных технологий в качестве основной движущей силы крупнотоннажных судов класса «Афрамекс» дедвейтом 80 — 120 тыс. т.

По своим удельным характеристикам современные газотурбинные двигатели (ГТД) сопоставимы с малооборотными дизелями (МОД), являющимися отраслевым стандартом СЭУ в данном сегменте [9]. При этом газовые турбины обладают рядом уникальных преимуществ, открывающих новые возможности повышения энергоэффективности СЭУ: 1) топливная гибкость; 2) высокая экологичность; 3) компактность и модульность конструкции; 4) отсутствие ограничений по сопротивлению выпуску и противодавлению; 5) высокая приемистость.

Целями данной работы являлись: 1) анализ возможности и перспектив применения передовых газотурбинных технологий в составе КСЭУ судов класса «Афрамекс» для повышения энергоэффективности и экологических показателей СЭУ; 2) разработка концептуальных проектов высокоэкономичных КСЭУ мегаваттного класса на основе инновационных ГТД, утилизационных паротурбинных и утилизационных контуров, электрохимических генераторов, ВИЭ и интеллектуальных систем управления; 3) определение рациональных параметров и оптимальной конфигурации перспективных КСЭУ, обеспечивающих достижение КПД 60 % + и многократное снижение выбросов CO_2 и NO_x ; 4) обоснование приоритетных направлений развития отечественного энергомашиностроения для создания научно-технического задела в части ключевых элементов КСЭУ нового поколения.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1) проведен системный анализ современного состояния и прогноза развития технологий газотурбостроения в части повышения термодинамических параметров цикла, применения инновационных конструкционных материалов, методов охлаждения и организации рабочего процесса в камерах сгорания (КС);

2) исследованы возможности использования альтернативных рабочих тел и прогрессивных утилизационных систем, включая комбинированные парогазовые и газопаротурбинные установки, органические циклы Ренкина, гибридные ГТУ с топливными элементами;

3) разработан ряд концептуальных технических решений по составу оборудования и схеме КСЭУ на базе ГТД нового поколения, отличающихся архитектурой системы утилизации, типом передачи мощности и накопителями энергии;

4) проведены параметрические исследования и многокритериальная оптимизация рабочих параметров ГТД и основных элементов утилизационного контура с целью максимизации топливной эффективности КСЭУ;

5) исследована эффективность применения интеллектуальных систем динамического перераспределения нагрузок, оптимальной маршрутизации и адаптивного управления в составе КСЭУ нового поколения;

6) выполнен технико-экономический анализ рассмотренных вариантов КСЭУ с учетом капитальных затрат, топливных издержек, экологических платежей и стоимости вывода из эксплуатации при различных сценариях развития рынка энергоносителей и нормативной базы;

7) сформулированы рекомендации по приоритетным направлениям развития отечественного энергомашиностроения с целью создания научно-технического задела в области проектирования и производства перспективных судовых ГТД и КСЭУ.

1. АНАЛИЗ ДОСТИЖЕНИЙ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ключевыми недостатками судовых ГТУ предыдущих поколений являлись повышенные значения удельного эффективного расхода топлива (b_e) в диапазоне 270 — 330 г/кВт·ч и ограниченный ресурс горячей части (до 50 — 100 тыс. ч.) [10]. Однако стремительный прогресс в области аэрокосмического материаловедения, технологий охлаждения и горения, методов проектирования проточной части открывает возможности радикального улучшения экономичности и надежности перспективных газовых турбин при адаптации к судовым условиям [11, 12]. По экспертным оценкам, внедрение монокристаллических сплавов, керамических композитов и аддитивных технологий в конструкцию стационарных ГТУ простого цикла мегаваттного класса позволит повысить эффективный КПД (η_e) до 46 — 50 % при снижении b_e до 200 — 220 г/кВт·ч к 2030 г. [13]. Дальнейший прогресс в топливной эффективности до уровня 55 — 60 % будет связан с переходом к ГТД сложного цикла с промежуточным охлаждением и регенерацией теплоты на основе компактных теплообменников из металлокерамики [14] (см. рис 1, 2).

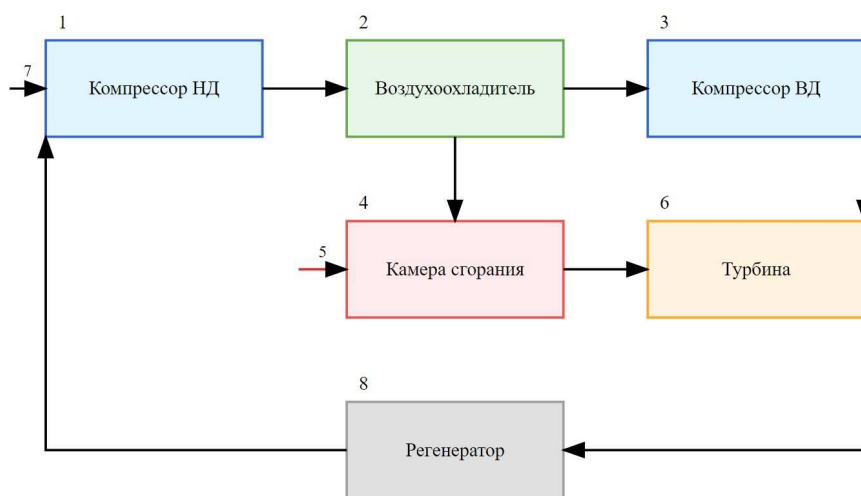


Рис. 1. Перспективная тепловая схема ГТД:

1 — компрессор низкого давления; 2 — воздухоохладитель; 3 — компрессор высокого давления; 4 — КС; 5 — подача топлива; 6 — турбина; 7 — подача циклового воздуха; 8 — регенерация теплоты

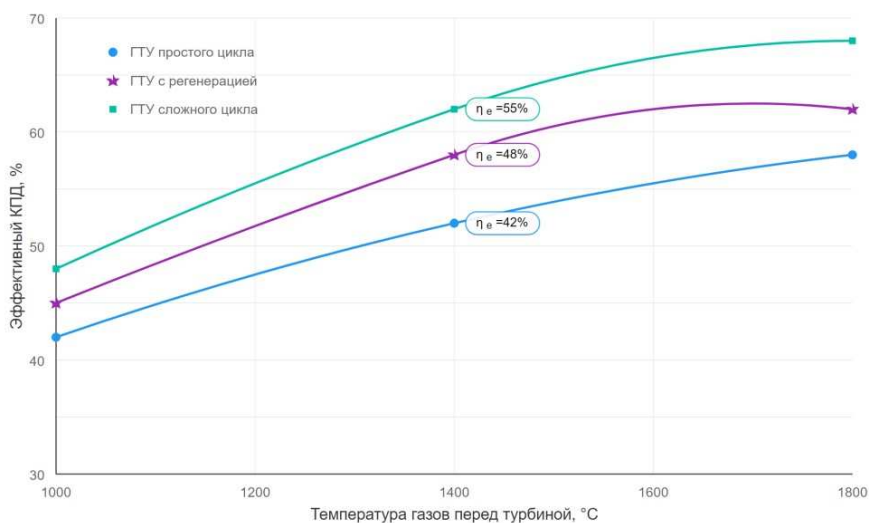


Рис. 2. Зависимость η_e различных типов ГТУ от T_t перед турбиной

При этом внедрение технологий каталитического и микрофакельного сжигания топливовоздушных смесей в камере сгорания (КС) обеспечит выполнение перспективных норм ИМО по эмиссии оксидов азота (Tier III, Tier IV) без применения систем очистки [15, 16]. Рядом отечественных и зарубежных исследователей обоснована техническая реализуемость судовых газотурбинных установок с η_e 60 % и выше на базе гибридных схем парогазового (ПГУ) и газопаротурбинного (ГПТУ) циклов с регенерацией [17, 18]. При этом оптимальные параметры бинарного цикла (давление и температура промперегрева пара, кратность циркуляции в испарителе, отношение расходов рабочих тел) находятся из условий баланса мощностей, теплообмена и термодинамического КПД (η_t) с учетом теплофизических свойств теплоносителей и характеристик вспомогательного оборудования [19, 20]. Наиболее перспективным вариантом повышения энергоэффективности утилизационного контура представляется переход от традиционного паросилового цикла Ренкина к органическому циклу (ОЦР) на основе низкокипящих рабочих тел (НКРТ) с оптимальными термодинамическими свойствами — высокой плотностью пара, малой теплотой парообразования, высоким коэффициентом теплопередачи [21, 22]. Рядом авторов показано, что применение бинарных и каскадных схем ОЦР позволяет повысить глубину утилизации теплоты отработавших газов ГТУ до 85 — 95 % и получить дополнительную полезную мощность в объеме 20 — 30 % от мощности газовой турбины [23, 24]. Ключевым фактором эффективности ОЦР является рациональный подбор рабочего тела в соответствии с уровнем температур и потенциальной работоспособностью вторичных энергоресурсов [25].

Существенного повышения топливной экономичности и снижения эмиссии вредных веществ КСЭУ можно достичь при интеграции с высокотемпературными электрохимическими генераторами (ЭХГ) на базе твердооксидных (ТОТЭ) и расплавкарбонатных (РКТЭ) топливных элементов с внутриреформингом топлива [26]. По данным разработчиков (Bloom Energy, Mitsubishi, Siemens), $\eta_{КСЭУ}$ на базе котельных агрегатов и ТОТЭ/РКТЭ мощностью 0,1 — 1 МВт достигает 65 — 75 % при работе на природном газе и спиртовых топливах [27, 28]. При этом удельная эмиссия NO_x и SO_x снижается на 1 — 2 порядка относительно уровня поршневых ДВС, что позволяет выполнять перспективные нормы ИМО в эквивалентных зонах контроля выбросов (NECA) [29]. Ключевыми проблемами внедрения ЭХГ в судовых условиях остаются высокая стоимость электрохимических модулей (5000 — 10000 \$/кВт), ограниченный ресурс электролита и уплотнений (20 — 40 тыс. ч), низкая циклическая прочность керамики на термоудар [30]. Синергетический эффект от комбинирования высокоэкономичной ГТУ, утилизационного ОЦР контура и батареи ТОТЭ/РКТЭ может быть дополнительно усилен применением интеллектуальных систем динамического перераспределения нагрузки (СДПН) и адаптивного управления режимами. Как показано в [31, 32], использование прогностических алгоритмов на основе нейронечетких сетей (Fuzzy-Neural) и динамики нагрузок судна по выбранному маршруту позволяет оптимизировать управляющие воздействия на приводы регулируемого электродвижения с целевой функцией минимизации расхода топлива в рейсе. При этом учитываются метеорологические факторы, профиль скорости, загрузка судна, текущее техническое состояние механизмов и трендовые характеристики их износа [33].

По оценкам разработчиков, внедрение СДПН адаптивного типа способно сократить годовой объем эмиссии CO_2 на 3 — 6 % при сохранении средней эксплуатационной скорости [34]. Дополнительным резервом повышения экологичности и повышения энерговооруженности судов является комплексирование СЭУ с возобновляемыми источниками энергии: солнечными батареями (СБ), ветрогенераторами (ВЭУ), турбопарусами, волновыми движителями и др. Как показано в [35, 36], использование вспомогательной ветроэнергетической установки мощностью 2 — 4 % от пропульсивной мощности судна позволяет экономить 5 — 20 % топлива в зависимости от профиля эксплуатации и района плавания. Применение фотоэлектрических модулей (КСБ) на базе каскадных гетероструктур типа GaInP/GaAs/Ge с η_e 35 — 40 % способно генерировать до 0,5 — 1 МВт·ч электроэнергии в сутки при оптимальной ориентации панелей суммарной площадью 500 — 1000 м² [37].

Потенциал получения дополнительной тяги за счет бортовой качки и демпфирования судна с помощью интерцептора с активным приводом оценивается в 10 — 20 % [38]. В совокупности интеграция рассмотренных энергосберегающих решений в рамках единого интеллектуального энергокомплекса КСЭУ позволит достичь синергетического эффекта и обеспечить повышение энергоэффективности и экологичности судов нового поколения. Перспективной целью для отечественных конструкторских бюро в рассматриваемом плане является разработка концептуальных проектов КСЭУ мегаваттного класса (18 — 25 МВт) для крупнотоннажных судов класса «Афрамекс» на основе инновационных газотурбинных технологий и прогрессивных схем утилизации теплоты в сочетании с интеллектуальными системами управления и ВИЭ для достижения максимального η цикла (60 %+) и минимального b_e (140 — 160 г/кВт·ч) при обеспечении высоких экологических стандартов (Tier III) и полного соответствия перспективным требованиям ИМО к 2050 году.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) проводится системный анализ современного состояния и прогноза развития технологий газотурбостроения в части повышения термодинамических параметров цикла, применения инновационных конструкционных материалов, методов охлаждения и организации рабочего процесса в КС;
- 2) исследуется потенциал использования альтернативных рабочих тел и прогрессивных схем утилизационных контуров, включая комбинированные ПГУ, ГТУ-ОЦР и гибридные установки с топливными элементами;
- 3) разрабатывается ряд концептуальных технических решений по составу оборудования и схеме КСЭУ на базе ГТД нового поколения, отличающихся архитектурой системы утилизации, типом передачи мощности и составом накопителей энергии;
- 4) проводится параметрический анализ и многокритериальная оптимизация рабочих параметров ГТД (температура, степень повышения давления, коэффициент избытка воздуха) и основных элементов утилизационного контура (ПТУ, ОЦР, ЭХГ) с целью обеспечения максимальной топливной эффективности КСЭУ;
- 5) исследуется эффективность применения интеллектуальных систем динамического перераспределения нагрузок, выбора оптимальной траектории движения и адаптивного управления в составе КСЭУ на базе технологий нейросетевого прогнозирования и нечеткой логики;
- 6) выполняется технико-экономический анализ рассмотренных вариантов КСЭУ с учетом капитальных затрат, топливных издержек, экологических платежей и стоимости вывода из эксплуатации при различных сценариях развития рынка энергоносителей и нормативной базы;
- 7) формулируются рекомендации по приоритетным направлениям развития отечественного энергомашиностроения с целью создания научно-технического задела для проектирования и производства конкурентоспособных образцов судовых ГТД и КСЭУ нового поколения.

