

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-93-108

SHIP POWER PLANT WITH RE-LIQUEFACTION INSTALLATION FOR TANKERS TRANSPORTING HYDROGEN

D. V. Koniaev

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

The use of hydrogen as a fuel for tankers carrying liquefied hydrogen is discussed in the paper. As a solution to the problem of the world industry decarbonization, the possibility of competitive use of hydrogen as a fuel on sea tankers transporting liquefied hydrogen over long distances is discussed. The main reasons that encourage countries with sea and river vessels to develop in the direction of improving the ship power plants, in anticipation of tightening the national and international requirements for environmental pollution prevention, are indicated. A brief overview of the development of hydrogen energy is given on the example of leading projects in Europe and Asia, the most successful of which should include the transportation of compressed hydrogen by an experienced tanker of the Japanese company Kawasaki "Suiso Frontier" from Australia to Japan. A strategy for choosing the optimal propulsion unit for a liquefied hydrogen tanker is given. As research methods, the analysis of data obtained in similar studies, as well as the analysis of thermodynamic characteristics of promising systems, is used. Integrated power system designs and re-liquefaction systems for ocean tankers transporting hydrogen are proposed. Data on existing projects with low and high pressure gas engines, solid oxide fuel cells are given. Five prospective energy systems and a re-liquefaction system with a Claude cycle, using hydrogen and liquid natural gas as fuel and refrigerant, are suggested. Their technological feasibility and environmental impact are evaluated. The re-liquefaction systems' exergy efficiency and specific energy consumption ranges are 26.79–46.27 % and 3–7.45 kWh/kg, respectively. A system with a low pressure engine, solid oxide fuel cells and a re-liquefaction system is determined to be optimal.

Keywords: liquefied hydrogen tanker, boil-off hydrogen, re-liquefaction, "green" ecology, decarbonization, marine energy.

For citation:

Koniaev, Dmitry V. "Ship power plant with re-liquefaction installation for tankers transporting hydrogen." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 93–108. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-93-108.

УДК 629.5.06, 629.543

СУДОВАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ «ВОДОРОДНЫХ» ТАНКЕРОВ С УСТАНОВКОЙ ПОВТОРНОГО СЖИЖЕНИЯ

Д. В. Коняев

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

Предметом предлагаемого исследования является возможность использования водорода в качестве топлива для танкеров, перевозящих сжиженный водород. Отмечается, что вариантом решения проблемы декарбонизации мировой промышленности является возможность конкурентоспособного использования водорода в качестве топлива на морских танкерах, перевозящих сжиженный водород

на значительные расстояния. Указаны основные факторы, способствующие изучению проблем совершенствования энергетических установок судов с учетом ужесточения национальных и международных требований по предотвращению загрязнения окружающей среды. Выполнен краткий обзор направлений развития водородной энергетики на примере ведущих проектов в Европе и Азии, наиболее перспективным из которых является транспортировка сжатого водорода опытным танкером японской компании Кавасаки Suiso Frontier из Австралии в Японию. Приведена стратегия выбора оптимальной пропульсивной установки сжиженного водородного танкера. В качестве методов исследования используется анализ данных, полученных в аналогичных исследованиях, а также термодинамических характеристик перспективных систем. Предлагаются интегрированные компоновочные варианты энергетических систем с учетом повторного сжижения испаряющейся части груза для танкеров, перевозящих водород. Приведены данные о существующих проектах с двигателями при подаче газа низкого и высокого давления твердооксидными топливными элементами. Рассмотрены пять перспективных энергетических систем и система повторного сжижения с циклом Клода, использующие в качестве топлива и хладагента водород и сжиженный природный газ. В результате выполненной оценки их технологической реализуемости и воздействия на окружающую среду диапазоны эксергетического КПД и удельного энергопотребления систем повторного сжижения составили 26,79–46,27 % и 3–7,45 кВтч/кг соответственно. Определена оптимальная система с двигателем низкого давления, твердооксидными топливными элементами и системой повторного сжижения.

Ключевые слова: танкер для перевозки сжиженного водорода, выпарной водород, повторное сжижение, «зеленая» экология, декарбонизация, судовая энергетика.

Для цитирования:

Коняев Д. В. Судовая энергетическая установка для «водородных» танкеров с установкой повторного сжижения / Д. В. Коняев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 93–108. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-93-108.

Введение (Introduction)

Широко обсуждаемая мировой общественностью *проблема декарбонизации* предполагает не только ужесточение экологических требований к защите окружающей среды и предотвращению глобального потепления, но и к неизбежному формированию конкурентных способов исполнения подобного рода задач. Очевидно, что одним из приоритетных в мире является направление водородной энергетики. В процессе изучения вопросов водородной энергетики необходимы серьезные проработки в части установок для сжигания сжиженных природных газов (СПГ) с изучением термодинамических процессов и экономической оценки. В мире апробированы и широко используются СПГ и сжиженные углеводородные газы (СУГ). Однако снижение выбросов окислов серы, сжигание СПГ и СУГ не решает проблемы парниковых газов в виде углекислоты.

Судовая энергетика в этих условиях тоже проходит путь трансформации. Страны, имеющие суда морского и речного флота, занимаются разработками в направлении совершенствования энергетических установок судов, предвидя ужесточение национальных и международных требований по предотвращению загрязнения окружающей среды. В данном случае прил. 6 Конвенции МАРПОЛ содержит не только нормативы Международной морской организации, но и широкомасштабные правовые акты. Например, для решения проблем экологии на Конференции ООН по изменению климата (COP21) в Париже 12 декабря 2015 г. было выработано Парижское соглашение по климату, являющееся первым универсальным соглашением подобного рода [1]. Согласно требованиям данного документа, необходимо, чтобы страны предоставили на добровольной основе свои планы по сокращению выбросов парниковых газов (ПГ), выходящие за пределы данной конвенции в рамках Организации Объединенных Наций об изменении климата [2]. В общей сложности участниками проекта по сокращению выбросов парниковых газов являются 186 стран.

Во Франции запущен новый проект Les Hauts de France, направленный на строительство пяти электролизных установок по производству водорода мощностью 100 МВт в течение пяти лет. В Великобритании целью проекта Gigastack является добыча большого масштаба недорогого водорода с нулевым углеродным следом с помощью электролизных установок на основе протонно-обменных мембран. Япония реализует проект строительства первой в мире полномасштабной линии поставок водорода к 2030 г. [3]. Первое в мире японское судно Suiso Frontier, предназначенное для пере-

возки жидкого водорода (LH_2), совершило рейс из Австралии в Японию в начале 2022 г. После постройки двух коммерческих судов для импорта 225 000 т водорода к 2030 г. компания Кавасаки (Япония) планирует построить к 2050 г. еще 80 водородных танкеров для импорта 9 млн т водорода в год [4]. В январе 2019 г. Корея объявила о своей «дорожной карте» водородной экономики, в которой изложена цель производства 6,2 млн электромобилей на топливных элементах и развертывания не менее 1200 заправочных станций к 2040 г. [5]. Российская Федерация тоже активно прорабатывает «Концепцию водородной промышленности», утвержденную Правительством РФ 05 августа 2021 г. [6].

