УДК 621.9.04

В. А. Настасенко, кан. техн. наук, доцент, проф.
Херсонская государственная морская академия (Украина)
Тел./Факс: +38 (050) 8079199; *E-mail: Nastasenko2004@front.ru*

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВОЙ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В работе проведен технико-экономический анализ основных путей развития судовой альтернативной энергетики на конкретных примерах судов, среди которой для транспортного флота используют парусные и барабанные ветряные энергетические системы, а также солнечные фотоэлектрические системы. Показано, что в пределах мощности судовых энергетических установок от 5 до 20 МВт они позволяет экономить от 20 до 5% топлива на базе нефти. Однако их применение при стоимости топлива <450 € за 1 т становится дотационным и непривлекательным для частного капитала, что сдерживает возможности их развития и применения, поэтому требуется пересмотр ценовой политики в сфере топлив на базе нефти.

Ключевые слова: *судовая ветряная и солнечная энергетики и их технико-экономические показатели*

V. A. Nastasenko

THE TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF MANUFACTURE AND OPERATION OF SHIP ALTERNATIVE POWER

In work the technical and economic analysis of the basic ways of development of ship alternative power on concrete examples of courts among which for transport fleet use sailing and drum-type wind power systems, and also solar photo-electric systems is carried out. It is shown that within capacity of ship power installations from 5 to 20 MWt they allows to save from 20 to 5 % of fuel on the basis of oil. However their application at fuel cost <450€ for 1 t becomes grant and unattractive for the private capital that constrains possibilities of their development and application, revision of a price policy in sphere fuels on the basis of oil therefore is required.

Key words: *vessel wind and solar power, technical and economical indexes*

Введение

Работа относится к сфере альтернативной энергетики на транспортном флоте и технико-экономическим проблемам ее применения.

Современные суда транспортного флота потребляют в сутки от 10 т топлива (суда типа река-море) до 350 т (магистральные контейнеровозы). Основными судовыми топливами являются продукты переработки нефти, которые при сжигании в судовых силовых установках (СЭУ) безвозвратно теряются. Транспортный флот является одним из крупных потребителей нефти, ежегодная доля которого составляет от 7 до 10% ее добычи.

Учитывая возможность исчерпания запасов нефти и газа в текущем столетии [1], необходима ее экономия. Другой важной угрозой для всего человечества является то, что при сжигании топлива на базе нефти и газа образуются вредные для природы вещества [2], в т.ч. – диоксид углерода CO_2 (табл. 1), ведущий к усилению парникового эффекта. При этом годовые выбросы CO_2 транспортными судами достигают 2300 млн. т.

Переход на очищенное топливо уменьшает выбросы вредных веществ, но не уменьшает выбросы CO_2. Замена топлив на базе нефти природным газом отодвигает сроки его полного исчерпания на 20 **…** 40 лет и уменьшает объемы вредных выбросов, в т.ч. CO_2, однако не ведет к полному их исключению и решению проблемы парникового эффекта.

Табл. 1. Сравнительные количественные показатели вредных выбросов при сжигании традиционных судовых топлив [2]

Тип топлива	Количество вредных выбросов. г/(кВт·ч) (по данным MARINTEC)			
	SO_x	NO_x	CO_2	Твердые частицы
Мазут (3,5% масс. соединений серы)	13	9 – 12	580 – 630	1,5
Морское дизельное топливо (0,5% масс. соединений серы)	2	8 – 11	580 – 630	0,25 – 0,5
Очищенное дизельное топливо (0,1% масс. соединений серы)	0,4	8 – 11	580 – 630	0,15 – 0,25
Природный газ (сжатый или сжижженный)	0	2	430 – 480	0

Анализ состояния проблемы и постановка задач работы

Проблема сокращения расхода нефти и уменьшения выбросов CO_2 является важной и актуальной задачей, решению которой способствует применение судовой альтернативной энергетики.

Анализ технико-экономических показателей и особенностей развития судовой альтернативной энергетики является *главной целью выполняемой работы.*

Ее научную новизну составляет технико-экономическое обоснование наиболее эффективных условий применения альтернативной энергетики на транспортном флоте и разработка на их базе рекомендаций по ее развитию.

Выбор путей решения поставленных задач

Структурная схема основных видов судовой альтернативной энергетики показана на рис. 1.

Рис. 1. Основные виды судовой альтернативной энергетики

Гидроволновая энергетика требует сложных технических решений, которые могут применяться только при разработке новых конструкций судов и неприемлема для их модернизации, поэтому не рассматривается детально в данной работе. Термо ЭДС на судах обеспечивает малые мощности, а термальная энергетика в виде использования сопутствующего тепла выхлопных газов ДВС в котлах-экономайзерах – уже широко применяется, поэтому они также не рассматриваются в данной работе.

Среди альтернативных судовых энергетических систем реальное применение получили: ветряные и солнечные. Объясняется это тем, что на суше они имеют широкое распространение и накоплен большой опыт их изготовления и эксплуатации. Однако автоматический перенос их на суда транспортного флота ведет к ряду проблем, поскольку конструкция суден и условий их эксплуатации имеют свои отличительные особенности, основными из которых являются:

1. Потребность перевозки грузов на палубе;
2. Потребность своевременной доставки грузов;
3. Большие мощности основных судовых энергетических установок;
4. Отсутствие места для размещения нетрадиционных энергетических систем;
5. Работа суден в условиях сильного ветра, качки, воздействия волн, атмосферных осадков и агрессивных испарений морской воды.