Анализ мировых достижений и тенденций развития газотурбинных технологий показал, что газотурбинные двигатели являются одним из наиболее динамично развивающихся классов тепловых машин, находя широкое применение в авиации, энергетике, газотранспортных системах и судовой энергетике. За последние 50 лет удельная мощность и экономичность ГТД выросли более чем в пять раз, при этом потенциал дальнейшего совершенствования далеко не исчерпан [39]. Стремительный прогресс газовых турбин обусловлен синергией достижений в области аэродинамики, конструкционной прочности, тепломассообмена, материаловедения и технологий производства (см. рис. 3).

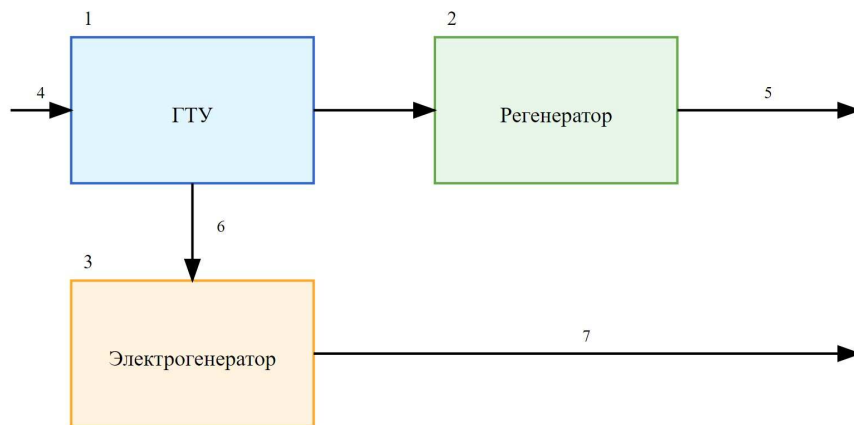


Рис. 3. Схема ГТУ простого цикла с регенерацией:

1 — газотурбинная установка (ГТУ); 2 — регенератор; 3 — электрогенератор; 4 — подача циклового воздуха;
5 — выпуск отработанных газов; 6 — механическая передача; 7 — выработка электроэнергии

Ключевыми трендами развития ГТД нового поколения являются:

- 1) повышение начальных параметров термодинамического цикла (температуры и давления) за счет применения жаропрочных сплавов, монокристаллических лопаток, керамических композитов и термобарьерных покрытий с рабочей температурой 1700 — 2000 К [40];
- 2) оптимизация системы охлаждения высокотемпературных узлов с использованием многоступенчатого воздушного охлаждения, паровых завес, микроканальных схем конвективного охлаждения на основе наножидкостей [41, 42];
- 3) совершенствование методов организации процесса горения в КС (каталитическое сжигание, LPP, RQL) и технологии распыливания топлива с целью минимизации эмиссий NO_x , CO и несгоревших углеводородов [43, 44];

- 4) внедрение ротационно-статических схем подшипников на газодинамической и магнитной подвеске с целью увеличения ресурса, η и снижения эксплуатационных расходов на ТОиР [45, 46];
- 5) использование керамических и композиционных материалов в горячей части ГТД для снижения массы, экономии топлива и радикального увеличения ресурса лопаток [47];
- 6) разработка адаптивных систем управления и защиты ГТУ на базе технологий прогнозтики, нечеткой логики и искусственного интеллекта с целью раннего прогнозирования и предотвращения отказов [48, 49].

2. ИННОВАЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГТД

Системный анализ технологий конструкционных материалов для перспективных ГТД представлен в табл. 1. В качестве базы сравнения приняты характеристики монокристаллических никелевых сплавов 2-го поколения (ВКНА-4У, ЖС36-ВИ), получивших наибольшее распространение в авиационных ГТД семейств ПС-90А, CFM-56, RB211 и др. Анализ табл. 1 показывает, что керамические и углеродные композиты существенно (в 1,5 — 3 раза) превосходят лучшие монокристаллические сплавы по удельной прочности, рабочей температуре и стойкости к ползучести. Предельная рабочая температура керамики на основе карбида кремния (SiC/SiC) достигает 1350 °С, оксидной керамики (Ох/Ох) — 1400 °С, углерод-керамических композитов C/SiC — 1600 °С и выше. При этом плотность КМК в 3 — 4 раза ниже суперсплавов (2000 — 2500 кг/м³), что позволяет радикально снизить массу и момент инерции ротора.

Таблица 1

Свойства конструкционных материалов для ГТД 5 — 6 поколений

Параметр	Монокристаллы		Керамические композиты		Углерод-керамика	Мах.	Источник
	2 пок.	5 пок.	SiC/SiC	Ох/Ох	C/SiC		
Плотность, кг/м ³	8300	8450	2550	2200	1900	1900	[40, 50]
Прочность при растяжении, МПа	1050	1280	420	210	310	1280	[41, 47, 50]
Модуль упругости, ГПа	125	130	380	150	95	380	[40, 50]
Предел длительной прочности, МПа ($T=1373$ К, $\tau=100$ ч)	180	220	310	154	285	310	[41, 42, 50]
Предельная $t_{\text{рабочая}}$, °С	950	1100	1350	1280	1600	1600	[40, 41, 50]
Теплопроводность, Вт/(м·К) (при 1000 °С)	30	40	32	4	30	40	[46, 50]
Коэффициент термического расширения, 10^{-6} К ⁻¹ (20 — 1000 °С)	16	15	5,5	8,2	2,7	2,7	[47, 50]
Твердость, НВ	430	480	2800	1200	920	2800	[40, 46]
Ударная вязкость, кДж/м ²	50	60	35	28	40	60	[41, 47]
Стоимость, \$/кг	180	250	1000	1500	3000	3000	[40, 50]
Примечание. Монокристаллы: 2 пок. — ВКНА-4У (ЖС36-ВИ), 5 пок. — ВЖМ15 (CMSX-10); керамические композиты: SiC/SiC — SiCf/SiC (Тип S, CVI), Ох/Ох — Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ ; углерод-керамика: C/SiC — углеродное волокно/SiC матрица.							

Ключевые преимущества КМК обусловлены сочетанием высокой удельной прочности армирующих волокон (до 3 — 5 ГПа), низкого коэффициента термического расширения, высокой теплопроводности и стойкости к окислению матрицы. Керамические волокна на основе SiC (Nicalon, Tyranno, Sylramic) сохраняют до 90 % прочности при нагреве до 1400 °С в течение 1000 ч, тогда как лучшие жаропрочные сплавы деградируют уже при 1100 °С [47].

Структурная стабильность КМК определяется сопротивлением матричного компонента высокотемпературной ползучести и окислению в агрессивной среде продуктов сгорания. Покрывание межфазных границ защитными слоями оксикарбида кремния (SiOC) и пиролитического углерода (PyC) позволяет повысить трещиностойкость композита и релаксировать остаточные напряжения в матрице [51]. Сочетание КМК SiC/SiC со связующей фазой BN/Si₃N₄ демонстрирует прочность на изгиб до 450 МПа при 1500 °С и трещиностойкость K_{1C} ~ 20 МПа·м^{1/2} [52]. Одна из ключевых проблем внедрения КМК в горячей части ГТД — сложность получения изделий сложной формы методами порошковой металлургии и искрового плазменного спекания.

Аддитивные технологии селективного лазерного спекания керамики SiC/SiC и высокотемпературной 3D-печати монокристаллических лопаток способны решить эту проблему за счет формирования изделий

любой геометрии непосредственно из CAD модели [53]. При этом прочностные свойства аддитивно полученных лопаток из НХ сплавов сопоставимы с отливками традиционным методом направленной кристаллизации. Результаты стендовых испытаний экспериментальных роторов с керамическими лопатками показывают возможность повышения η турбины на 2 — 4 % при одновременном снижении удельного расхода охлаждающего воздуха на 30 — 50 % [54]. По оценкам General Electric, использование композитных лопаток SiC/SiC в первой ступени ГТУ 9HA.02 позволит увеличить начальную температуру газов на 100 °C, обеспечив рост η турбины с 41 % до 43 % [55]. Нарботка на отказ керамических деталей при рабочих температурах 1400 — 1500 °C прогнозируется на уровне 50 000 ч, что в 3 — 5 раз превышает ресурс никелевых лопаток [56]. Не менее перспективны достижения в области разработки жаропрочных сплавов нового поколения. Высоколегированные сплавы 4 — 5 поколений на основе интерметаллидов никеля (Ni3Al, NiAl, NiTi) и тугоплавких металлов группы VIA (Cr, Mo, W) сохраняют длительную прочность на уровне 200 — 250 МПа при рабочих температурах 1200 — 1300 °C в течение 100 000 ч [57]. Защитные покрытия лопаток из высокоэнтропийных сплавов системы TiZrNbHfTa толщиной 200 — 300 мкм позволяют повысить их жаростойкость на 50 — 70 °C и ресурс в 2 — 3 раза [58]. При этом алюминидные покрытия NiAl и NiAlCr демонстрируют в 2 — 3 раза более низкую скорость окисления и повышенную адгезию к подложке по сравнению с промышленными аналогами [59].

Результаты ресурсных испытаний перспективных сплавов ВЖМ15 и ВИН3 (моно) в составе опытных газогенераторов АЛ-41Ф (ПД-14, ОДК) показали возможность устойчивой работы при температуре газа перед турбиной 1835 — 1870 К и ресурсе горячей части до 30 000 ч [60]. При этом обеспечивается выполнение перспективных требований ИКАО и САЕР/10 по эмиссии NO_x и CO на уровне 15 — 40 % от порогов действующих стандартов [61].

Существенные резервы повышения топливной эффективности и экологичности судовых ГТД связаны с оптимизацией систем охлаждения горячей части и совершенствованием процессов горения в КС. Потери мощности турбины, связанные с отбором охлаждения. Как показано в [62], применение конвективно-плечного охлаждения лопаточного аппарата с использованием многорядных систем перфорации, двухконтурных схем течения и интенсификаторов теплообмена позволяет повысить эффективность охлаждения на 40 — 60 % при одновременном снижении расхода воздуха через отверстия до 2 — 3 %. Использование жидкометаллического теплоносителя (натрий, литий, эвтектический сплав Na-K) в замкнутом контуре системы охлаждения способствует интенсификации теплоотвода в критических зонах лопатки в 5 — 7 раз и снижению неравномерности температурных полей на 25 — 30 % [63]. Внедрение аддитивных технологий селективного лазерного плавления (SLM) порошков жаропрочных сплавов позволяет формировать сложные конфигурации каналов охлаждения, недоступные традиционным методам литья [64]. При этом прочностные свойства и структура материала охлаждаемых лопаток в зоне лазерной наплавки сохраняются на уровне основного материала. Применение конформных змеевидных каналов охлаждения, полученных методом SLM, повышает интенсивность теплообмена на 20 — 30 % и ресурс охлаждаемых лопаток в 1,5 — 2 раза по сравнению со штатными аналогами [65].

Ключевым фактором обеспечения низких выбросов вредных веществ с ОГ ГТУ является совершенство организации процесса горения в камере сгорания. Традиционные диффузионные КС характеризуются неравномерностью распределения температур (до 400 — 600 °C) и концентраций топлива в факеле, что приводит к локальным перегревам (более 2000 К) и интенсивному образованию термических оксидов азота [66]. Переход к гомогенным схемам горения в КС с предварительным смешением и термоакустическими колебаниями LPP (Lean, Premixed, Prevaporized) позволяет выровнять температурное поле (до ± 70 °C), снизить пиковые температуры на 150 — 200 °C и эмиссию NO_x на 60 — 80 % [67]. Дальнейшее совершенствование схем LPP связано с применением многоступенчатой подачи топлива и воздуха, микрофакельного горения, управляемой закрутки потока в жаровой трубе. Использование форсунок с системой воздушных завихрителей и тангенциальных каналов диаметром 0,5 — 1 мм позволяет сформировать тороидальный вихрь с высоким числом Россби ($Ro \sim 1$), обеспечивающий многократную циркуляцию продуктов сгорания в головной части факела [68]. При этом достигается выравнивание температурного поля до ± 20 °C, увеличение полноты сгорания на 0,5 — 1 % и 5-кратное снижение эмиссии NO_x и сажи. Применение каталитически стабилизированного горения на поверхности гранулированного материала с высокоразвитой удельной поверхностью (30 — 300 м²/г) позволяет реализовать режим беспламенного «холодного» горения (1200 — 1600 К) с высокой химической активностью компонентов в диапазоне коэффициентов избытка воздуха 1,5 — 5 [69]. При этом скорость химических реакций возрастает на 5 — 6 порядков, расширяются концентрационные пределы горения и обеспечивается «нулевая» эмиссия NO_x и CO [70]. Внедрению каталитических КС в серийное производство препятствует относительно высокая стоимость и ограниченный ресурс катализаторов (Pt, Pd, Rh) при рабочих температурах выше 1000 °C.

Большой интерес представляют схемы КС с химической регенерацией теплоты на базе процесса термохимической конверсии природного газа в синтез-газ ($\text{CO} + 3\text{H}_2$) с последующим сжиганием в основной зоне горения [71]. Организация рециркуляции и предварительной конверсии топлива в присутствии никелевых катализаторов при 500 — 700 °С позволяет химически утилизировать до 25 — 30 % теплоты уходящих газов, увеличивая η_e ГТУ простого цикла на 3 — 5 % [72].

При этом достигается равномерное температурное поле в КС ($\text{grad } T < 30$ °С), степень конверсии CH_4 до 85 — 95 % и сокращение эмиссии NO_x на 20 — 30 % относительно диффузионного сжигания обедненных ТВС [73]. В совокупности внедрение рассмотренных прогрессивных технологий организации рабочего процесса в КС позволит кардинально улучшить экологические характеристики перспективных ГТД и обеспечить соответствие перспективным нормам ИМО по ограничению эмиссии NO_x и CO_2 в горизонте 2050 г. Табл. 2 обобщает ожидаемую динамику совершенствования η_e и экологических характеристик ГТУ простого цикла мегаваттного класса на базе внедрения прогрессивных технологий горячей части и организации рабочего процесса, систематизированных по критерию уровня технологической готовности (TRL).