Реализация мировой водородной экономики предполагает *ценовую конкурентоспособность водорода*, которая будет достигнута за счет его производства, транспортировки и использования в больших масштабах. Ввиду того, что не каждая страна может удовлетворить свои потребности в энергии за счет собственных возобновляемых источников из-за сложных географических условий, установленных правил и т. д., крупнотоннажные межконтинентальные перевозки водорода неизбежны. Существует несколько вариантов водородных носителей для морской транспортировки водорода: жидкий водород (LH_2), жидкие носители органического водорода (ЛОHC) и аммиак (NH_3). Поиск наиболее подходящего носителя водорода для крупнотоннажной транспортировки водорода зависит от множества факторов, таких как безопасность, технологическая сложность, окружающая среда и экономическая целесообразность [7]–[10].

Межконтинентальные перевозки LH_2 предпринимались в течение нескольких десятилетий. Так, в 1991 г. предлагалось использовать 270 океанских танкеров вместимостью по 125 000 м³ LH_2 с применением в качестве топлива для установок с двигателем, имеющим КПД около 35 % [11], всего водорода, испаряющегося во время рейса. Предполагается, что КПД в большинстве установок с использованием всего объема *отпарного газа* составляет около 40 %, что приводит к потреблению 237 кг/ч водородного топлива. В целом состав пропульсивной установки на криогенных газозолах должен быть тесно связан с системой распределения отпарного водорода, который может использоваться в качестве топлива или повторно сжижаться для возврата в грузовой танк. Согласно данным проведенных исследований LH_2 танкеров, в пропульсивной и силовой установках и системе распределения отпарного водорода приняты следующие допущения:

1. Все силовые установки танкеров используют весь отпарной водород в качестве топлива для двигателя.
2. Скорость образования газообразного водорода постоянная как в грузовом, так и в балластном рейсах.
3. Рассматриваются только репрезентативные операции.
4. Детали энергосистемы (пропульсивного комплекса и системы выработки электроэнергии) не указываются.
5. Потери LH_2 на испарение не учитываются при погрузочно-разгрузочных работах.

С учетом введенных условий основные параметры конструкции океанских танкеров LH_2 могут быть упрощены. Таким образом, чтобы преодолеть ограничения существующих исследований и представить реалистичную и выполнимую конструкцию танкера LH_2 , в исследовании может использоваться следующий подход. Во-первых, проводится интегрированное проектирование пропульсивной установки, электроэнергетики и системы повторного сжижения; оптимальное решение определяется посредством технико-экономического анализа. Во-вторых, разрабатывается система повторного сжижения с открытым циклом, подходящая для морских судов, компактность которой обеспечивается за счет отсутствия дополнительных хладагентов. В-третьих, точность оценки может быть повышена за счет учета конкретных режимов работы судна и оценки нагрузок электрической системы в зависимости от режима работы и скорости судна. В-четвертых, экономический анализ в таком исследовании касается анализа жизненного цикла и стоимости доставки посредством прогнозирования чартерных сборов для повышения надежности анализа реализации системы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Существующая тенденция морских перевозок СПГ заключается в минимизации расхода топлива в процессе доставки максимального количества груза и минимальном воздействии на окружающую среду. В настоящее время большинство судов с СПГ используют высокоэффективные двигатели внутреннего сгорания. Двигатели двух ведущих компаний: MAN ME-GI и Wartsila X-DF, имеют тепловой КПД более 50 %. Небольшие системы повторного сжижения применяются для обработки отпарного газа (ОГ/BOG). Для LH_2 танкеров может быть использовано несколько вариантов энергосистемы, аналогичных танкерам СПГ. До сих пор многие исследования, связанные с энергетическими системами LH_2 танкеров и системами обработки отпарного водорода, проводились исключительно на основе качественного анализа, т. е. на уровне *предварительного концептуального проектирования*. В настоящее время ведутся многочисленные дискуссии об альтернативных видах топлива для судов. СПГ является наиболее приемлемым топливом для танкеров LH_2 с точки зрения технологического совершенства, экономичным в вопросах эксплуатационных затрат и степени готовности инфраструктуры. В качестве основного топлива могут использоваться СПГ, чистый водород или их смесь.

Основным двигателем могут быть выбраны двигатель ME-GI, двигатель X-DF или газотурбинная установка с комбинированным циклом. Технология сжигания смешанного топлива СПГ и водорода в газовых турбинах имеет высокую степень освоенности по сравнению с другими двигателями внутреннего сгорания. Также в силовой установке может использоваться двухтопливный дизельный двигатель (ДТДД/DFDE) вместе с твердооксидными топливными элементами (ТОТЭ) [12]. Конфигурация энергетической системы определяет тип судового топлива и методы обработки отпарного водорода. В рассматриваемом исследовании конфигурации системы предлагаются на основе использования в качестве топлива только СПГ или использования смеси СПГ и водорода. Перспективные системы энергетических установок LH_2 танкера приведены на рис. 1.

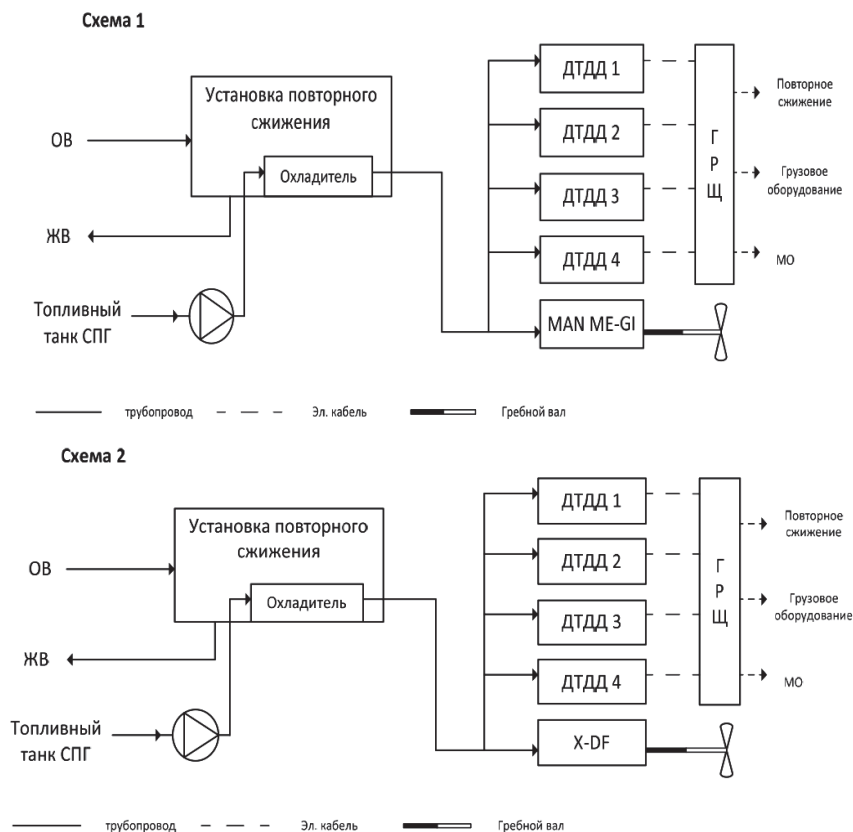


Рис. 1. Перспективные системы энергетических установок LH_2 танкера:

ОВ — отпарной водород; ЖВ — жидкий водород; ГРЩ — главный распределительный щит; МО — машинное отделение; ТОТЭ — твердооксидные топливные элементы (Начало)