Таблица 2

Прогноз развития судовых ГТУ простого цикла

Характеристика	1990	2000	2020	2030	2050
Предельная рабочая $t_{\text{уходящих газов}}$, °С					
Традиционные ГТУ	900	1000	1100	1200	1300
ГТУ на кермет-композитах	—	—	1350	1500	1700
КПД электрический (ISO), %					
Серийные ГТУ	28	32	38	42	45
ГТУ на кермет-композитах	—	—	44	48	55
Эмиссия NO_x , г/кВт·ч					
Диффузионная КС	18	12	8	6	4
LPP, RQL, каталитическая КС	—	2	1	0,5	0,1
Эмиссия CO, г/кВт·ч					
Диффузионная КС	4	2	1	0,5	0,2
LPP, RQL, каталитическая КС	—	0,5	0,2	0,1	0,05
TRL, средн.	7	8	8	6	4

Как следует из табл. 2, применение монокристаллических сплавов 4 — 5 поколения и термобарьерных покрытий позволит повысить температуру газов перед турбиной до 1500 — 1700 °С, обеспечив рост $\eta_{\text{элек.}}$ серийных ГТУ до 45 — 50 % к 2030 г. Освоение полноразмерных узлов горячего тракта из керамических композитов SiC/SiC и легких сплавов с интерметаллидным упрочнением (TiAl, NbAl) откроет возможность форсирования параметров цикла ($T_{\text{г.ит}} = 1600$ — 1800 °С и $\pi_k > 50$), что обеспечит достижение η_e 55 — 60 % на горизонте 2050 г. Переход к низкоэмиссионным технологиям сжигания (LPP, RQL) с многоступенчатой подачей топлива-окислителя, управляемой закруткой потока и каталитической стабилизацией пламени позволит снизить концентрацию NO_x в отработавших газах до 10 — 50 ppm и обеспечить выполнение перспективных норм ИМО Tier III и выше без применения систем очистки. Внедрение систем активного управления горением с обратной связью по пульсациям давления и составу продуктов сгорания обеспечит устойчивую работу КС в бедных и сверхбедных режимах ($\alpha = 2,0$ — 2,5) с минимальной эмиссией CO и HC.

Дальнейшее развитие судовых ГТУ будет направлено на совершенствование схемных решений в части промежуточного охлаждения циклового воздуха, регенерации теплоты уходящих газов, парогазотурбинных и газопаровых циклов с промперегревом водяного пара и органического теплоносителя. Переход от базовых ГТУ простого цикла к ГТУ с регенерацией, охлаждением, парогазовым и органическим надстройкам обеспечивает последовательное повышение η_e и удельной мощности при минимизации расхода топлива и эмиссии ПГ (см. табл. 3). Комплексный анализ табл. 3 позволяет выделить следующие перспективные конфигурации ГТУ, рекомендуемые для применения в составе КСЭУ нового поколения (см. рис. 4):

1) высокотемпературная ГТУ простого цикла на керамических композитах с $\eta_{\text{рег}}$ 45 — 48 % и температурой газов 1400 — 1600 °С;

2) регенеративная ГТУ простого цикла с $\eta_{\text{рег}}$ 48 — 52 %, степенью регенерации 0,85 — 0,9 и противодавлением за турбиной до 5 — 10 кПа;

3) ГТУ с промежуточным охлаждением на базе 2-ступенчатого сжатия с $\eta_{\text{рег}} 52 — 55 \%$, коэффициентом промощаждения 1,5 — 2 и частичным отводом теплоты ОС в тепловую сеть;

4) высокоэкономичная ПГУ бинарного цикла с $\eta_{\text{рег}} 58 — 62 \%$, начальными параметрами пара 30 МПа, 650 °С и коэффициентом теплофикации 1 — 1,2;

5) ГТУ-ОРЦ с пентановым контуром на базе одновальной схемы и частичной утилизацией теплоты отработавших газов (ОГ) в конденсаторе ОРЦ, с $\eta_{\text{рег}} 54 — 58 \%$.

При этом оптимальный выбор схемы и параметров ГТУ для конкретного проекта КСЭУ должен производиться на основе технико-экономической оптимизации с учетом уровня форсировки, профиля нагрузок, располагаемых видов топлива и приоритетности критериев эффективности.



Рис. 4. Схема ГТУ со сложным циклом и промощаждением:

1 — компрессор низкого давления; 2 — воздухоохладитель; 3 — компрессор высокого давления; 4 — камера сгорания; 5 — подвод топлива; 6 — турбина; 7 — подача циклового воздуха; 8 — выпуск ОГ

Таблица 3

Сравнительные характеристики перспективных схем ГТУ

Схема ГТУ	Параметры			$\eta_{\text{рег}}$ %	b_e , г/кВт·ч	Удельная масса, кг/кВт	Удельная стоимость САРЕХ, \$/кВт	Технические особенности
	$T_{\text{г.пт}}^*$, °С	π_k^*	$\alpha_{\text{кс}}^*$					
Простой цикл (базовый)	1200	18	2	36	240	4,5	1100	$P_{\text{г.пт}} = 1,1$ МПа; $T_{\text{нв}} = 15$ °С; $\eta_{\text{етр}}$, $\eta_{\text{ем}} = 0,99$
Простой цикл (кермет)	1500	25	1,5	45	190	3,5	1300	$P_{\text{г.пт}} = 1,6$ МПа; КС RQL; $T_{\text{NO}_x} < 25$ ppm
Регенеративный (кермет)	1350	14	2,2	48	180	2,8	1500	$\eta_{\text{рег}} = 0,9$; $t_{\text{нв}} = 70$ °С; $Q_{\text{охл.в}} = 8 \% Q_{\text{к}}$
С промощаждением (2 КНД)	1450	50	1,8	52	165	3,5	2000	$T_{\text{охл}} = 45$ °С; $G_2/G_1 = 0,6$; $P_{\text{охл}} = 0,3$ МПа
Перспективная ПГУ (1+1)	1500	25	1,8	58	150	3,0	1800	$P_{\text{опп}} = 10$ МПа; $T_{\text{опп}} = 600$ °С; $\alpha_{\text{фл}} = 1,2$
ГТУ-ОРЦ с пентаном	1400	28	2,0	54	157	4,2	1900	$t_{\text{кин}} = 175$ °С; $t_{\text{пл}} = 300$ °С; $G_{\text{рт}}/G_{\text{г}} = 0,05$

Примечание. $T_{\text{г.пт}}^*$ — температура газов перед турбиной, К; π_k^* — степень повышения давления в компрессоре; $\alpha_{\text{кс}}^*$ — коэффициент избытка воздуха в камере сгорания; $\eta_{\text{рег}}$ — КПД воздухоподогревателя; b_e — удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч.

Таблица 4

Основные характеристики концептуальных вариантов КСЭУ

№	Состав и особенности	ГТУ	Утилиз. контур	Топливо	$N_{ГТУ}$, МВт	$N_{ПТУ}$, МВт	$N_{ЭХБ}$, МВт	$N_{ЭД}$, МВт	$\eta_{КСЭУ}$, %	Вт, т/сут	CO ₂ , т/сут	NO _x , ppm
1	2 × ГТУ + ПТУ + 2 × ВРК + АБ	Простой цикл, $P=25$, $T_r=1400$ °С, $\eta_e=0,45$	КУ + ПТУ на паре, 8 МПа, 480 °С	СПГ, метанол (10 %)	24	2	—	26	57,2	73,8	176	10
2	1 × ГТУ + ОЦР + ВПМ + АБ	ГТУ с рекуперацией, $P=28$, $T_3=1450$ °С, $\eta_e=0,48$	ORC на пентане, 300 °С, 3 МПа	СПГ, метанол (30 %)	18	—	3	21	58,4	65,2	147	5
3	2 × ГТУ + ГТА + ВРК + СК	ГТУ в полужамкнутом цикле, $P=12$, $T_3=1150$ °С, $\eta_e=0,52$	КУ + АГТД на тяжелых УВ, H_e-N_e	Синтетич. жидкое топливо	24	—	1	25	60,8	57,6	115	0,5
4	ГТУ + ДГ + ПТУ + МЭГ + АБ	ГТУ простой, $P=25$, $T_3=1350$ °С + ДГ $P_g=6$ МВт	КУ + ВПГ на H ₂ + электролизер 3 МВт	Аммиак безводный	19	2,5	1	22,5	56,1	78,4	140	<1
5	2 × ГТУ + ПТУ + ОЦР + АБ	ГТУ комбинированный ПГУ/ГТУ-ОЦР	2-ступ. ПТУ на паре + ОЦР	Метанол, биогаз	20+4	5	1+4	34	62,4	48,7	95	2

Примечание. ВПМ — высокомоментный привод на ПМ; ВРК — винторулевая колонка; АБ — аккумуляторная батарея; СК — суперконденсатор; КУ — котел-утилизатор; ВПГ — водородный парогенератор; МЭГ — модуль электрохимической генерации; ГТА — газотурбинный агрегат.

3. АРХИТЕКТУРА И КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КСЭУ

В соответствии с целями и задачами работы разработано пять концептуальных проектов КСЭУ электрической мощностью 18 — 25 МВт, предназначенных для применения в составе пропульсивных комплексов крупнотоннажных судов класса «Афрамекс» дедвейтом 80 — 120 тыс. т. Основные технические решения и прогнозные характеристики вариантов КСЭУ обобщены в табл. 4. Ниже приведено детальное описание предлагаемых вариантов КСЭУ.

Вариант 1. КСЭУ на базе 2 керамических ГТУ простого цикла суммарной мощностью 24 МВт в сочетании с двухконтурной утилизационной ПТУ на водяном паре мощностью 2 МВт для привода 2 ВРК (см. рис. 5).

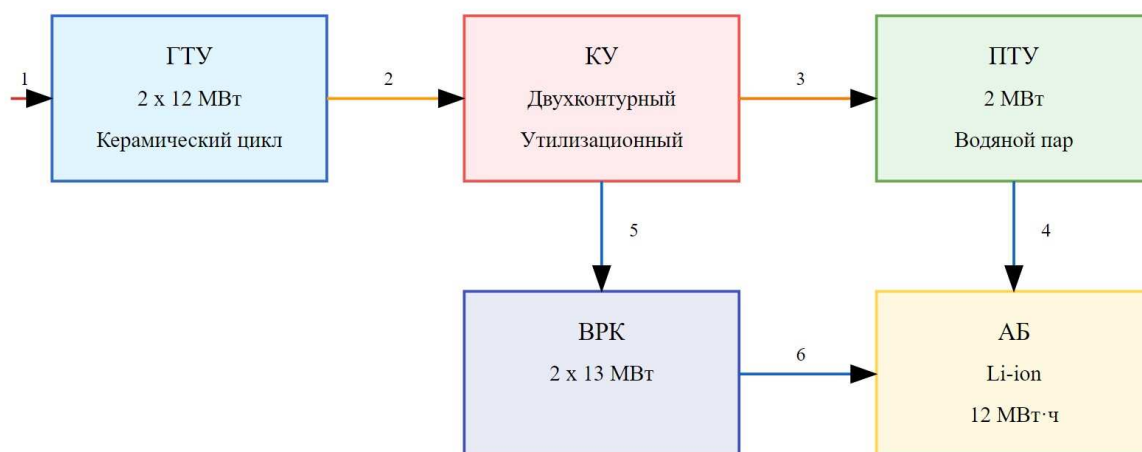


Рис. 5. Принципиальная схема КСЭУ, вариант 1:

1 — поддача топлива; 2 — выпуск отработанных газов; 3 — поддача пара; 4 — поддача электроэнергии (ПТУ-АБ); 5 — поддача электроэнергии (ПТУ-ВРК); 6 — поддача электроэнергии (ВРК-АБ)

В качестве накопителя энергии и резервного источника используется Li-ion батарея большой емкости (12 МВт·ч). Мощность и тип ГД выбраны из условия обеспечения скорости полного хода 15 — 16 уз. Газотурбинная часть включает 2 ГТД традиционной простой схемы с 18-ступенчатым осевым компрессором

($P_k = 2,5$, $\eta_{ад} = 0,87$), трубчато-кольцевой КС и 4-ступенчатой осевой турбиной с охлаждаемой 1-й ступенью. Проектные параметры цикла ГТУ: температура газов на входе в турбину $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, суммарная степень расширения 25, коэффициент избытка воздуха в КС 2,5, η_e ГТД 45 %. КС инновационной конструкции LPP многозонного типа с управляемой закруткой потоков обеспечивает выравнивание поля температур на выходе до $\pm 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и снижение уровня эмиссии NO_x до 10 ppm без впрыска воды или пара. В качестве основного топлива используется отпарной газ (BOG) из танков СПГ с добавлением до 10 % метанола. При бункеровке СПГ с метановым числом не ниже 80 организуется его смешение с BOG непосредственно в топливной системе перед КС, что исключает необходимость отдельной газоподготовки. Система управления ГТД на базе FADEC (Full Authority Digital Engine Control) обеспечивает контроль потребных расходов компонентов топлива в соответствии с нагрузкой ГТУ и динамическое перераспределение расходов BOG и СПГ при изменении метанового числа смеси. Силовая турбина ГТУ выполнена на основе сборно-разборного ротора с монокристаллическими лопатками и сегментированным корпусом из легких сплавов. Охлаждение С1 ступени — конвективно-пленочное на основе многорядных систем перфорации, двухконтурных схем течения, жидкометаллических теплообменных секций (натрий). Опоры турбины — активно-адаптивная конструкция с ротационным демпфированием на газовой смазке и ЭМП.

Таким образом обеспечивается повышение η турбины до 92 — 93 % и ресурса до 150 тыс. ч. Роторы компрессора и турбины соединены демпферной муфтой в едином корпусе ГТД с общей смазочной системой. В качестве редуктора используется одноступенчатый шевронный планетарный редуктор с прямыми зубьями шестернями и керамическими подшипниками качения. Масштабирование редуктора на мощность до 12 МВт при высокой частоте вращения обеспечивается применением зубчатых колес из карбида кремния и нитрида титана. Таким образом снижаются потери на трение и масса редуктора при сохранении высокого η , малошумности и плавности работы.

Утилизационный контур представляет собой двухконтурную систему, сопрягающую котел-утилизатор (КУ) с паровой противодавленческой турбиной мощностью 2 МВт. Параметры пара перед турбиной: $P_o = 8\text{ МПа}$, $T_o = 480\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход 5 кг/с. $\eta_{ПТУ}$ составляет 32 % при $t_{ух.г} 170\text{ }^{\circ}\text{C}$, давлении пара за ПТ 0,005 МПа. Конденсатор ПТ объединен с регенеративными ПВД в единый узел утилизации теплоты $t = 120 — 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Общесудовые потребности в насыщенном паре (обогрев, горячее водоснабжение, подогрев жидких грузов) покрываются за счет теплофикационных отборов от ПТ. Для обеспечения пиковых нагрузок и работы в маневренных режимах предусмотрен накопитель энергии на базе Li-ion АБ большой емкости (тип LMO, удельная емкость 200 Вт·ч/кг). Основная функция АБ: обеспечение устойчивого электроснабжения при динамических возмущениях нагрузки путем выдачи (поглощения) небалансной мощности до $\pm 2\text{ МВт}$ в течение 30 мин. Заряд/разряд АБ осуществляется через инвертор и DC-шину. Время полного заряда АБ от берегового источника 6 — 8 ч. Ресурс АБ до замены модулей 6 — 8 лет. Для привода гребных винтов ВРК используется напряжение 10 кВ, преобразуемое ЧП в диапазон частот 0 — 120 Гц. ГЭД — высокомоментный 12-фазный СДПМ в герметичном корпусе с воздушно-водяным охлаждением и редуктором. $\eta_{КСЭУ}$ в диапазоне частот вращения 30 — 100 % номинальной составляет 94 — 96,5 %. Для компенсации потерь мощности на валах из-за износа и обрастания используется система мониторинга момента ГЭД и адаптивный регулятор мощности ВРК. Предусмотрен режим экономичного хода на переменных оборотах с автоматическим поддержанием оптимальной загрузки ГТУ по минимуму удельного расхода. Прогнозный $\eta_{КСЭУ}$ (с учетом КУ и ПТУ) на номинальном режиме составляет 57,2 % при расходе газового топлива 73,8 т/сут. Выбросы CO_2 при сжигании 10 % метанола не превысят 176 т/сут, среднеэксплуатационные выбросы NO_x — 10 ppm (при норме 20 ppm по циклу E2/E3 ИМО). Для компоновки в МКО 2 ГТУ, редукторных приводов ВРК и электротехнического оборудования требуется машинное отделение (МО) следующих размеров: $L = 15\text{ м}$, $H = 10\text{ м}$, $B = 25\text{ м}$.

Вариант 2. Единая электроэнергетическая установка на базе 1×ГТД с рекуперацией тепла ОГ мощностью 18 МВт, утилизационного контура на НРТ (пентан) мощностью 3 МВт и Li-ion АБ емкостью 15 МВт·ч (см. рис. 6). Двигатель — ВПМ на ПМ суммарной мощностью 18 МВт. Особенности ГТУ: степень повышения давления в компрессоре $P_k = 28$, температура газов перед турбиной $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, η_e 48 % (ISO). Регенератор — пластинчато-ребристый воздухоподогреватель из металлокерамики с развитой поверхностью (площадь теплообмена 3500 м^2) и коэффициентом рекуперации 0,85 — 0,9. Воздушный тракт высокого давления и горячие узлы турбины (С1 — С2) выполнены на основе высокотемпературных керамических композитов SiC/SiC.

Бандажные полки рабочих лопаток С1 турбины — монокристаллический сплав ВКНА-25 с термобарьерным покрытием NiAl/YSZ. Ресурс керамической турбины до замены узлов горячего тракта 50 тыс. ч. КС трубчато-кольцевая многофорсуночная с управляемой закруткой потока в жаровой трубе и термоакустическими пульсациями давления. Аксиальные завихрители на форсунках обеспечивают тангенциальную подкрутку потока с образованием зон обратных токов (вихрь Бюржерса). Турбулизация пристенного слоя и

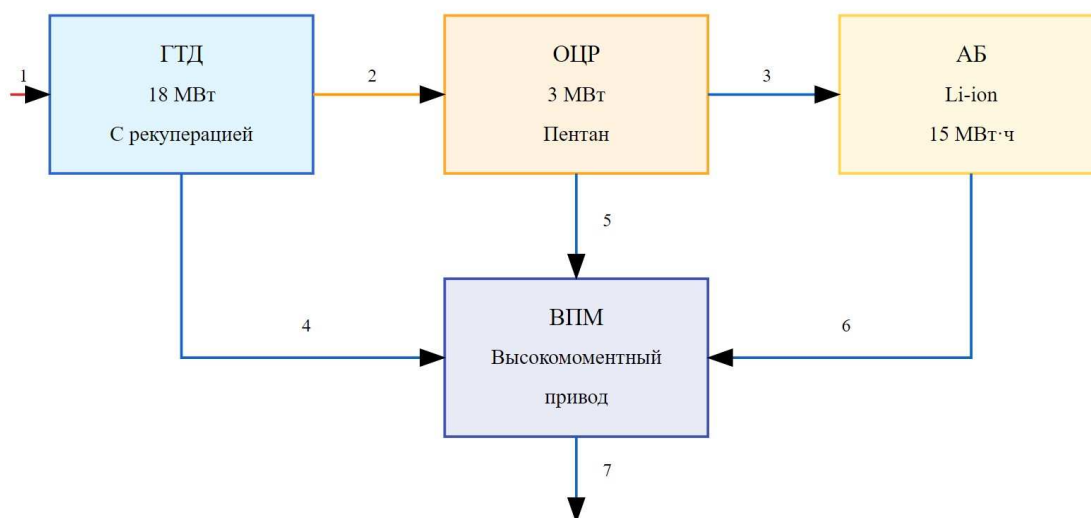


Рис. 6. Принципиальная схема КСЭУ, вариант 2:

1 — поддача топлива; 2 — выпуск отработанных газов; 3 — поддача электроэнергии (ОЦР-АБ); 4 — поддача электроэнергии (ГТД-ВПМ); 5 — поддача электроэнергии (ОЦР-ВПМ); 6 — поддача электроэнергии (АБ-ВПМ); 7 — механическая энергия

рециркуляция продуктов сгорания к фронту горения способствует стабилизации процесса и снижению эмиссии NO_x до 50 ppm при сжигании СПГ/метанола без впрыска пара или воды. Многотопливная система питания обеспечивает работу ГТД на СПГ и метаноле в любых пропорциях в зависимости от наличия бункера. Предусмотрен резервный газойль для растопки КС при запуске и в аварийных режимах. Газовое топливо из криогенных танков СПГ подается в КС под давлением 2 — 3 МПа после испарения и подогрева до 100 — 120 °С в газовом нагревателе. Впрыск метанольного топлива в аксиальные форсунки обеспечивает гомогенизацию факела и позволяет форсировать параметры.

Утилизационный контур представляет замкнутую систему на органическом теплоносителе (пентан) паротурбинного цикла с температурой кипения 175 °С, давлением 3 МПа и расходом рабочего тела до 12 кг/с. При начальной температуре 300 °С и конечной 90 °С термический η цикла Ренкина составит 21 %. Турбина радиальная одноступенчатая с частотой вращения ротора до 30 000 об/мин. Рекуператор и конденсатор — кожухотрубные аппараты интенсифицированной теплопередачи на профилированных трубках из нержавеющей стали. Система хранения энергии — Li-ion АБ емкостью 15 МВт·ч с жидкостным контуром термостатирования. Предельная 30-минутная мощность системы накопителей 5 МВт. Буферная АБ позволяет реализовать режим динамического позиционирования с поддержанием курса и координат судна в 5-балльном шторме без использования основных движителей. В штатных условиях АБ работает в качестве активного фильтра, компенсирующего провалы и выбросы напряжения бортовой сети. Единый гребной электродвигатель — многополюсный СДПМ оригинальной конструкции с возбуждением от ВПМ на основе сплава NdFeB. Обмотки статора — алюминиевый сплав с керамическим наполнением Al-SiC. Воздушный зазор увеличен до 10 — 15 мм за счет бандажирования ротора высокопрочным композитом. Принудительное жидкостное охлаждение с прокачкой теплоносителя (вода-гликоль) через каналы в пазах и внутренний теплообменник. Момент страгивания ГЭД 200 кН·м при номинальной частоте вращения 120 об/мин. η на переменных режимах 92 — 97 % (30 — 110 % $N_{\text{ном}}$). В качестве движителя применяется нерегулируемый ВФШ с лопастями саблевидной формы из полимерного композита (ПКМ). Ступица ВФШ — биметаллическая облегченная конструкция (титановый сплав + бронза). Редуктор с двухпоточной передачей — одноступенчатый планетарный на базе зубчатых колес из высокопрочной нитроцементованной стали. Валопровод от ГЭД к ВФШ — композитный вал из углеволокна со сферическими шарнирами в опорах и сальниковых уплотнениях.

Расчетный η ГТУ-ОРЦ установки на номинальном ходу достигает 58,4 % при удельном расходе топлива (СПГ/метанол) 65,2 т/сут. Ожидаемые выбросы CO_2 в атмосферу — 147 г/кВт·ч или 2,25 г/т-миля. При номинальной нагрузке уровень эмиссии NO_x не превысит 5 ppm без селективного каталитического восстановления. Массогабаритные показатели варианта 2 КСЭУ позволяют разместить основное оборудование в МО с размерениями: 50 × 25 × 20 м.

Вариант 3. КСЭУ на базе замкнутого газотурбинного цикла с гелиево-неоновым рабочим телом и промежуточным теплообменником-утилизатором, приводящая 2 ВРК через планетарные редукторы (см. рис. 7). Основа цикла — 2 ГТУ замкнутого контура (мощностью 12 МВт каждая) и бинарная металлгидридная



Рис. 7. Принципиальная схема КСЭУ, вариант 3:

1 — подача топлива; 2 — теплоноситель (ГТУ — Теплообменник); 3 — теплоноситель (Теплообменник — Бинарная установка); 4 — механическая передача (ГТУ — Редукторы); 5 — механическая передача (Редукторы — ВРК); 6 — подача электроэнергии (ВРК — СК); 7 — подача электроэнергии (Бинарная установка — СК); 8 — утилизация тепла

установка на тяжелых углеводородах (УВ) мощностью 1 МВт. Гелиево-неоновая смесь (Ne/He) с молярной долей гелия 0,8 совершает полужамкнутый термодинамический цикл в ГТУ с промежуточным теплообменом $Q = 40$ МВт. Особенности цикла: степень сжатия в многоступенчатом центробежном компрессоре, начальная температура газа перед турбиной $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход смеси 42 кг/с. Система замкнутого охлаждения обеспечивает $t_{\text{вх}}$ на входе в ТО $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении 2,4 — 2,8 МПа.

Высокотемпературный компактный пластинчатый ТО-регенератор на основе керамического композита C/SiC. Конструктивное исполнение — модульный кожухотрубный многоходовый аппарат с U-образными трубками $\varnothing 1 — 2$ мм и щелевидными каналами малого сечения (0,8 — 1,5 мм). Материалы трубок — карбидкремниевая керамика 3-го поколения (Tyranno SA, Sylramic) и легированный сплав FeCrAl. Для интенсификации теплообмена применяется профилирование теплопередающей поверхности регулярными выступами типа «конический винт». Прогнозный коэффициент теплопередачи ТО — 600 — 800 Вт/м²К при $\lambda_s = 180 — 240$ Вт/мК. Турбина осевая 5-ступенчатая с частотой вращения ротора 15 — 18 тыс. об/мин. Рабочие и сопловые лопатки первых 3 ступеней — литьевые из монокристаллического сплава ВКНА-4У. Охлаждение рабочих лопаток С1 — конвективное петлевое и пленочное из наружных продольных щелей. Внедрение керамических композитов SiC/SiC в конструкцию С1 — С3 позволило достичь $T_f^* = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ при ресурсе 45 — 50 тыс. ч.

Расчетный η турбины 92 % с учетом просечек и утечек в лабиринтах. Регулируемый сопловой аппарат 1 ступени с изменением угла установки профиля в диапазоне ± 15 град. Таким образом осуществляется управление расходом и давлением гелий-неонового контура в зависимости от нагрузки ГТД. Привод механизма поворота — высокомоментный шаговый электродвигатель с волновой передачей и датчиком положения ротора. Уплотнения в системе замкнутого цикла — сухого газодинамического типа с минимальными утечками теплоносителя. Концевые уплотнения турбины и компрессора — лунковые газостатические подшипники, работающие в режиме газовой смазки за счет дросселируемого перепада давлений. Общие потери на трение, протечки и тепловые утечки через изоляцию не превышают 5 — 7 % теплоподвода в цикле. В качестве привода электрогенератора используется одновальная компоновка с зубчатым редуктором, понижающим частоту вращения турбины до 3000 об/мин (энергетический режим). ГЭД — бесконтактная многополюсная электрическая машина с возбуждением постоянными магнитами (СДПМ) мощностью 2×12 МВт. Интегральный η электропривода с учетом потерь в обмотках и магнитопроводе составляет 97 — 98 %. Система возбуждения — комбинированная с постоянными магнитами ротора из сплава NdFeB и электромагнитами статора с векторным управлением от ПЧ. Бинарный контур на тяжелых УВ (изобутан, пропан) используется для конверсии сбросной теплоты ОГ ($500 — 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) в механическую работу газотурбинного агрегата (ГТА) мощностью 1 МВт. Особенностью схемы является применение компактного пластинчатого парогенератора из нержавеющей стали, в котором происходит испарение жидкого изобутана при давлении 4 МПа и температуре $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ за счет теплоты ОГ ГТУ. Образовавшийся газ совершает работу расширения в турбине ГТА, после чего конденсируется в КНД водяного охлаждения и возвращается в контур бинарного цикла. Рабочее тело бинарного цикла — смесь тяжелых УВ с температурой кипения в диапазоне $200 — 400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Возможно применение в качестве рабочих тел нетрадиционных теплоносителей (силиконовые масла, ионные жидкости, расплавы солей и металлов). Термодинамические параметры вторичного контура: $P_o = 4$ МПа, $T_o = 350$ °С, $P_k = 0,4$ МПа, расход РТ 8 кг/с. При этом обеспечивается электрическая мощность ГТА 1 МВт (η 15 — 18 %) и рекуперация до 80 % теплоты уходящих газов ГТУ. Суммарный $\eta_{КСЭУ}$ достигает 60,8 % на номинальном режиме нагрузки при $t_{нв} = 15$ °С. Удельный расход условного топлива (дизтопливо, синтетич. жидкие УВ) — 57,6 т/сут или 140 г/кВт·ч. За счет высокой полноты сжигания и отсутствия связанного азота в топливе обеспечивается минимальный уровень эмиссии NO_x и CO (0,4 — 0,5 ppm). Выбросы CO_2 в расчете на 1 т дедвейта и милю пройденного пути — 115 г/т·км (на 60 % ниже уровня современных СЭУ). Высокие массогабаритные показатели установки позволяют разместить основное оборудование замкнутого контура в МКО ограниченного объема. Прогнозная удельная масса КСЭУ — 4,5 кг/кВт при суммарном объеме оборудования 520 — 550 м³ (удельный объем 0,022 м³/кВт). Для монтажа, обслуживания и замены узлов ГТУ предусмотрены съемные элементы МКО.