Схема 3

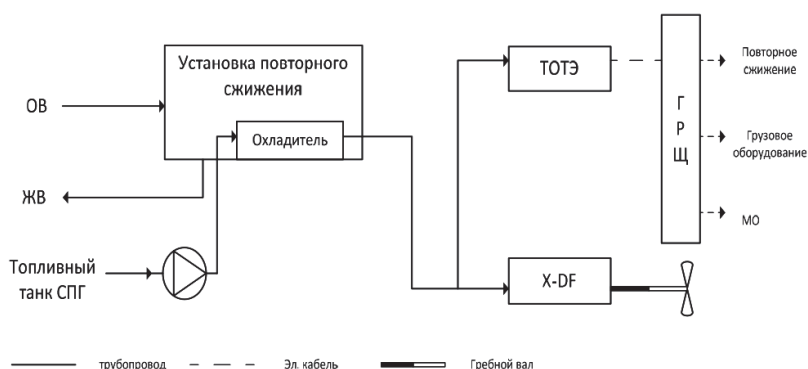


Схема 4

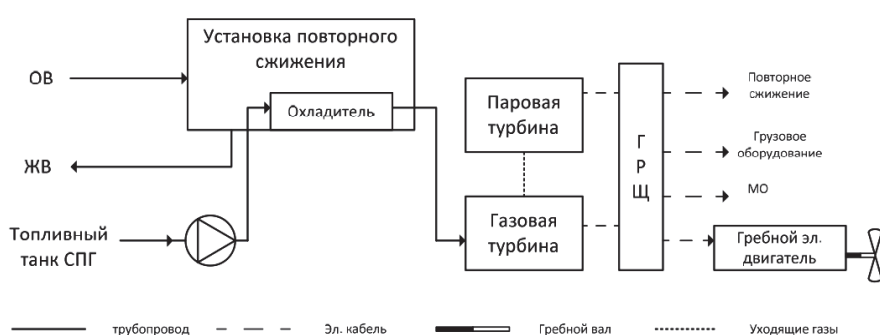


Схема 5

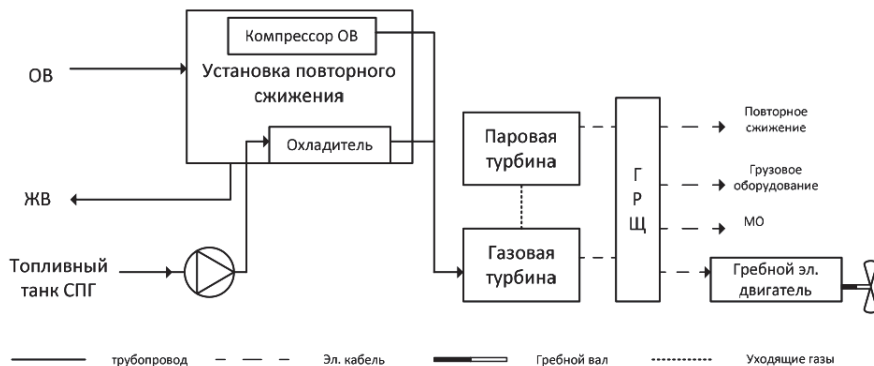


Рис. 1. Перспективные системы энергетических установок LH_2 танкера:
ОВ — отпарной водород; ЖВ — жидкий водород; ГРЩ — главный распределительный щит;
МО — машинное отделение; ТОНЭ — твердоокисные топливные элементы (Окончание)

В предлагаемых на рис. 1 схемах 1–4 системы повторного сжижения конденсируют отпарной водород, возвращая его в грузовые танки. Система в схеме 5 предусматривает повторное сжижение оставшегося отпарного водорода (за исключением смешанного с СПГ водородного топлива) и его перемещение в грузовые танки. Двигатель ME-GI с дизельным циклом применяется в схеме 1. Двигатель X-DF с циклом Отто применяется в схемах 2 и 3. Системы в схемах 4 и 5 имеют газотурбинные установки с комбинированным циклом для электрического движения. В частности, в системе схемы 5 используется газовая турбина с комбинированным циклом, в которой смешивается водород с СПГ для снижения выбросов CO_2 . В системах схем 1 и 2 для выработки электроэнергии применяются двигатели типа DFDE. В системе схемы 3 применяются ТОНЭ. ТОНЭ, работающие на СПГ, имеют относительно длительное время запуска и плохо реагируют на колебания нагрузки, при этом у них отмечается преимущество в эффективности, достигающей 60 %. Таким образом, они подходят для больших морских судов [13].

Параметры машин и топлива приведены в табл. 1. Термодинамические характеристики двигателей ME-GI, X-DF и DFDE получены на основе данных каждого производителя [14]–[16]. Газовые турбины с комбинированным циклом в системах схем 4 и 5 моделируются и проверяются при частичных нагрузках (20 %, 40 %, 60 %, 80 % и 100 %) [17], [18]. Кроме того, TOTЭ в системе схемы 3 моделируется и проверяется [19].

Таблица 1

Параметры установок

Модель двигателя	Пропульсивная установка			Силовая установка	
	MAN 5G70ME-C9.5-GI	WINGD 5X72DF	GE 10–1	Wartsila 8L20DF	Топливные элементы
Мощность, кВт	10000	10000	14272	1480	4500
Количество	1	1	1	4	1
Тип топлива	СПГ	СПГ	СПГ или H ₂	СПГ	СПГ
Параметры топлива	300 бар/45 °С	13 бар/45 °С	25 бар/45 °С	6 бар/45 °С	13 бар/45 °С
Низшая теплотворная способность (кДж/кг)	49200	49200	49200 (СПГ) 120000 (H ₂)	49200	49200
Удельный расход топливного газа (г/кВт)	136,1	138	–	165	–
Удельный расход топлива (г/кВт)	1,2	1,1	–	3,5	–

Для более полного анализа сводные данные по электрической нагрузке для каждой системы получены путем прогнозирования на основе источников [20]–[22] и сведены в табл. 2. Они создаются на основе оперативного профиля LH2 танкера. Во время рейса судна с грузом или в балласте существуют четкие различия в электрических нагрузках грузовой системы, так как эффективность повторного сжижения каждой системы различна. В порту погрузки высокопроизводительный компрессор для возвратного отпарного водорода является большим потребителем электроэнергии. В порту выгрузки грузовые насосы потребляют значительное количество электроэнергии (табл. 3). Силовые установки настроены таким образом, что их нагрузка не превышает 85 % максимальной потребляемой мощности. В частности, мощность электрической силовой установки, используемой в системах 4 и 5, увеличена до 10 800 кВт из-за потерь в электрической передаче.

Образование отпарного водорода, вызванное притоком тепла из атмосферы при транспортировке криогенных грузов, неизбежно. Давление в грузовом танке должно эффективно регулироваться с точки зрения конструктивной прочности грузового танка и качества груза, температура которых должна сохраняться низкой. Количество отпарного водорода, образующегося во время рейса и операций погрузки / разгрузки, представляет собой потери и является важным фактором в экономической цепочке формирования стоимости водорода. Судовые системы повторного сжижения должны иметь другие характеристики в отличие от береговых заводов по сжижению.

Необходимый объем повторного сжижения на борту относительно невелик, а температура исходного потока намного ниже, чем на берегу. Следовательно, для LH₂ танкеров может оказаться целесообразным применение термодинамических циклов, отличных от циклов береговых установок. Морские суда имеют очень ограниченное пространство для размещения дополнительных систем по сравнению с наземными установками. Термодинамическая эффективность, компактность, простота эксплуатации и простота обслуживания являются важными критериями судовой системы повторного сжижения. Кроме того, образование избыточного отпарного водорода после операции погрузки на экспортном терминале выше, чем номинального отпарного водорода во время рейса с грузом, но тем не менее это не считается «расчетной точкой», поскольку частота операции загрузки намного меньше. В табл. 4 приведены проектные данные для моделирования процесса.

Таблица 2

Нагрузка на электрическую сеть систем 1–5

Система 1 — ГД: MAN 5G70ME-C9.5GI × 1 шт., КПД генератора: 96 %, электродвигатель: 8L20DF (1,200 об/мин) × 4						
Режим работы	Балласт	Груз	в порт/из порта	Разгрузка	Погрузка	в простое
1	2	3	4	5	6	7
Непрерывная нагрузка (кВт)	835,5	835,5	971,3	1085,1	1002,4	541,7
Прерывистая нагрузка (кВт)	168,9	168,9	181,7	115,5	115,5	115,5
Фактор группового разнообразия	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Фактическая повторно-кратковременная нагрузка	50,7	50,7	54,5	34,7	34,7	34,7
Частичная загрузка груза (кВт)	900,0	2539,5	500,0	1943,0	2330,2	319,7
Нагрузка на палубное оборудование (кВт)	0,0	0,0	0,0	85,0	85,0	20,0
Общая нагрузка (кВт)	1786,2	3425,7	1525,8	3147,8	3452,3	916,1
Количество генераторов	2 × 1,42	3 × 1,42	2 × 1,42	3 × 1,42	3 × 1,42	1 × 1,42
Коэффициент нагрузки (генератор)	62,9 %	80,4 %	53,7 %	73,9 %	81,0 %	64,5 %
Система 2 — ГД: WINGD 5X72DF × 1 шт., КПД генератора: 96 %, электродвигатель: 8L20DF (1,200 об/мин) × 4						
Непрерывная нагрузка (кВт)	835,5	835,5	971,3	1085,1	1002,4	541,7
Прерывистая нагрузка (кВт)	168,9	168,9	181,7	115,5	115,5	115,5
Фактор группового разнообразия	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Фактическая повторно-кратковременная нагрузка	50,7	50,7	54,5	34,7	34,7	34,7
Частичная загрузка груза (кВт)	760,0	1639,5	500,0	1943,0	2330,2	319,7
Нагрузка на палубное оборудование (кВт)	0,0	0,0	0,0	85,0	85,0	20,0
Общая нагрузка (кВт)	1646,2	2525,7	1525,8	3147,8	3452,3	916,1
Количество генераторов	2 × 1,42	3 × 1,42	2 × 1,42	3 × 1,42	3 × 1,42	1 × 1,42
Коэффициент нагрузки (генератор)	58,0 %	59,3 %	53,7 %	73,9 %	81,0 %	64,5 %
Система 3 — ГД: WINGD 5X72DF × 1 шт., КПД преобразователей: 94,09 %, электродвигатель: 4,5 МВт ТОВЭ						
Непрерывная нагрузка (кВт)	835,5	835,5	971,3	1085,1	1002,4	541,7
Прерывистая нагрузка (кВт)	168,9	168,9	181,7	115,5	115,5	115,5
Фактор группового разнообразия	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Фактическая повторно-кратковременная нагрузка	50,7	50,7	54,5	34,7	34,7	34,7
Частичная загрузка груза (кВт)	750,0	1959,5	500,0	1943,0	2330,2	319,7
Нагрузка на палубное оборудование (кВт)	0,0	0,0	0,0	85,0	85,0	20,0

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Общая нагрузка (кВт)	1636,2	2875,7	1525,8	3147,8	3452,3	916,1
Количество генераторов	1 × 4,234	1 × 4,234	1 × 4,234	1 × 4,234	1 × 4,234	1 × 4,234
Коэффициент нагрузки (генератор)	38,6 %	67,9 %	36,0 %	74,3 %	81,5 %	21,6 %
Система 4 — ГД: GE 10 (ГД+ПТ), КПД генератора: 96 %, электрогенератор для ГД и ПТ: 96 %						
Непрерывная нагрузка (кВт)	835,5	835,5	971,3	1085,1	1002,4	541,7
Нагрузка пропульсивная (кВт)	10800,0	10800,0	3200,0	0,0	0,0	0,0
Прерывистая нагрузка (кВт)	168,9	168,9	181,7	115,5	115,5	115,5
Фактор группового разнообразия	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Фактическая повторно-кратковременная нагрузка	50,7	50,7	54,5	34,7	34,7	34,7
Частичная нагрузка груза (кВт)	780,0	1469,5	500,0	1943,0	2330,2	319,7
Нагрузка на палубное оборудование (кВт)	0,0	0,0	0,0	85,0	85,0	20,0
Общая нагрузка (кВт)	12466,2	13155,7	4725,8	3147,8	3452,3	916,1
Количество генераторов	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27
Коэффициент нагрузки (генератор)	87,3 %	92,2 %	33,1 %	22,1 %	24,2 %	6,4 %
Система 5 — ГД: GE 10 (ГД+ПТ), КПД генератора: 96 %, электрогенератор для ГД и ПТ: 96 %						
Непрерывная нагрузка (кВт)	835,5	835,5	971,3	1085,1	1002,4	541,7
Нагрузка пропульсивная (кВт)	10800,0	10800,0	3200,0	0,0	0,0	0,0
Прерывистая нагрузка (кВт)	168,9	168,9	181,7	115,5	115,5	115,5
Фактор группового разнообразия	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Фактическая повторно-кратковременная нагрузка	50,7	50,7	54,5	34,7	34,7	34,7
Частичная нагрузка груза (кВт)	400,0	769,5	500,0	1943,0	2330,2	319,7
Нагрузка на палубное оборудование (кВт)	0,0	0,0	0,0	85,0	85,0	20,0
Общая нагрузка (кВт)	12466,2	13155,7	4725,8	3147,8	3452,3	916,1
Количество генераторов	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27
Коэффициент нагрузки (генератор)	84,7 %	87,3 %	33,1 %	22,1 %	24,2 %	6,4 %

Таблица 3

Параметры главного электрогенератора

Режим работы	Система 1	Система 2	Система 3	Система 4	Система 5
Общая нагрузка, кВт	1420	1420	4234	14272	14272
Количество установок	4	4	1	1	1
Напряжение, В	6600 В	6600 В	6600 В	6600 В	6600 В
Количество фаз / частота, Гц	3/ 60 Гц	3/ 60 Гц	3/ 60 Гц	3/ 60 Гц	3/ 60 Гц
Первичный двигатель	ДФ	ДФ	ТОТЭ	ГТ + ПТ	ГТ + ПТ

Таблица 4

Проектные данные для системы повторного сжижения отпарного водорода

Параметр	Единицы измерения	Значение
Скорость выкипания	% / сут	0,2 [23]
Скорость образования ОВ в грузу	кг/ч	290
Скорость образования ОВ в балласте	кг/ч	116 [24]
Температура ОВ в грузу	К	53,15 [25]
Температура ОВ в балласте	К	73,15
Давление всасывания компрессора ОВ	бар	2
Состав ОВ	%	Параводород 99,8, ортоводород 0,02

Существенным звеном в рассматриваемых процессах является операция сжижения выпара груза. Технологическая схема системы повторного сжижения приведена на рис. 2.