Вариант 4. Единая электроэнергетическая установка на базе 1 × ГТУ простого цикла мощностью 12 МВт, дизель-генератора на СПГ (6 МВт) и аммиачной модульной энергоустановки (МЭУ) с электролизером воды мощностью 3 МВт. Теплота уходящих газов ГТУ утилизируется в водоводородном парогенераторе (ПГ) для питания МЭУ (см. рис. 8). Движители — 2 ВРК типа Azipod с приводом от СДПМ по 11,2 МВт. Основные параметры ГТУ: $P_k = 25$, $T_r = 1350$ °С, расход воздуха 42 кг/с, η_e 40 %. КС трубчато-кольцевая многофорсуночная с отдельной подачей топливных компонентов.

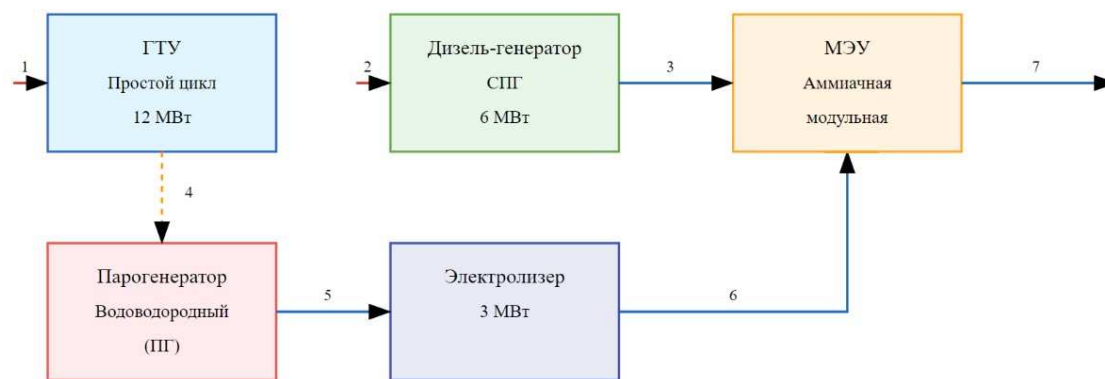


Рис. 8. Принципиальная схема КСЭУ, вариант 4:

1 — подача топлива (ГТУ); 2 — подача СПГ (Дизель-генератор); 3 — подача электроэнергии (Дизель-генератор — МЭУ); 4 — отработавшие газы (ГТУ — ПГ); 5 — подача пара (ПГ — Электролизер); 6 — подача водорода (Электролизер — МЭУ); 7 — подача электроэнергии на азиподы

Газообразный аммиак (NH_3) из криогенных танков хранения смешивается с воздухом высокого давления в аксиальных завихрителях перед форсунками. Процесс воспламенения и стабилизации пламени инициируется комбинированной системой зажигания (высоковольтный разряд + лазер). Интенсивная закрутка потока (число Россби 0,5 — 1,0) способствует выравниванию температурного поля и снижению эмиссии NO_x до 1 — 5 ppm. Материалы «горячей части» ГТ: монокристаллы 5-го поколения (лопатки С1 — С2), керамические и металлокерамические композиты (жаровая труба, соплово-диафрагменный аппарат, корпуса турбин). Воздушный компрессор — 16-ступенчатый осевой с промежуточным охлаждением и программным регулированием угла установки РЛ в функции нагрузки ГТД. η_e компрессора — 88 — 90 % во всем диапазоне режимов. Редуктор — планетарный 2-ступенчатый, расчетный ресурс зубчатых зацеплений 40 — 45 тыс. ч. Привод ГЭД осуществляется от полупроводникового преобразователя частоты с ШИМ (диапазон рабочих частот 5 — 70 Гц). Номинальные обороты ГЭД 500 об/мин. Для компенсации износа зубчатых передач и падения напора ВРК предусмотрен асинхронный режим ГЭД с частотой вращения до 750 об/мин. Резервный дизель-генератор судовой мощностью 6 МВт работает на СПГ по газодизельному циклу. При этом в цилиндры ДВС подается пилотная порция диз. топлива (10 — 15 % по теплоте) для воспламенения обедненной метановоздушной смеси. Это позволяет снизить эмиссию NO_x до уровня Tier III при степени сжатия 13 — 14. Отличительной особенностью установки является применение углеродно-нейтрального аммиачного топлива, получаемого методом деструктивной перегонки (крекинга) мочевины: $(NH_2)_2CO + H_2O = 2NH_3 + CO_2$ ($T = 400$ — 450 °С). Источником водяного пара для реакции служит высокотемпературный ПГ контактного типа производительностью 4 — 5 т/ч, использующий теплоту ОГ ГТУ и функционирующий по циклу Ренкина.

Необходимый для реакции H_2 получают электролизом части конденсата в щелочном электролизере высокого давления (до 10 МПа). Электролизер пластинчатый фильтр-прессного типа с удельным расходом $4,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 H_2$ при 80°C . Технологическая схема топливподготовки комплексной аммиачной установки (КАУ) включает следующие стадии:

- 1) испарение и перегрев водяного пара до 450°C за счет утилизации тепла ОГ ГТУ (12 МВт) в парогенераторе и пароперегревателе;
- 2) смешивание перегретого пара с расплавом мочевины из бака запаса и нагрев гомогенной смеси в реакторе крекинга до 450°C ;
- 3) высокотемпературное разложение мочевины с получением газообразного аммиака и диоксида углерода;
- 4) конденсация и абсорбция продуктов конверсии водным раствором аммиака при $30 - 40^\circ\text{C}$, отделение CO_2 ;
- 5) ректификация аммиачной воды с получением чистого NH_3 и возвратом H_2O в систему парогенерации;
- 6) подпитка цикла деионизованной водой и товарной мочевиной для компенсации потерь;
- 7) электролитическое получение H_2 из обессоленного конденсата пара, компримирование и аккумулярование водорода. Аммиачный контур — замкнутый с рециркуляцией NH_3 -раствора и периодическим отводом балластного CO_2 . Образующийся «зеленый» H_2 используется в качестве восстановителя для конверсии избыточного CO_2 в метан по реакции Сабатье: $\text{CO}_2 + 4H_2 = \text{CH}_4 + 2H_2O$ (Ni-Cat, $200 - 400^\circ\text{C}$). Полученный метан направляется на сжигание в ГТУ и ДГ, замещая до $2 - 3\%$ топливного газа. Интегральный η энерготехнологической схемы КАУ-ГТУ достигает $56,1\%$ при работе на номинальной нагрузке $22,5 \text{ МВт}$ и температуре наружного воздуха 15°C . Удельный расход условного топлива $152 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$, в том числе NH_3 $134 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$. Средний уровень эмиссии NO_x при сжигании безводного аммиака не превышает 1 ppm (в пересчете на NO_2), удельные выбросы CO_2 в атмосферу — $140 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$ или $2,8 \text{ г/т} \cdot \text{км}$ (в 4 раза ниже, чем у мазутных СЭУ). За счет компактности основного оборудования и блочно-модульного исполнения КАУ прогнозная удельная масса установки составляет $4,8 \text{ кг/кВт}$, объем МКО — 600 м^3 ($25 \times 12 \times 10 \text{ м}$).

Вариант 5. КСЭУ максимальной мощности 34 МВт , реализующая преимущества когенерационного парогазового цикла (ПГУ) в сочетании с ГТУ-ОЦР надстройкой и приводом 4 азиподов (см. рис. 9).

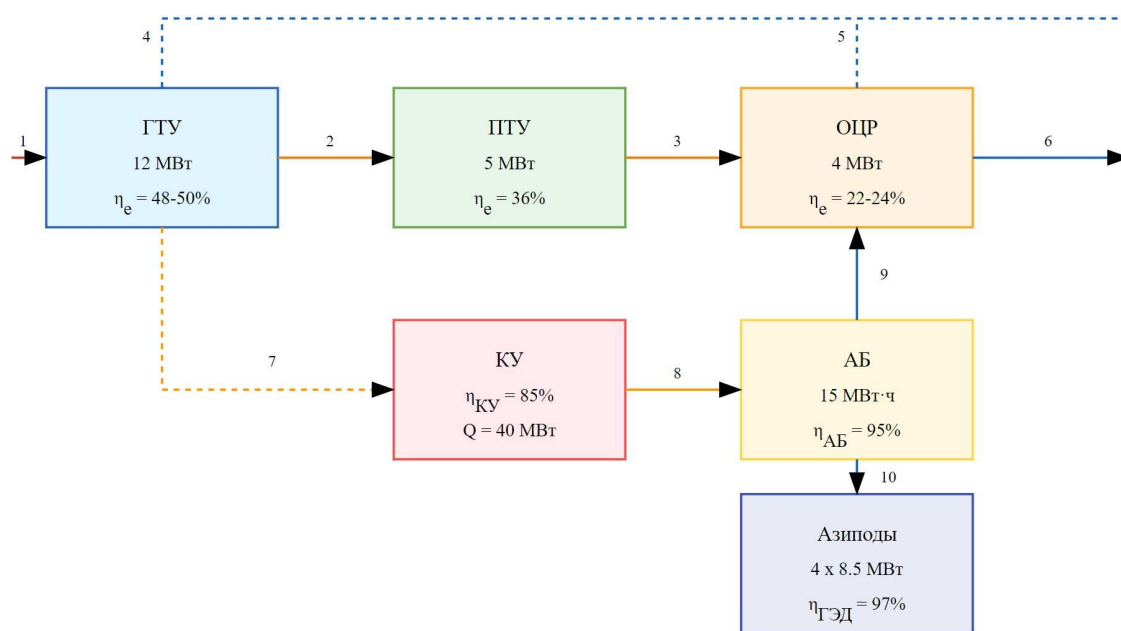


Рис. 9. Принципиальная схема КСЭУ, вариант 5:

- 1 — подача топлива; 2 — подача пара (ГТУ-ПТУ); 3 — подача пара (ПТУ-ОЦР); 4 — охлаждение ГТУ; 5 — охлаждение ОЦР;
6 — электроэнергия (выход); 7 — выпуск отработавших газов; 8 — утилизация тепла; 9 — электроэнергия (АБ-ОЦР);
10 — электроэнергия (АБ-Азиподы)

Основу установки составляют два ГТД по 12 МВт, работающие параллельно с отпуском теплоты в двухконтурную систему утилизации с промперегревом водяного пара (5 МВт) и органического теплоносителя (4 МВт). ГТУ простого открытого цикла с регенерацией теплоты и охлаждаемой турбиной. Номинальные параметры: $P_k=30$; $T_r=1400$ °С; $G_b=48$ кг/с. Воздухоподогреватель — двухступенчатый трубчатый с противотоком.

Эффективность регенерации 0,8 — 0,85 позволяет снизить подводимую теплоту на 10 — 12 % и довести температуру воздуха перед КС до 650 °С. Турбина 4-ступенчатая осевая с частотой вращения ротора 6500 об/мин. Охлаждаемые узлы — С1, С2 (лопатки, бандажи, диски). Схема охлаждения комбинированная — конвективно-пленочная с разделительным дефлектором и многорядной перфорацией. Суммарный расход воздуха на охлаждение 12 — 15 % от G_k . Материалы горячей части ГТ: лопатки и бандажи С1 — керамоматричный композит SiC/SiC; лопатки С2 — монокристаллы ВКНА-4У; диски и силовые элементы турбин — гранулируемые сплавы ЭП741НП, ВЖ159. Керамические элементы статора КС (жаровая труба, смесители, форсунки) — композит Cf/SiC. Применение тугоплавких керамик позволило форсировать начальные параметры ГТУ ($T_r=1450$ °С, $P_k=35$, $\pi_r=5,6$) и повысить η_e до 48 — 50 % без интенсификации системы охлаждения. КС малоэмиссионного типа LPP с многоступенчатой подачей топлива и управляемой закруткой потока. Организация горения бедных предварительно перемешанных ТВС ($\alpha=1,8$ — 2,2) обеспечивает выравнивание температурного поля в зоне горения ($T_{\text{факела}}=1600$ — 1700 К) и снижение эмиссии NO_x до 10 ppm без впрыска воды или пара. Интегрированная в корпус турбины камера дожигания — каталитическая с платино-палладиевым покрытием, обеспечивающая полное окисление СО и СН при $\alpha > 2$. Редуктор приводов ГЭД и ОЦР — планетарный 3-ступенчатый, общий для всех потребителей. Материал зубчатых колес — азотированная цементуемая сталь 20Х2Н4А, срок службы при нагрузке 100 % — 40 000 ч. Электрогенератор — синхронный 2-полюсный с электромагнитным возбуждением и воздушным охлаждением. Питание системы возбуждения — выпрямительная установка с регулированием по $\cos \varphi$ (0,85 — 1,0). Активная мощность генератора 12,5 МВт при $\cos \varphi=0,85$, напряжение 10,5 кВ. Суммарный η генератора с возбуждением — 98,5 %. Паровая турбина — двухцилиндровый агрегат с противодавлением. Начальные параметры пара: $P_o=12$ МПа, $t_o=585$ °С; давление промежуточного перегрева 2,8 МПа, $t_{\text{пп}}=540$ °С. На теплофикационном режиме (отбор пара 110 т/ч) мощность ПТУ 5 МВт, η_e — 36 %.