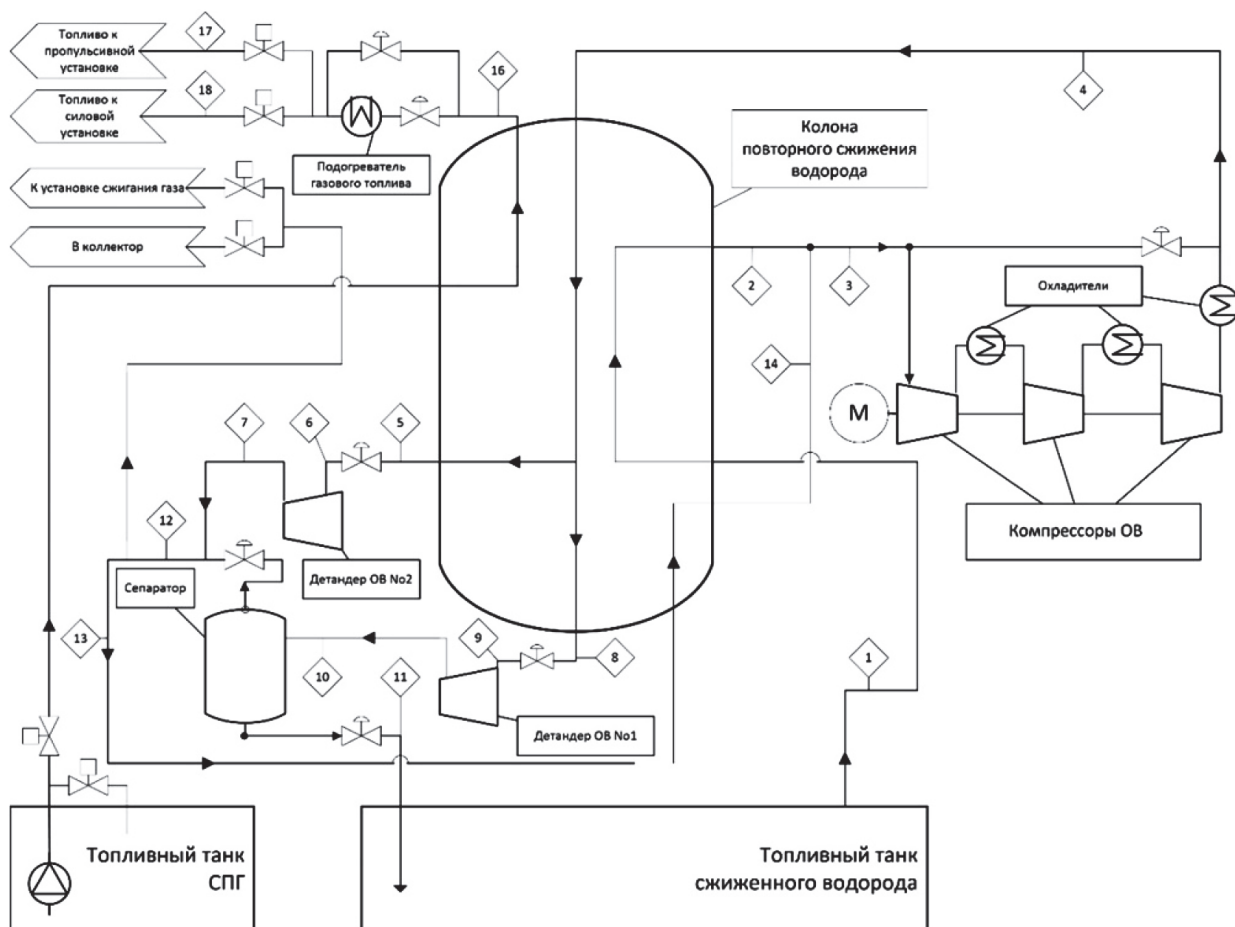


Рис. 2. Схема процессов повторного сжижения водорода

Системы схем 1–5 состоят из установки повторного сжижения и системы подготовки СПГ для использования в качестве топлива. Предлагаемый цикл повторного сжижения модифицирован по сравнению с циклом Клода для использования низких энергетических уровней СПГ, поступающего в топливную систему. Отпарной водород направляется на всасывание компрессора отпарного водорода (ОВ), поэтому его температура в грузовом рейсе принимается равной -220°C , что выше температуры хранения груза [25]. Сжатый отпарной водород проходит через охладитель, предварительно охлаждаясь топливом СПГ для топливной системы. После предварительного охлаждения горячий отпарной водород 4 (рис. 2) охлаждается отпарным водородом 1 из грузовых танков. Часть отпарного водорода 8, направляется в расширитель отпарного водорода № 1, остальная его часть 5 — в детандер отпарного водорода № 2, который вводится для повышения эффективности по сравнению с расширительными клапанами. Доля пара 10 составляет 0,4–0,6. Поток разделяется на *жидкость* и *пар* в сепараторе. Сжиженный отпарной водород 11 направляется в грузовые танки, пар, объединенный с потоком 7, охлаждает 8 (см. рис. 2).

Для анализа цикла повторного сжижения приняты следующие допущения:

1. Минимальная точность определения температуры для теплообменников 0,5 К [26]–[28].
2. Отпарной водород (ОВ) состоит из 99,8 % параводорода и 0,02 % ортоводорода.
3. Во время обычного рейса не происходит превращения параводорода в ортоводород [25], [29].
4. Компрессор ОВ представляет собой поршневой компрессор без смазки.
5. Адиабатический КПД компрессора ОВ, детандеров ОВ № 1 и 2 составляет 85 %, 80 %, 85 % соответственно.
6. Падение давления в теплообменниках незначительное.

Термодинамические характеристики системы повторного сжижения можно оценить по необходимой работе на единицу массы повторно сжиженного отпарного водорода, называемой *удельным потреблением электроэнергии* (УПЭ / SEC), и может быть представлен следующим отношением:

$$SEC = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{RQL}}, \quad (1)$$

где $\dot{W}_{net}$ — полная работа, необходимая для повторного сжижения отпарного водорода;

$\dot{m}_{RQL}$ — массовый расход повторно сжиженного отпарного водорода.

Полная энергия повторного сжижения рассчитывается по уравнению

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{comp} - \dot{W}_{exp1} - \dot{W}_{exp2}, \quad (2)$$

где $\dot{W}_{comp}$ — работа, затраченная на привод компрессора;

$\dot{W}_{exp}$ — экспериментальная работа детандера.

Полезная работа двух расширителей, передаваемая на главный распределительный щит танкера, используется для работы компрессора ОВ. Эксергетическая эффективность является одной из оценок термодинамических характеристик системы повторного сжижения, определяемой как минимальная работа, деленная на фактическую работу:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{RLQ-in} - \dot{E}_{RLQ-out}}{\dot{W}_{net} - (\dot{E}_{RLQ-out} - \dot{E}_{RLQ-in})}, \quad (3)$$

где η_{ex} — эксергетическая эффективность;

$\dot{W}_{net}$ — полная работа, необходимая для повторного сжижения отпарного водорода;

$\dot{E}_{RLQ-in}$ — эксергия физического потока отпарного водорода;

$\dot{E}_{RLQ-out}$ — эксергия физического потока сжиженного водорода.

Системы повторного сжижения оцениваются по УПЭ и эксергетической эффективности, потребляемая мощность и выбросы CO_2 — путем сопряжения с предлагаемыми пропульсивными и силовыми установками.