Конструктивное исполнение проточной части — дисковое, с облегченными лопатками. Валопровод и диски ротора — титановые сплавы системы Ti-6-4. Конденсационная установка отсутствует, весь отработавший пар направляется на теплоснабжение судовых потребителей через редукционно-охлаждающую установку (РОУ). Органический контур надстройки работает по циклу ОРЦ (ORC — Organic Rankine Cycle) на пентане, относящемся к классу «сухих» низкокипящих рабочих тел (НКРТ). Преимуществами пентанового цикла являются высокая удельная работоспособность в зоне умеренных температур (150 — 250 °С), минимальное давление конденсации (0,1 — 0,2 МПа), экологическая безопасность и доступность НКРТ. Испарение пентана осуществляется за счет утилизации тепла отработавшего водяного пара (130 — 150 °С) в кожухотрубном испарителе. Перегретый до 300 °С пар пентана поступает в турбину, где совершает работу расширения с коэффициентом 14 — 16. Турбина радиальная одноступенчатая с частотой вращения ротора 28 000 об/мин.

Материал рабочего колеса и корпуса — кованный титановый сплав ВТ3-1. ОГ после турбины охлаждаются в рекуператоре ($T=90$ — 130 °С) и конденсируются в КНД смешивающего типа, обеспечивая глубину утилизации теплоты (70 — 80 %). Конденсат пентана возвращается в контур через систему регенеративных ПНД. Расчетная мощность пентанового контура 4 МВт при расходе РТ 20 кг/с и давлении 3,5 МПа. η ОРЦ 22 — 24 % позволяет дополнительно утилизировать до 35 % теплоты отработавшего пара ПТУ. Блочная компоновка ОЦР установки предполагает размещение основного оборудования в специальном контейнере на палубе. Таким образом, при параллельной работе ПГУ и ГТУ-ОРЦ в номинальном режиме ($N_g=34$ МВт, $G_r=98$ кг/с, $t_{\text{нв}}=15$ °С, $\alpha=2,1$) ожидаемые показатели энергоэффективности составят: $\eta_{\text{КСЭУ}}$ — 62,4 %, удельный расход условного топлива 48,7 г/кВт·ч. Выбросы CO_2 при сжигании альтернативных газовых топлив (метанол, биогаз) — 95 г/кВт·ч или 2,2 г CO_2 /т-км, что соответствует целевым уровням ИМО-2050 по декарбонизации судоходства. Удельная эмиссия NO_x в цикле Е2/Е3 не превысит 2 г/кВт·ч при норме 3,4 г/кВт·ч для судов постройки после 2016 г. Инновационные технологии в составе интеллектуальной СЭУ.

4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ В СОСТАВЕ КСЭУ

Важным трендом развития судовых энергокомплексов нового поколения является их насыщение интеллектуальными системами адаптивного управления, обеспечивающими оптимизацию нагрузки оборудования и минимизацию затрат топлива в различных режимах эксплуатации. Внедрение технологий «умного судна» и облачной архитектуры систем автоматизации открывает качественно новые перспективы для повышения энергоэффективности флота. В составе рассмотренных вариантов КСЭУ предполагается использование следующих прорывных интеллектуальных технологий и систем.

I. Динамическое позиционирование (ДП) с прогнозированием внешних возмущений на базе ансамблевых алгоритмов машинного обучения (нейронные сети, деревья решений, опорные векторы). Формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы и движители осуществляется с упреждением 15 — 20 с на основе данных от бортовых измерительных средств (тензометрия корпуса, инерциальная навигация, оптические датчики) и внешнего метеомониторинга.

При этом минимизируется целевая функция $Q(x)$ расхода топлива СЭУ при ограничениях в форме равенств и неравенств на курс, положение и скорость судна:

$$Q(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum G_{\text{тг}}(x_i) \rightarrow \min [\varphi_3] \geq \varphi(x) \geq [\varphi_3]; [\lambda_3] \geq \lambda(x) \geq [\lambda_3] \\ [V] \geq V(x) \geq [V], \quad (1)$$

где x_i — нагрузка i -го ДГ;
 $[\varphi_3], [\lambda_3]$ — заданный сектор курсовых и географических координат;
 $[V]$ — диапазон рабочих скоростей в режиме ДП (0,5 — 5 уз);
 $G_{\text{тг}}$ — секундный расход топлива i -го ДГ.

Для обеспечения функции самообучения моделей каскада и определения весовых коэффициентов ансамбля регрессоров используются алгоритмы обучения с подкреплением (reinforcement learning). При этом осуществляется непрерывная адаптация параметров моделей по результатам имитационных прогонов на моделирующем стенде с визуализацией динамики позиционирования в 3D.

II. Оптимальное оперативное планирование рейса и система поддержки принятия решений при маршрутизации судна (СППР) на основе модифицированных алгоритмов роевого интеллекта (муравьиная колония, серые волки). В процессе построения маршрута движения обеспечивается минимизация суммарных затрат энергоресурсов при выполнении рейсового задания:

$$D(s) = \int (x, t) \rho(x, t) dt \rightarrow \min \\ M(s) = T_1 \sum w_i q_i \rightarrow \max, \quad (2)$$

где D, M — целевые функции энергозатрат на движение и коммерческой эффективности рейса;
 $\rho(x, t)$ — интенсивность расхода i -го энергоресурса (топливо, электроэнергия) в точке x маршрута на интервале t ;
 q_i — количество i -го груза (TEU, тонн); T_1 — продолжительность кругового рейса; w_i — договорная ставка на i -й груз.

В качестве базовой модели для оперативной оптимизации судовых энергопотоков используется модифицированный оптико-механический алгоритм, имитирующий поведение стаи серых волков (Grey Wolf Optimizer). При этом роль доминантных особей играют варианты маршрута с лучшими значениями фитнес-функции. Каждая особь на текущей итерации уточняет свое положение, приближаясь к α , β и δ доминантам пропорционально расстоянию до них с некоторым случайным коэффициентом:

$$x_1(k+1) = x_1(k) - a|c \cdot x_\alpha - x_1(k)| \\ x_2(k+1) = x_2(k) - a|c \cdot x_\beta - x_2(k)| \\ x_3(k+1) = x_3(k) - a|c \cdot x_\delta - x_3(k)| \\ x(k+1) = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, \quad (3)$$

где: k — номер итерации;
 a, c — коэффициенты;
 x_1, x_2, x_3 — позиции доминантов;
 $x_\alpha, x_\beta, x_\delta$ — лучшие из известных позиций стаи.

Для обеспечения сходимости и интенсификации поиска в окрестности оптимума коэффициенты модели адаптируются с помощью нелинейных функций $a(k)$, $c(k)$. За критерий останова принимается инвариантность лучших маршрутов на протяжении 50 — 100 итераций. Таким образом обеспечивается нахождение близких к оптимальным маршрутов рейса за приемлемое процессорное время (3 — 5 мин на ПК средней мощности).

III. Интеллектуальная система технического менеджмента (ИСТМ) оборудования СЭУ, реализующая функции динамической диагностики, прогнозирования ресурса и автоматизированного планирования ТОиР. Архитектура ИСТМ — многоагентная сервис-ориентированная на базе промежуточного ПО (middleware). Каждому контролируемому механизму ставится в соответствие программный агент, инкапсулирующий алгоритмы машинного обучения. В роли агентов первого уровня выступают цифровые двойники оборудования, обучающиеся на данных встроенных систем объективного контроля (СОК) и мониторинга. Координацию межагентных взаимодействий, маршрутизацию запросов и трансляцию протоколов осуществляет управляющий сервер приложений (Application Server) с микроядерной архитектурой. Алгоритмическое ядро модуля прогнозирования ресурса — ансамбль гибридных моделей машинного обучения, реализующих стратегию «разложения по базису» (stacking generalization).

Обобщение прогнозов базовых прогнозирующих моделей выполняется метамоделью второго уровня, идентифицируемой методом градиентного бустинга (XGBoost). На нижнем уровне иерархии прогнозирующих моделей используются: 1) полносвязные НС прямого распространения (MLP) для аппроксимации зависимостей износа от наработки и нагрузки; 2) одномерные сверточные НС (CNN-1D) для выделения диагностических признаков из потоков «сырых» данных СОК; 3) рекуррентные НС (LSTM) для прогнозирования остаточного ресурса по результатам анализа трендов износа и деградации; 4) случайные леса (Random Forest) для ранжирования диагностических состояний и поиска аномалий в работе; 5) метод опорных векторов (SVM) для регрессионного анализа и определения границ между диагностическими классами.

Базовые модели обучаются независимо на своих подвыборках с оптимизацией гиперпараметров (структура НН, ширина окна свертки, шаг дискретизации, количество деревьев). Агрегирование прогнозов базовых моделей метамоделью второго уровня (XGBoost) обеспечивает повышение точности локализации дефектов и прогнозирования ресурса на 10 — 15 % относительно лучшей из «одиночных» моделей. Особое внимание уделяется разработке Базы Знаний (БЗ) по отказам и предельным состояниям оборудования в формате эталонных диагностических образов. Для пополнения БЗ применяются технологии обработки и понимания данных на основе глубоких генеративно-сопоставительных сетей (GAN), позволяющие имитировать недостающие прецеденты по распознанным шаблонам диагностических состояний. Формирование рекомендаций по оптимальному моменту вывода оборудования в ремонт осуществляется средствами мультиагентной СППР дискретно-событийного типа. Агенты-механизмы, координируя индивидуальные расписания ТОиР, формируют оптимальный по критерию минимизации затрат план вывода ТПА в целом:

$$\sum C_{in}(t_{irep}) \rightarrow \min \quad (4)$$

$$t_{irep} \leq t_{imax}; i = 1, \dots, n,$$

где C_{in} — стоимость ТОиР i -го агрегата в момент t_{irep} ;
 t_{imax} — предельный срок межремонтной наработки;
 n — число агрегатов ТПА.

Разрешение конфликтов между агентами за общие ресурсы обслуживания (ЗИП, персонал, доковые мощности) обеспечивается с помощью протоколов аукционов и согласованных взаимных уступок (кооперативное распределение). Апробация ИСТМ на тестовых сценариях эксплуатации показала снижение затрат на ТОиР на 10 — 15 % при уменьшении трудоемкости планирования в 3 — 5 раз.

IV. Интеллектуальная цифровая система управления посадкой и мореходностью судна. Основные функции системы — динамическое поддержание оптимальной посадки на тихой воде и минимизация качки на волнении путем автоматического управления балластировкой. Алгоритм оптимизации параметров качки базируется на серии полунатурных испытаний самоходной модели с бортовой качкой и использует аналитические модели 2-го порядка, калиброванные по результатам вычислительного (CFD) и физического эксперимента. В качестве критерия используется модифицированный индекс морской болезни (MSI):

$$MSI = 100K[f=0,1)0,0083W(f)fG(x,y,z,t,f)df [\%], \quad (5)$$

где K — коэффициент, зависящий от формы корпуса;
 $W(f)$ — весовая функция частоты f качки;
 G — спектральная плотность вертикального ускорения в заданной точке (x,y,z) .

Ограничения в задаче оптимизации параметров качки формулируются в виде требований к метацентрической высоте, параметрической остойчивости и минимальной площади под кривой восстанавливающего момента. Управление баллаستировкой в режиме стабилизации качки осуществляется с помощью нечеткого регулятора. Функция принадлежности выходов регулятора — треугольная с четырьмя термами. Входы регулятора — бортовой угол крена, угловая скорость качки и относительное ускорение качки. База правил включает 27 продукций типа: ЕСЛИ «Крен большой И Скорость отрицательная И Ускорение малое», ТО «Открыть клапаны на левый борт». Моделирование 6-балльного шторма (волна $h_3 \text{ \%} = 5 \text{ м}$, $T = 9 \text{ с}$) показало снижение индекса MSI на 25 — 30 % и уменьшение амплитуды качки на 40 % при расходе балласта до $700 \text{ м}^3/\text{ч}$. Таким образом обеспечивается безопасная работа экипажа на ходовом мостике и расширяется диапазон допустимых погодных условий для грузовых операций.

V. Система удаленного мониторинга и прогностического управления техническим состоянием (СУТС) КСЭУ, объединяющая возможности традиционных CBM (Condition-Based Maintenance) систем с предиктивной аналитикой больших данных на базе нейросетевого моделирования. Информационное ядро СУТС — хранилище структурированных и слабоструктурированных данных (Информационная шина, ИШ) большой емкости (5 — 10 Тбайт). Первичные потоки диагностической информации собираются от встроенных средств объективного контроля (СОК) с беспроводным интерфейсом (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee): 1) фрагменты «сырых» данных, циклограммы температур, давлений, вибраций, шумов на квазистационарных и динамических режимах; 2) результаты предварительной обработки данных методами машинного обучения (частотно-временной анализ, факторный анализ, низкоразмерная аппроксимация сигналов). На верхнем уровне контроля состояния используются виртуальные анализаторы трендов деградации и виброакустические образы дефектов оборудования, формируемые с помощью технологий машинного обучения, цифровых двойников и моделей цифрового рельефа. Усредненная статистика трендов (по группам судов, однотипным механизмам) накапливается в облачном репозитории и используется для переобучения прогностических моделей и извлечения новых диагностических знаний.

Диспетчерское управление состоянием реализуется с помощью правил нечеткого вывода и концептуально-ориентированных языков (Domain Specific Language), оперирующих специализированными объектами и отношениями предметной области. Пример диагностического правила: ЕСЛИ «Температура_подшипника (i) > Норма И Момент_нагрузки < 0,5 Мном», ТО «Дисбаланс_ротора (i) = Средний». Таким образом обеспечивается прослеживаемый логический вывод с обоснованием диагноза и рекомендациями по ТО. Агрегирование разнородных нечетких оценок состояния в комплексный показатель риска отказа выполняется на основе OWA (Ordered Weighted Averaging) оператора Ягера:

$$Q = W_1 b_1 + W_2 b_2 + \dots + W_n b_n, \quad (6)$$

$$0 \leq b_i \leq 1; \sum W_i = 1; i = 1, \dots, n,$$

где b_i — нечеткие значения частных показателей состояния (температур, давлений, вибропараметров), упорядоченные по степени риска;
 W_i — весовые коэффициенты, настраиваемые методом экспертных оценок.