Результаты (Results)

Энергетическая эффективность и эксергетическая эффективность анализируются для оценки термодинамических характеристик систем сжижения. Термодинамические характеристики систем, полученные на основе формул (1)–(3), приведены в табл. 5.

Таблица 5

Термодинамические характеристики систем 1–5

Энергетическая система	Обозначение	Единица измерения	Рейс	
			в грузу	в балласте
Система 1	$\dot{W}_{net}$	кВт	2159,92	484,88
	$\dot{m}_{RQL}$	кг/ч	290,00	116,00
	УПЭ (SEC)	кВт·ч/кг	7,45	43191,00
	η_{ex}	%	26,79	—
	P_{lng}	бар	300,00	—
Система 2	$\dot{W}_{net}$	кВт	1289,63	355,54
	$\dot{m}_{RQL}$	кг/ч	290,00	116,00
	УПЭ (SEC)	кВт·ч/кг	4,45	3,07
	η_{ex}	%	36,97	—
	P_{lng}	бар	13,00	—
Система 3	$\dot{W}_{net}$	кВт	1611,89	342,91
	$\dot{m}_{RQL}$	кг/ч	290,00	116,00
	УПЭ (SEC)	кВт·ч/кг	5,59	2,95
	η_{ex}	%	31,26	—
	P_{lng}	бар	13,00	—
Система 4	$\dot{W}_{net}$	кВт	1080,54	368,76
	$\dot{m}_{RQL}$	кг/ч	290,00	116,00
	УПЭ (SEC)	кВт·ч/кг	3,73	3,18
	η_{ex}	%	43,40	—
	P_{lng}	бар	25,00	—
Система 5	$\dot{W}_{net}$	кВт	419,30	—
	$\dot{m}_{RQL}$	кг/ч	140,00	—
	УПЭ (SEC)	кВт·ч/кг	3,00	—
	η_{ex}	%	46,27	—
	P_{lng}	бар	25,00	—

УПЭ (SEC), эксергический КПД, давление и расход топлива СПГ на груженом рейсе показаны на рис. 3.



Рис. 3. Удельное потребление электроэнергии и эксергетическая эффективность

Количество номинального отпарного водорода во время рейса в грузу выбрано в качестве расчетной точки установки повторного сжижения. Система *схемы 1* имеет наихудшие УПЭ и эксергетический КПД, а *система 5* — наилучшие из имеющихся альтернатив.

Температура нагнетания насоса СПГ с давлением 300 бар для двигателя ME-GI выше, чем у насоса СПГ с давлением 13 бар для двигателя X-DF, на 30 °С, что оказывает существенное влияние на разницу в производительности между *системами 1 и 2*. *Системы 2 и 3* используют один и тот же двигатель X-DF для движения, но характеристики повторного сжижения различаются из-за разных электросиловых установок. В *системе 3* используется высокоэффективный ТОТЭ, поэтому низкотемпературная энергия СПГ и эффективность повторного сжижения данной системы снижаются. *Система 4* имеет газовую турбину с комбинированным циклом с максимальным КПД 43 %, что является наихудшим тепловым КПД среди принятых энергетических систем. По сравнению с другими СЭУ в *системе 4* используется наибольшее количество СПГ-топлива. Таким образом, данная система имеет самую высокую производительность повторного сжижения при достаточной низкотемпературной энергии. В *системе 5* в газовую турбину подается 150 кг/ч водорода и только оставшиеся 140 кг/ч водорода повторно сжижаются. Система повторного сжижения не работает во время балластной операции, поэтому весь ОВ 116 кг/ч используется в качестве топлива для газовой турбины.

В завершение термодинамического анализа установлено, что система повторного сжижения в *системе 5* имеет наилучшую эксергетическую эффективность 46,27 % и УПЭ 3 кВт·ч/кг. Это связано с тем, что повторно сжижается только 140 кг/ч ОВ, а достаточное количество СПГ под давлением 25 бар охлаждает горячий водород, поступающий из компрессора ОВ [12].

Заключение (Conclusion)

Предложена оптимальная интегрированная конструкция судовой энергетической системы и системы повторного сжижения для океанского танкера, перевозящего жидкий водород, вместимостью 50 000 м³. Выполнена оценка пяти энергетических систем с учетом технологических аспектов судоходства. Системы повторного сжижения оценивались с помощью термодинамического анализа производительности, выполненного на основе расчетов эффективности использования энергии

и эксергии. Предложены конфигурации системы, основанные на использовании только топлива СПГ или использовании смешанного топлива: СПГ и водорода. Используемые характеристики предложенных пяти систем: в качестве силовой установки в *системе 1* (см. рис. 1–5) применялся двигатель ME-GI с дизельным циклом, в *системах 2 и 3* применялся двигатель X-DF с циклом Отто. В *системах 4 и 5* использовалась газотурбинная система с комбинированным циклом для электрического движения. В частности, *системе 5* использовано комбинированное сжигание СПГ и водорода для снижения выбросов CO₂.

В качестве установки выработки электроэнергии в *системах 1 и 2* использовался двухтопливный двигатель DFDE, а в *системе 3* использовались твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ). Также была предложена конструкция системы повторного сжижения отпарного водорода, образующегося из-за притока тепла в грузовой танк жидкого водорода. Судовая система повторного сжижения должна быть простой в обслуживании и в эксплуатации, а также компактной. Использование модифицированного цикла Клода (без отдельного хладагента) для повторного сжижения удовлетворяет этим условиям. Предлагаемый цикл повторного сжижения модифицирован по сравнению с циклом Клода для использования низкотемпературной энергии СПГ, поступающего в энергетическую систему.

В термодинамическом анализе было установлено, что система повторного сжижения в *системе 5* имеет наилучшую эксергетическую эффективность 46,27 % и УПЭ (SEC) 3 кВт·ч/кг. Это связано с тем, что повторно сжижается только 140 кг/ч ОВ, а достаточное количество СПГ под давлением 25 бар охлаждает горячий водород из компрессора ОВ. Система 3 является наиболее эффективной в экологическом аспекте и показывает самые низкие выбросы CO₂ в год. Система 4, имеющая самый низкий КПД, выделяет наибольшее количество CO₂, несмотря на то, что термодинамические характеристики системы повторного сжижения являются лучшими. В *системе 5* выбросы CO₂ снижены на 27,5 % по сравнению с *системой 4* за счет совместного сжигания 150 кг/ч водорода с СПГ, однако *система 5* по-прежнему выделяет больше CO₂ по сравнению с *системами 1–3* из-за ее низкой эффективности. Судовая энергетическая *система 3*, состоящая из двигателя низкого давления, ТОТЭ и системы повторного сжижения отпарного водорода, представляется наиболее целесообразной с учетом различных аспектов. Несмотря на то, что в данном исследовании расчетные параметры были получены максимально рационально, оно содержит много неопределенностей в вопросах технического анализа, устранить которые позволят разработки технологий на основе топливных элементов и аккумуляторов большой емкости, а также водородных двигателей внутреннего и внешнего сгорания.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на поиск оптимальной энергетической системы и системы управления ОВ, которые могут минимизировать стоимость доставки в соответствии с новыми системами сохранения груза, размерами грузовых танков, количеством ОВ, разнообразием альтернативных видов топлива и новыми пропульсивными установками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Darby M. IMF calls for carbon tax on ships and planes // The Guardian [Электронный ресурс] / M. Darby. — Режим доступа: <https://www.theguardian.com/environment/2016/jan/13/imf-calls-for-carbon-tax-on-ships-and-planes> (дата обращения: 22.12.2022).
2. Joungh T. H. The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050 / T. H. Joungh, S. G. Kang, J. K. Lee, J. Ahn // Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping. — 2020. — Vol. 4. — Is. 1. — Pp. 1–7. DOI: 10.1080/25725084.2019.1707938.
3. Nishimura M. Activities for Realization of International Liquefied Hydrogen Energy Supply Chain / M. Nishimura, K. Shindo, K. Yoshimura, Ya. Yoshino // Kawasaki Technical Review. — 2021. — No.182 — Pp. 9–16.
4. Pekic S. Suiso Frontier brings world's 1st LH2 shipment to Japan [Электронный ресурс] / S. Pekic. — Режим доступа: <https://www.offshore-energy.biz/suiso-frontier-brings-worlds-1st-lh2-shipment-to-japan> (дата обращения: 22.12.2022).