Результаты работы СУТС — рекомендации по датам и объемам опережающего ТОиР оборудования, отображаемые на НМИ удаленного диспетчерского пульта. Использование предлагаемой системы позволяет минимизировать внеплановые простои СЭУ и затраты на ремонт при обеспечении требуемого уровня надежности, экологичности и эффективности.

5. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ КСЭУ

Для количественной оценки преимуществ КСЭУ с оптимальной интеграцией технологий газотурбостроения, паротурбинных и электрохимических генераторов, ВИЭ и интеллектуальных систем управления разработана высокоуровневая матмодель энергетической установки нефтеналивного судна смешанного плавания типа «Афрамекс» дедвейтом 115 000 т. Постановка задачи оптимизации параметров КСЭУ сформулирована следующим образом: найти вектор проектных характеристик:

$$X = [N_{ГТУ}, P_K, T_{гв}, n_{ГТУ}, S_{ФЭ}, N_{ВИЭ}, N_{АКБ}, Q_{ХТН}, \dots]T,$$

обеспечивающий: 1) максимум КПД энергоустановки $\eta \Sigma(X) \rightarrow \max$; 2) минимум суточного расхода топлива $Вт(X) \rightarrow \min$; 3) минимум выбросов $CO_2(X) \rightarrow \min$; 4) минимум стоимости жизненного цикла $СЖЦТ(X) \rightarrow \min$. При ограничениях: а) на размеры МКО: $G_{МКО}(X) \leq 0$; б) на характеристики ГД и ДГ: $G_{ГДУ}(X) \leq 0$; в) на количество и мощность ГЭД: $G_{ГЭД}(X) \leq 0$; г) на прочность связей и опор: $F_{ПР}(X) \leq 0$; д) на местную и общую вибрацию: $FB(X) \leq 0$; е) на остойчивость судна: $K_{ост} \geq [K_{ост}]$; ж) на надежность ЭУ: $P_{бр}([t]) \geq [P_{бр}]$, — где X — вектор оптимизируемых переменных; $N_{ГТУ}$, $N_{ПТУ}$ — номинальная мощность ГТУ и ПТУ, МВт; $n_{ГТУ}$ — количество ГТУ, ед.; P_K — степень повышения давления в компрессоре ГТУ; $T_{гв}$ — температура газов перед турбиной ГТУ, К; $S_{ФЭ}$ — площадь ФЭП, м²; $N_{ВИЭ}$ — суммарная пиковая мощность ВЭУ и СЭУ, кВт; $N_{АКБ}$ — энергоемкость АКБ, МВт·ч; $Q_{ХТН}$ — массовый расход хладагента в системе ХТН, кг/с.

Модель реализована в среде MATLAB/Simulink на основе иерархического принципа. Подмодели основных подсистем (ГТУ, ПТУ, ДГ, ГЭУ, ТЭГ, ФЭП, ВЭУ) представлены в форме гибридных функциональных блоков S-Function, интегрирующих физико-математическое описание установившихся и переходных режимов. Для обеспечения достоверности результатов моделирования произведена параметрическая идентификация и валидация подмоделей на основе экспериментальных данных по прототипу — танкеру «Афрамекс» «Проспект Гагарина». Результаты верификационных расчетов в сопоставлении с данными натурных испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 5

Верификация модели ГТУ-ЭУ танкера «Проспект Гагарина»

Характеристика	Размерность	Номинал	Модель	Δ , %
Мощность на валопроводе, P_B	кВт	11 880	11 205	–5,7
Частота вращения ВРШ, $n_{ВРШ}$	об/мин	127	132	+3,9
Температура ОГ за ГТУ, $t_{ог}$	°С	500	515	+3,0
Расход воздуха ГТУ, G_B	кг/с	35,2	34,4	–2,3
Расход жидкого топлива, Вт	кг/ч	2500	2600	+4,0
Суммарная эл. мощность ГЭД, $P_{ГЭД}$	кВт	12 500	12 300	–1,6
КПД валопровода, $\eta_{вп}$	—	0,932	0,938	+0,6
КПД ГТУ, $\eta_{ГТУ}$	—	0,362	0,342	–5,5

Как следует из табл. 5, разработанная модель ГТУ-ЭУ обеспечивает удовлетворительное совпадение с результатами испытаний — погрешность по ключевым параметрам не превышает 3 — 5 %. Апробация модели на режимах частичных нагрузок также показала хорошую сходимость — отклонение от экспериментальных зависимостей в диапазоне 50 — 110 % номинала не превысило 2,5 — 3 %. С использованием верифицированной модели выполнена серия оптимизационных расчетов, направленная на поиск рационального сочетания параметров КСЭУ по критериям эффективности, экологичности и стоимости владения. Для решения задачи условной многокритериальной оптимизации применен генетический алгоритм с изменением интенсивности мутаций в функции поколений (Fitness Scaling Adaptive GA). В качестве управляемых параметров использовались: 1) тип, мощность и количество ГТД и ПТУ; 2) характеристики системы охлаждения ГТУ (расход и температура воздуха на входе в компрессор); 3) площадь и η_e фотоэлектрических преобразователей (ФЭП); 4) энергоемкость аккумуляторных батарей (АКБ); 5) мощность гребных электродвигателей (ГЭД); 6) расход органического теплоносителя в системе утилизации. Параметры электростанции были оптимизированы применительно к трем базовым сценариям эксплуатации: 1) работа по расписанию (линейное судно); 2) шаттл-сервис (танкер-накопитель); 3) продленный рейс (круговой маршрут). Усредненные значения основных показателей оптимизированной КСЭУ на базе 5-го концептуального варианта в сравнении с характеристиками СЭУ современных танкеров приведены в табл. 6.

Таблица 6

Расчетные показатели КСЭУ (профиль эксплуатации № 2 — шаттл-сервис)

Показатель	Размерность	Базовая СЭУ	КСЭУ вар. 5	Δ , %
Суммарная эл. мощность ГТУ	МВт	19,6	24,0	+ 22
Мощность ПТУ	МВт	2,4	5,0	+ 108
Мощность ОЦР утилизации	МВт	—	4,0	> 200
Суммарная мощность ВИЭ	кВт	—	500	> 200
Емкость накопителя (АКБ)	МВт·ч	—	6	> 200
КПД КСЭУ, $\eta_{КСЭУ}$	%	52	62,4	+ 20
Удельный расход топлива	г/кВт·ч	165	150	— 9
Выбросы CO_2	г/т·милля	4,2	2,2	— 48
Выбросы NO_x	г/кВт·ч	2,2	0,8	— 64
Стоимость жизненного цикла	млн. \$	181	193	+ 7

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Применение инновационных газотурбинных и электрохимических технологий в составе КСЭУ мегаваттного класса обеспечивает кардинальное повышение топливной эффективности (на 20 % и более) и экологичности (сокращение выбросов CO_2 до 50 %, NO_x до 70 %) при приемлемом росте капитальных затрат.

Ключевыми факторами энергоэффективности являются форсирование параметров термодинамического цикла ГТУ, глубокая утилизация вторичных энергоресурсов (до 50 % теплоты ОГ), электрификация судовых потребителей, применение ВИЭ и систем аккумулирования.

Наиболее перспективным представляется вариант гибридной КСЭУ на базе ГТУ/ПТУ комбинированного цикла с регенерацией теплоты, парогазовой надстройкой и параллельной утилизационной ОЦР-турбиной, обеспечивающий достижение η_e 60 % + в широком диапазоне нагрузок.

Внедрение интеллектуальных систем автономной навигации, динамического позиционирования и адаптивного управления СЭУ позволяет дополнительно сократить удельный расход топлива на 3 — 5 % и повысить коэффициент готовности механизмов до 0,97 — 0,98.

При благоприятной рыночной конъюнктуре дисконтированный срок окупаемости проектов строительства судов с КСЭУ нового поколения составит 7 — 8 лет при внутренней норме рентабельности инвестиций IRR на уровне 12 — 14 %.

ВЫВОДЫ

Выполненные расчетные исследования подтверждают перспективность применения инновационных газотурбинных технологий 5-го поколения в составе КСЭУ судов класса «Афрамекс» (см. рис. 10).

МАТЕРИАЛЫ

Монокристаллические сплавы (T_r до 1400°C)	Керамические композиты SiC/SiC (T_r до 1600°C)	Гибридные материалы (T_r > 1700°C)
--	--	--

КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Малозмиссионные КС (NO_x < 50 ppm)	Каталитические КС (NO_x < 10 ppm)	Гибридные КС с H_2 (NO_x < 5 ppm)
--	---	---

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Предиктивная аналитика (η_e = 45%)	AI-оптимизация режимов (η_e = 55%)	Полностью автономное управление (η_e > 60%)
---	---	--

ЦЕЛЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ 2050: η_e > 60%, NO_x < 5 ppm, ресурс > 50 тыс. ч, CAPEX < 1000 \$/кВт

2024

2030

2040

2045

2050

Рис. 10. Дорожная карта развития ГТУ до 2050 г.

Использование высокотемпературных ГТУ и ГТД на керамических композитах и монокристаллических сплавах с начальной температурой 1400 — 1600 °С открывает качественно новые возможности повышения эффективности термодинамического цикла за счет регенерации теплоты, промежуточного охлаждения, парогазовых и органических надстроек. Интеллектуализация систем автоматического управления, мониторинга технического состояния и поддержки принятия решений обеспечивает оптимизацию режимов и маршрутизацию энергопотоков КСЭУ в зависимости от профиля эксплуатации и внешних условий.

Результаты многокритериальной оптимизации параметров перспективных КСЭУ свидетельствуют о возможности достижения рекордных значений топливной эффективности (η_e 60 — 62 %) при кратном снижении вредных выбросов и углеродного следа каботажных перевозок. Ключевыми научно-техническими проблемами создания интеллектуальных КСЭУ являются: 1) обеспечение прочности и ресурса узлов горячего тракта ГТД; 2) повышение эффективности ЭХГ, ВИЭ и систем хранения энергии; 3) разработка методологии управления безэкипажным судном.

Для обеспечения технологического лидерства и конкурентоспособности отечественного судостроения на глобальном рынке необходим комплекс мер государственной поддержки и стимулирования инновационной активности предприятий отрасли, включая:

- разработку и реализацию целевых научно-технических программ по созданию судовых ГТУ и ГТД нового поколения на основе инновационных технологий в области высокотемпературного материаловедения, конструкционной прочности, горения и теплообмена. Приоритетными направлениями исследований должны стать керамические и металлокерамические композиты для узлов горячего тракта, аддитивные методы производства лопаток и дисков турбин, технологии каталитически стабилизированного горения, малоэмиссионные камеры сгорания, высокоэффективные регенераторы и воздухоподогреватели;

- интенсификацию фундаментальных и прикладных исследований по ключевым компонентам автономных судовых энергокомплексов — твердооксидным и расплавкарбонатным топливным элементам, электрохимическим накопителям большой емкости, фотоэлектрическим преобразователям концентраторного типа, ветроэнергетическим установкам с вертикальной осью вращения. Особое внимание следует уделить повышению удельных характеристик, снижению стоимости и увеличению ресурса функциональных материалов и компонентов — электролитов, электродов, мембран, фотоэлементов, редокс-аккумуляторов;

- разработку методологии системной интеграции и оптимального управления гетерогенными энергокомплексами судов нового поколения на основе мультифизического моделирования, предиктивной аналитики данных, мультиагентных архитектур и адаптивных систем поддержки принятия решений. Ключевые задачи — построение цифровых двойников пропульсивного комплекса и судна в целом, интеллектуализация систем автономной навигации, динамического позиционирования и мониторинга технического состояния, создание бортовых информационно-управляющих комплексов на принципах сервис-ориентированной архитектуры;

- формирование системы опережающей подготовки и непрерывного повышения квалификации кадров для судостроительной промышленности в области газотурбостроения, электрохимической энергетики, силовой электроники, программируемой логики, технологий машинного обучения и предиктивной аналитики. Совершенствование учебно-лабораторной и стендовой базы профильных вузов и научных центров, интенсификация программ академической мобильности, расширение партнерских связей между университетами, КБ и НИ-И, судостроительными и машиностроительными предприятиями;

- совершенствование нормативно-правовой базы и регуляторной среды в части стимулирования перехода судоходных компаний на использование экологичных видов топлива и энергосберегающих технологий. Внедрение системы квотирования и торговли выбросами парниковых газов, дифференцированных портовых сборов и налоговых льгот для судовладельцев, эксплуатирующих суда с высоким уровнем энергоэффективности и низким углеродным следом. Гармонизация национальных стандартов и правил с перспективными требованиями ИМО в области энергоэффективности, экологичности и безопасности судоходства.