5. Hydrogen roadmap Korea [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://elecseed.com.au/wp-content/uploads/2022/05/Hydrogen-Road-Map_Korea.pdf (дата обращения: 22.12.2022).
6. Распоряжение Правительства РФ от 5 августа 2021 года № 2162-р. «Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/news/42971/> (дата обращения: 22.12.2022).
7. Ahn J. Strategy for selecting an optimal propulsion system of a liquefied hydrogen tanker / J. Ahn, H. You, J. Ryu, D. Chang // International journal of hydrogen energy. — 2017. — Vol. 42. — Is. 8. — Pp. 5366–5380. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.037.
8. Sekkesæter Ø. Evaluation of Concepts and Systems for Marine Transportation of Hydrogen: Master's thesis / Ø. Sekkesæter. — Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2019. — 192 p.
9. Mizuno Y. Economic analysis on international hydrogen energy carrier supply chains / Y. Mizuno, Y. Ishimoto, S. Sakai, K. Sakata // Journal of Japan Society of Energy and Resources. — 2017. — Vol. 38. — Is. 3. — Pp. 11–17. DOI: 10.24778/jjser.38.3_11.
10. Raab M. Comparative techno-economic assessment of a large-scale hydrogen transport via liquid transport media / M. Raab, S. Maier, R. U. Dietrich // International Journal of Hydrogen Energy. — 2021. — Vol. 46. — Is. 21. — Pp. 11956–11968. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.213
11. Hiraoka K. Energy analysis and CO2 emission evaluation of a solar hydrogen energy system for the transportation system in Japan — I. Conceptual design of the system / K. Hiraoka, K. Watanabe, T. Morishita, M. Nomura, S. Kan, M. Ikame, T. Senda // International journal of hydrogen energy. — 1991. — Vol. 16. — Is. 9. — Pp. 631–638. DOI: 10.1016/0360-3199(91)90088-Z.
12. Lee J. Integrated design evaluation of propulsion, electric power, and re-liquefaction system for large-scale liquefied hydrogen tanker / J. Lee, Y. Choi, S. Che, M. Choi, D. Chang // International Journal of Hydrogen Energy. — 2022. — Vol. 47. — Is. 6. — Pp. 4120–4135. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.004.
13. Gianni M. Outlook of future implementation of PEMFC and SOFC onboard cruise ships / M. Gianni, A. Pietra, R. Taccani // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2021. — Vol. 238. — Pp. 04004. DOI: 10.1051/e3s-conf/202123804004.
14. Программа CEAS (Computerized engine application system) / MAN [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations> (дата обращения: 22.12.2022).
15. Программа Winterthur Gas & Diesel (WinGD). General Technical Data (GTD) n. d. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.wingd.com/en/media/general-technical-data/> (дата обращения: 22.12.2022).
16. Wärtsilä 20DF. Product Guide. — Wärtsilä Finland Oy, 2021. — 186 p.
17. Qd100 gas-steam combined — cycle 15MW power set proposal. — China aviation gas turbine company, Ltd., 2006. — 50 p.
18. Hydrogen fueled gas turbines. General Electric. GE 10–1 Gas turbine [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ge.com/gas-power/future-of-energy/hydrogen-fueled-gas-turbines> (дата обращения: 22.12.2022).
19. Borglum B. P. Development of solid oxide fuel cells at versa power systems and fuel cell energy / B. P. Borglum, H. Ghezal-Ayagh // ECS Transactions. — 2013. — Vol. 57. — No. 1. — Pp. 61. DOI: 10.1149/05701.0061ecst.
20. Kim K. Case study on boil-off gas (BOG) minimization for lng bunkering vessel using energy storage system (ESS) / K. Kim, K. Park, G. Roh, K. Chun // Journal of Marine Science and Engineering. — 2019. — Vol. 7. — Is. 5. — Pp. 130. DOI: 10.3390/jmse7050130.
21. Su C. L. Ship electrical load analysis considering power generation efficiency / C. L. Su, C. H. Liao // 015 IEEE/IAS 51st Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). — IEEE, 2015. — Pp. 1–11. DOI: 10.1109/ICPS.2015.7266439.
22. NSMV phase 3 design. Basis of Design [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.maritime.dot.gov/sites/marad.dot.gov/files/docs/national-defense/office-ship-operations/rff/2606/nsmv-phase-3-basis-design-r1.pdf> (дата обращения: 22.12.2022).
23. Ishimoto Y. Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers / Y. Ishimoto, M. Voldsund, P. Nekså, S. Roussanaly, D. Berstad, S. O. Gardarsdottir // International journal of hydrogen energy. — 2020. — Vol. 45. — Is. 58. — Pp. 32865–32883. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.017.
24. Jang E. K. Prediction method of the BOG for the membrane type LNGC in Middle East route / E. K. Jang, Y. C. Jung // Journal of Navigation and Port Research. — 2004. — Vol. 28. — Is. 5. — Pp. 365–372. DOI: 10.5394/KINPR.2004.28.5.365.

25. Lee H. Analysis and assessment of partial re-liquefaction system for liquefied hydrogen tankers using liquefied natural gas (LNG) and H₂ hybrid propulsion / H. Lee, Y. Shao, S. Lee, G. Roh, K. Chun, H. Kang // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2019. — Vol. 44. — Is. 29. — Pp. 15056–15071. DOI: 10.5394/KINPR.2004.28.5.365.
26. Groznik J. Boil-off gas handling from liquefied hydrogen storage: Master Thesis in Mechanical Engineering / J. Groznik. — Trondheim, Norwegen: Norwegian University of Science and Technology, 2020. — 115 p.
27. Faramarzi S. A novel hydrogen liquefaction process based on LNG cold energy and mixed refrigerant cycle / S. Faramarzi, S. M. M. Nainiyan, M. Mafi, R. Ghasemiasl // *International Journal of Refrigeration*. — 2021. — Vol. 131. — Pp. 263–274. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.07.022.
28. Cardella U. Process optimization for large-scale hydrogen liquefaction / U. Cardella, L. Decker, J. Sundberg, H. Klein // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2017. — Vol. 42. — Is. 17. — Pp. 12339–12354. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.167.
29. Choi M. Thermal Efficiency and Economics of a Boil-Off Hydrogen Re-Liquefaction System Considering the Energy Efficiency Design Index for Liquid Hydrogen Carriers / M. Choi, W. Jung, S. Lee, T. Joung, D. Chang // *Energies*. — 2021. — Vol. 14. — Is. 15. — Pp. 4566. DOI: 10.3390/en14154566.

REFERENCES

1. Darby, M. “IMF calls for carbon tax on ships and planes.” *The Guardian*. Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.theguardian.com/environment/2016/jan/13/imf-calls-for-carbon-tax-on-ships-and-planes>>.
2. Joung, Tae-Hwan, Seong-Gil Kang, Jong-Kap Lee, and Junkeon Ahn. “The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050.” *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping* 4.1 (2020): 1–7. DOI: 10.1080/25725084.2019.1707938.
3. Nishimura, Motohiko, Kenjiro Shindo, Kenji Yoshimura, and Yasushi Yoshino. “Activities for Realization of International Liquefied Hydrogen Energy Supply Chain.” *Kawasaki Technical Review* 182 (2021): 9–16.
4. Pekic, Sanja. Suiso Frontier brings world’s 1st LH₂ shipment to Japan. Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.offshore-energy.biz/suiso-frontier-brings-worlds-1st-lh2-shipment-to-japan>>.
5. Hydrogen roadmap Korea. Web. 22 Dec. 2022 <https://elecseed.com.au/wp-content/uploads/2022/05/Hydrogen-Road-Map_Korea.pdf>.
6. Rasporiyazhenie Pravitel'stva RF ot 5 avgusta 2021 goda № 2162-r. «Kontseptsiya razvitiya vodo-rodnoi energetiki v Rossiiskoi Federatsii». Web. 22 Dec. 2022 <<http://government.ru/news/42971/>>.
7. Ahn, Junkeon, Hwalong You, Jiheon Ryu, and Daejun Chang. “Strategy for selecting an optimal propulsion system of a liquefied hydrogen tanker.” *International journal of hydrogen energy* 42.8 (2017): 5366–5380. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.037.
8. Sekkesæter, Øyvind. Evaluation of Concepts and Systems for Marine Transportation of Hydrogen. Master’s thesis. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2019.
9. Mizuno, Yuji, Yuki Ishimoto, Susumu Sakai, and Ko Sakata. “Economic analysis on international hydrogen energy carrier supply chains.” *Journal of Japan Society of Energy and Resources* 38.3 (2016): 11–17. DOI: 10.24778/jjser.38.3_11.
10. Raab, Moritz, Simon Maier, and Ralph-Uwe Dietrich. “Comparative techno-economic assessment of a large-scale hydrogen transport via liquid transport media.” *International Journal of Hydrogen Energy* 46.21 (2021): 11956–11968. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.213.
11. Hiraoka, K., K. Watanabe, T. Morishita, M. Nomura, S. Kan, M. Ikame, and T. Senda. “Energy analysis and CO₂ emission evaluation of a solar hydrogen energy system for the transportation system in Japan — I. Conceptual design of the system.” *International journal of hydrogen energy* 16.9 (1991): 631–638. DOI: 10.1016/0360-3199(91)90088-Z.
12. Lee, Jinkwang, Younseok Choi, Sanghyun Che, Minsoo Choi, and Daejun Chang. “Integrated design evaluation of propulsion, electric power, and re-liquefaction system for large-scale liquefied hydrogen tanker.” *International Journal of Hydrogen Energy* 47.6 (2022): 4120–4135. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.004.
13. Gianni, Marco, Andrea Pietra, and Rodolfo Taccani. “Outlook of future implementation of PEMFC and SOFC onboard cruise ships.” *E3S Web of Conferences*. Vol. 238. EDP Sciences, 2021. DOI: 10.1051/e3s-conf/202123804004.
14. CEAS program (Computerized engine application system). Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations>>.

15. Winterthur Gas & Diesel program (WinGD). General Technical Data (GTD) n. d. Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.wingd.com/en/media/general-technical-data/>>.
16. Wärtsilä 20DF. *Product Guide*. Wärtsilä Finland Oy, 2021.
17. *Qd100 gas-steam combined — cycle 15MW power set proposal*. China aviation gas turbine company, Ltd., 2006.
18. Hydrogen fueled gas turbines. General Electric. GE 10–1 Gas turbine. Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.ge.com/gas-power/future-of-energy/hydrogen-fueled-gas-turbines>>.
19. Borglum, Brian P., and Hossein Ghezel-Ayagh. “Development of solid oxide fuel cells at versa power systems and fuel cell energy.” *ECS Transactions* 57.1 (2013): 61. DOI: 10.1149/05701.0061ecst.
20. Kim, Kyunghwa, Kido Park, Gilttae Roh, and Kangwoo Chun. “Case study on boil-off gas (BOG) minimization for lng bunkering vessel using energy storage system (ESS).” *Journal of Marine Science and Engineering* 7.5 (2019): 130. DOI: 10.3390/jmse7050130.
21. Su, Chun-Lien, and Chi-Hsiang Liao. “Ship electrical load analysis considering power generation efficiency.” *2015 IEEE/IAS 51st Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*. IEEE, 2015. DOI: 10.1109/ICPS.2015.7266439.
22. NSMV phase 3 design. Basis of Design. Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.maritime.dot.gov/sites/marad.dot.gov/files/docs/national-defense/office-ship-operations/rrf/2606/nsmv-phase-3-basis-design-r1.pdf>>.
23. Ishimoto, Yuki, Mari Voldsund, Petter Neksa, Simon Roussanly, David Berstad, and Stefania Osk Gardarsdottir. “Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers.” *International journal of hydrogen energy* 45.58 (2020): 32865–32883. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.017.
24. Jang, Eun-Kyu, and Yun-Chul Jung. “Prediction method of the BOG for the membrane type LNGC in Middle East route.” *Journal of Navigation and Port Research* 28.5 (2004): 365–372. DOI: 10.5394/KINPR.2004.28.5.365.
25. Lee, Hyunyoung, Yude Shao, Seunghun Lee, Gilttae Roh, Kangwoo Chun, and Hokeun Kang. “Analysis and assessment of partial re-liquefaction system for liquefied hydrogen tankers using liquefied natural gas (LNG) and H2 hybrid propulsion.” *International Journal of Hydrogen Energy* 44.29 (2019): 15056–15071. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.277.
26. Groznik, Jan. Boil-off gas handling from liquefied hydrogen storage. Master Thesis in Mechanical Engineering. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2020.
27. Faramarzi, Saman, Seyed Mojtaba Mousavi Nainiyan, Mostafa Mafi, and Ramin Ghasemiasl. “A novel hydrogen liquefaction process based on LNG cold energy and mixed refrigerant cycle.” *International Journal of Refrigeration* 131 (2021): 263–274. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.07.022.
28. Cardella, U., L. Decker, J. Sundberg, and H. Klein. “Process optimization for large-scale hydrogen liquefaction.” *International Journal of Hydrogen Energy* 42.17 (2017): 12339–12354. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.167.
29. Choi, Minsoo, Wongwan Jung, Sanghyuk Lee, Taehwan Joung, and Daejun Chang. “Thermal Efficiency and Economics of a Boil-Off Hydrogen Re-Liquefaction System Considering the Energy Efficiency Design Index for Liquid Hydrogen Carriers.” *Energies* 14.15 (2021): 4566. DOI: 10.3390/en14154566.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Коняев Дмитрий Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: konjaevdv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Koniaev, Dmitry V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: konjaevdv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2022 г.
Received: December 19, 2022.