Реализация предложенного комплекса мер позволит создать благоприятные условия для опережающего инновационного развития отечественного судостроения, обеспечить технологическое лидерство на мировом рынке морских перевозок и внести существенный вклад в достижение целей устойчивого развития и декарбонизации судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ REFERENCES

1. Третье исследование ИМО о выбросах парниковых газов. — 2014.
2. Первоначальная стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов. МЕРС 72/17/Add.1, Приложение 11. — 2018.
3. Пересмотренная стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов. МЕРС 80/15/Add.1. — 2023.
4. DNV GL. Energy Transition Outlook 2020: Maritime Forecast to 2050. — 2020.
5. Welaya Y.M.A. A comparison between fuel cells and other alternatives for marine electric power generation / Y.M.A. Welaya, M.M. El Gohary, N.R. Ammar // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. — 2011. — Т. 3. — № 2. — P. 141 — 149.
6. Baldi F. et al. Improving ship energy efficiency through a systems perspective: PhD thesis / F. Baldi; Chalmers Tekniska Högskola. — Göteborg, 2013. — 135 p.
7. ABS. Setting the Course to Low Carbon Shipping. Outlook 2030. — 2019.
8. LR. Techno-Economic Assessment of Zero-Carbon Fuels. — 2020.
9. GE Power Conversion. Marine Electric Propulsion Systems. — 2019.
10. Le-ol A.K. Integrated stochastic approach for instantaneous energy performance analysis of thermal energy systems / A.K. Le-ol, S. Adumene, D.S. Aziaka, M. Yazdi, J. Mohammadpour // *Energies*. — 2025. — Vol. 18(1). — P. 160.
11. Kyriakidis F. Modeling and optimization of integrated exhaust gas recirculation and multi-stage waste heat recovery in marine engines / F. Kyriakidis, K. Sørensen, S. Singh, T. Condra // *Energy Conversion and Management*. — 2017. — Vol. 151. — P. 286 — 295.
12. Altosole M. Simulation and performance comparison between diesel and natural gas engines for marine applications / M. Altosole, G. Benvenuto, U. Campora, M. Laviola et al. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. — 2017. — Vol. 231(2). — P. 690 — 704.
13. Saha A.K. Blade tip leakage flow and heat transfer with pressure-side winglet / A.K. Saha, S. Acharya, R. Bunker, C. Prakash // *International Journal of Rotating Machinery*. — 2006(3). — 17079.
14. Horlock J.H. Limitations on gas turbine performance imposed by large turbine cooling flows / J.H. Horlock, D.T. Watson, T.V. Jones // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. — 2001. — Vol. 123(3). — P. 487 — 494.
15. Lefebvre A. Gas turbine combustion: Alternative fuels and emissions. 3rd ed. / A. Lefebvre, D.R. Ballal. — CRC Press, 2010. — 537 p.
16. Liu Y. Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines / Y. Liu, X. Sun, V. Sethi, D. Nalianda et al. // *Progress in Aerospace Sciences*. — 2017. — Vol. 94. — P. 12 — 45.
17. Ulfesnes R.E. Modelling and simulation of transient performance of the semi-closed O₂/CO₂ gas turbine cycle for CO₂-capture / R.E. Ulfesnes, O. Bolland, K. Jordal // *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. — 2003. — T. 3686. — P. 65 — 74.
18. Altosole M. High efficiency waste heat recovery solutions for naval applications / M. Altosole, U. Campora, M. Laviola, R. Zaccone // *Proceedings of 19th International Conference on Ship & Maritime Research. NAV 2018*. — 2018.
19. Haglind F. A review on the use of gas and steam turbine combined cycles as prime movers for large ships. Part I: Background and design / F. Haglind // *Energy Conversion and Management*. — 2008. — Vol. 49(12). — P. 3458 — 3467.
20. Haglind F. A review on the use of gas and steam turbine combined cycles as prime movers for large ships. Part II: Previous work and implications / F. Haglind // *Energy Conversion and Management*. — 2008. — Vol. 49(12). — P. 3468 — 3475.
21. Mondejar M.E. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications / M.E. Mondejar, J.G. Andreasen, L. Pierobon, U. Larsen et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2018. — Vol. 91. — P. 126 — 151.
22. Larsen U. Design and optimisation of organic Rankine cycles for waste heat recovery in marine applications using the principles of natural selection / U. Larsen, L. Pierobon, F. Haglind, C. Gabriellii // *Energy*. — 2013. — Vol. 55. — P. 803 — 812.
23. Andreasen J.G. A comparison of organic and steam Rankine cycle power systems for waste heat recovery on large ships / J.G. Andreasen, A. Meroni, F. Haglind // *Energies*. — 2017. — Vol. 10(4). — 547.
24. Kalikatzarakis M. Multi-criteria selection and thermo-economic optimization of Organic Rankine Cycle system for a marine application / M. Kalikatzarakis, C.A. Frangopoulos // *International Journal of Thermodynamics*. — 2015. — Vol. 18(2). — P. 133 — 141.
25. Song J. Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines / J. Song, Y. Li, C.W. Gu, L. Zhang // *Energy*. — 2015. — Vol. 82. — P. 976 — 985.
26. Shu G. Operational profile based thermal-economic analysis on an Organic Rankine cycle using for harvesting marine engine's exhaust waste heat / G. Shu, P. Liu, H. Tian, X. Wang et al. // *Energy Conversion and Management*. — 2017. — Vol. 146. — P. 107 — 123.
27. Armellini A. Evaluation of gas turbines as alternative energy production systems for a large cruise ship to meet new maritime regulations / A. Armellini, S. Daniotti, P. Pinamonti, M. Reini // *Applied Energy*. — 2018. — Vol. 211. — P. 306 — 317.
28. Senary K. Development of a waste heat recovery system onboard LNG carrier to meet IMO regulations / K. Senary, A. Tawfik, E. Hegazy, A. Ali // *Alexandria Engineering Journal*. — 2016. — Vol. 55(3). — P. 1951 — 1960.
29. Shu G. A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships / G. Shu, Y. Liang, H. Wei, H. Tian et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2013. — Vol. 19. — P. 385 — 401.
30. Baldi F. Optimal load allocation of complex ship power plants / F. Baldi, F. Ahlgren, F. Melino, C. Gabriellii et al. // *Energy Conversion and Management*. — 2016. — Vol. 124. — P. 344 — 356.
31. Geertsma R.D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments / R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman // *Applied Energy*. — 2017. — Vol. 194. — P. 30 — 54.
32. Shih N.C. Development of a 20 kW generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles / N.C. Shih, B.J. Weng, J.Y. Lee, Y.C. Hsiao // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2014. — Vol. 39(25). — P. 13894 — 13901.
33. Yan Y. Multi-objective design optimization of combined cooling, heating and power system for cruise ship application / Y. Yan, H. Zhang, Y. Long, Y. Wang et al. // *Journal of Cleaner Production*. — 2019. — Vol. 233. — P. 264 — 279.
34. Baldi F. Energy and exergy analysis of ship energy systems — The case study of a chemical tanker / F. Baldi, H. Johnson, C. Gabriellii, K. Andersson // *International Journal of Thermodynamics*. — 2015. — Vol. 18(2). — P. 82 — 93.
35. Geertsma R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion / R. Geertsma, M. van der Knaap, K. Visser, R. Negenborn // *Applied Energy*. — 2018. — Vol. 228. — P. 2490 — 2509.
36. Nuchturee C. Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships — A review / C. Nuchturee, T. Li, H. Xia // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2020. — Vol. 134. — 110145.

37. Ancona M.A. Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization / M.A. Ancona, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini et al. // *Energy Conversion and Management*. — 2018. — Vol. 164. — P. 42 — 58.
38. Sorrentino V. Experimental and numerical investigation of air lubrication on a planing hull with Double Interceptor System / V. Sorrentino, R. Pigazzini, F. De Luca, S. Mancini, C. Pensa // *Ocean Engineering*. — 2025. — Vol. 319. — 120135.
39. Dimopoulos G.G. A general-purpose process modelling framework for marine energy systems / G.G. Dimopoulos, C.A. Georgopoulou, I.C. Stefanatos, N.M.P. Kakalis // *Energy Conversion and Management*. — 2014. — Vol. 86. — P. 325 — 339.
40. Ahlgren F. Waste heat recovery in a cruise vessel in the Baltic Sea by using an organic Rankine cycle: A case study / F. Ahlgren, M.E. Mondejar, M. Genrup, M. Thern // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. — 2015. — Vol. 138. — 011702.
41. Fisher R. Innovative waste heat valorisation technologies for zero-carbon ships — A review / R. Fisher, L. Ciappi, P. Niknam, K. Braimakis et al. // *Applied Thermal Engineering*. — 2024. — Vol. 253. — 123740.
42. Singh D.V. A review of waste heat recovery technologies for maritime applications / D.V. Singh, E. Pedersen // *Energy Conversion and Management*. — 2016. — Vol. 111. — P. 315 — 328.
43. Rohkamp M. Gaseous and particulate matter (PM) emissions from a turboshaft-engine using different blends of sustainable aviation fuel (SAF) / M. Rohkamp, A. Rabl, J. Bendl, C. Neukirchen et al. // *Aerosol Science and Technology*. — 2024. — Vol. 59(1). — P. 111 — 126.
44. van Biert L. A review of fuel cell systems for maritime applications / L. van Biert, T. Woudstra, M. Godjevac, K. Visser et al. // *Journal of Power Sources*. — 2016. — Vol. 327. — P. 345 — 364.
45. Sapra H. Experimental and simulation-based investigations of marine diesel engine performance against static back pressure / H. Sapra, M. Godjevac, K. Visser, D. Stapersma et al. // *Applied Energy*. — 2017. — Vol. 204. — P. 78 — 92.
46. Wang K. Computational fluid dynamics-based ship energy-saving technologies: A comprehensive review / K. Wang, Z. Li, R. Zhang, R. Ma et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2025. — Vol. 207. — 114896.
47. Dedes E.K. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping / E.K. Dedes, D.A. Hudson, S.R. Turnock // *Energy Policy*. — 2012. — Vol. 40. — P. 204 — 218.
48. Jeong B. Evaluation of the lifecycle environmental benefits of full battery powered ships: Comparative analysis of marine diesel and electricity / B. Jeong, H. Jeon, S. Kim, J. Kim et al. // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 8(8). — 580.
49. Artificial intelligence and machine learning applications for sustainable development / ed. by A.J. Singh, N. Gupta, S. Kumar, S. Sharma et al. — CRC Press, 2025. — 276 p.
50. Roux M. A review of life cycle assessment studies of maritime fuels: Critical insights, gaps, and recommendations / M. Roux, C. Lodato, A. Laurent, T.F. Astrup // *Sustainable Production and Consumption*. — 2024. — Vol. 50. — P. 69 — 86.
51. Zhu J. High temperature ceramic matrix composites for aerospace applications / J. Zhu, L. Cheng, X. Xu // *Composites Part B: Engineering*. — 2021. — Vol. 216. — 108829.
52. Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview / R. Naslain // *Composites Science and Technology*. — 2004. — Vol. 64(2). — P. 155 — 170.
53. Gibson I. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing / I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker. — New York: Springer, 2015. — 498 p.
54. Kumar M. Prospects of ceramic matrix composites in engineering and commercial applications / M. Kumar, C. Devi, M. Hemath, S. Mandol et al. // *Applications of Composite Materials in Engineering* / ed. by M. Puttegoda, T.G.Y. Gowda, J.S. Binoj, S.M. Rangappa et al. — Elsevier Science Ltd, 2025. — P. 419 — 436.
55. Pollock T.M. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure and properties / T.M. Pollock, S. Tin // *Journal of Propulsion and Power*. — 2006. — Vol. 22(2). — P. 361 — 374.
56. Padture N.P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion / N.P. Padture // *Nature Materials*. — 2016. — Vol. 15. — P. 804 — 809.
57. Reed R.C. The superalloys: Fundamentals and applications / R.C. Reed. — Cambridge: Cambridge University Press, 2006. — 372 p.
58. Yeh J.W. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes / J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, J.Y. Gan et al. // *Advanced Engineering Materials*. — 2004. — Vol. 6(5). — P. 299 — 303.
59. Padture N.P. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications / N.P. Padture, M. Gell, E.H. Jordan // *Science*. — 2002. — Vol. 296(5566). — P. 280 — 284.
60. Kablov E.N. Cast intermetallic alloys for gas turbine engines / E.N. Kablov, O.G. Ospennikova, N.V. Petrushin // *Inorganic Materials: Applied Research*. — 2017. — Vol. 8. — P. 844 — 856.
61. Сорокин О.Ю. Высокотемпературные композиционные материалы с многослойной структурой (обзор) / О.Ю. Сорокин, Б.Ю. Кузнецов, Ю.В. Лунегова, В.С. Ерасов // *Труды ВИАМ*. — 2020. — № 4 — 5 (88). — С. 42 — 53. = Sorokin O.Yu. High-temperature composite materials with a multi-layered structure (review) / O.Yu. Sorokin, B.Yu. Kuznetsov, Yu.V. Lunegova, V.S. Erasov // *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*. — 2020. — No. 4 — 5 (88). — P. 42 — 53. (In Russ.)
62. Han J.-C. Gas turbine heat transfer and cooling technology / J.-C. Han, S. Dutta, S. Ekkad. — Boca Raton: CRC Press, 2012. — 496 p.
63. Bunker R.S. Gas turbine heat transfer: Ten remaining hot gas path challenges / R.S. Bunker. — Southampton: WIT Press, 2008. — 217 p.
64. Gu D. Laser additive manufacturing of high-performance materials / D. Gu. — Berlin: Springer, 2015. — 311 p.
65. Adapa V.S.K. Insights into the gamma prime precipitation behavior during heat treatment of Additively Manufactured Nickel-based Superalloy / V.S.K. Adapa, S.R. Kalidindi, Ch.J. Saldana // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2025. — 178507.
66. Lefebvre A. Gas turbine combustion: Alternative fuels and emissions / A. Lefebvre, D.R. Ballal. — Boca Raton: CRC Press, 2010. — 537 p.
67. Huang Y., Yang V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion // *Progress in Energy and Combustion Science*. — 2009. — Vol. 35(4). — P. 293 — 364.
68. Lieuwen T. Combustion instabilities in gas turbine engines: Operational experience, fundamental mechanisms, and modeling / T. Lieuwen, V. Yang. — Reston: AIAA, 2005. — 657 p.
69. Law C.K. Combustion in microgravity: Opportunities, challenges and progress / C.K. Law. — AIAA Paper No. 90-0120. — 28th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 1990.
70. Ghenai Ch. Combustion of syngas fuel in gas turbine can combustor // *Advances in Mechanical Engineering*. — 2010. — Vol. 2010. — 342357.
71. Cheekatamarla P.K. Heterogeneous oxidation of hydrogen-natural gas blends in a safe, clean, and efficient burner design / P.K. Cheekatamarla // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2024. — Vol. 61(1). — P. 210 — 215.
72. Khandelwal B. Development of gas turbine combustor preliminary design methodologies and preliminary assessments of advanced low emission combustor concepts: PhD thesis / B. Khandelwal; Cranfield University. — 2012. — 245 p.
73. Dhamrat R.S. Numerical and experimental study of the conversion of methane to hydrogen in a porous media reactor / R.S. Dhamrat, J.L. Ellzey // *Combustion and Flame*. — 2006. — Vol. 144(4). — P. 698 — 709.