Учитывая, что в недалеком прошлом большинство судов было парусными, основным видом в проектах суден будущего стало применение мачтовых и гибких парусных систем *попутного принципа действия*. Однако их недостаток для суден уже, использующих ДВС для движения – невозможность применения при скорости ветра меньшей скорости судна (т.е. – до 7…10 м/с, поскольку для своевременной доставки грузов современные суда используют эти скорости), а при скорости ветра >20 м/с – эксплуатация парусов становится опасной. Однако попутный ветер со скоростью от 7 до 20 м/с не всегда возникает в период выполнения рейса, что ограничивает применение таких систем. При встречном ветре система парусов только мешает движению судна, поэтому их эффективное применение возможно в среднем не более ⅓ общего времени выполнения морских переходов (≈ 250 суток в год).

Устраняет указанные недостатки система встречного принципа действия, которая может действовать при полном отсутствии ветра, только за счет собственной скорости судна 7…10 м/с. Она вырабатывает универсальную для применения энергию – электрическую, мощность которой растет при встречном ветре от скорости 1 м/с, до 20 м/с. Кроме того работа системы возможна также на якорной стоянке фактически при любом направлении ветра, а у стенки пирса в порту – при встречном ветре, что реально сводит ее применение до ½ времени длительности года в 365 суток.

В солнечной энергетике предпочтительны фотоэлектрические системы, т.к. их кпд в 2 раза выше тепловых систем и они широко используются в проектах суден будущего. Их преимуществом является выработка универсальной для потребления электрической энергия, а среднегодовое время использования системы составляет до 12 часов в сутки, т.е. половину от времени длительности года 365 суток, за исключением 25% пасмурных и дождливых дней, когда освещенность солнечных батарей падает до 50…90%.

Анализ технико-экономических показателей судовых ветряных и солнечных энергетических систем

Для гибких парусов попутного принципа действия предпочтительна система SkySails [3] (рис. 2), которая дешевле и проще в использовании, чем системы мачтовых

парусов, и обеспечивает возможность использования палубы для перевозки грузов при минимальном креновании корпуса судна.

По данным фирмы Zeppellin [3] тяга паруса системы SkySails составляет величину $P_П$ = 0,5 кН на 1 м^2, которая растет прямо пропорционально площади паруса, а мощность системы растет прямо пропорционально превышению скорости ветра над скоростью судна, составляющую 7…10 м/с.

Тогда при используемой среднеарифметической скорости попутного ветра 14 м/с половину времени рейса (более точно ее можно определить для конкретного рейса с учетом стабильности ветров, показанных на рис. 3) эквивалент мощности составит 3,5…2 кВт/ч, а для получения дополнительной мощности в 1 МВт/ч потребуется площадь паруса от 300 до 500м^2. Такая мощность достигает от 20% до 5% мощности судовых ДВЗ в 5…20 МВт.

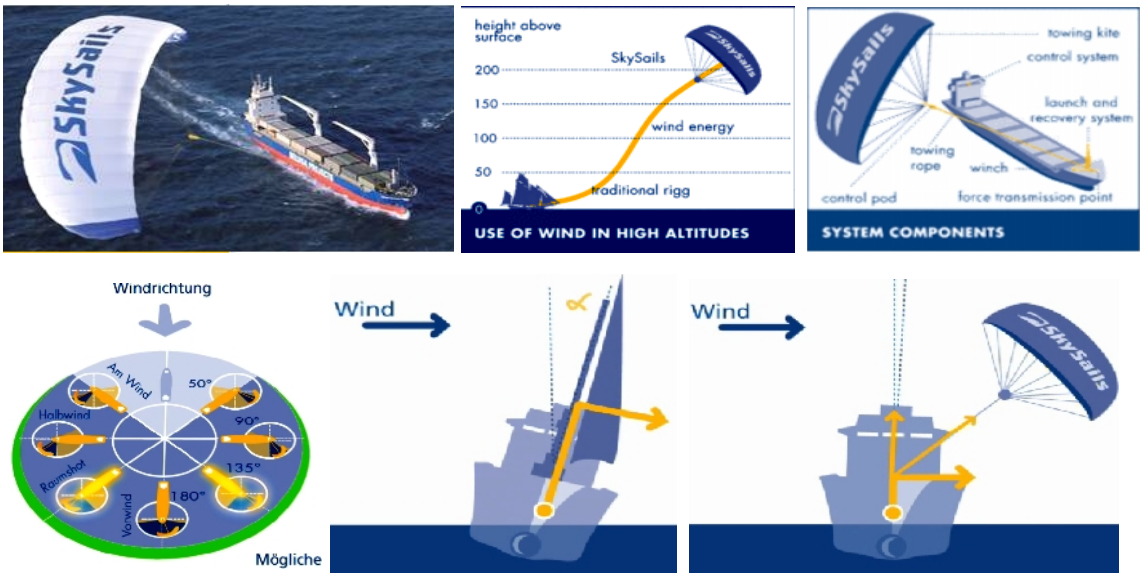

Рис. 2. Система парусов SkySails, принципы и условия ее действия

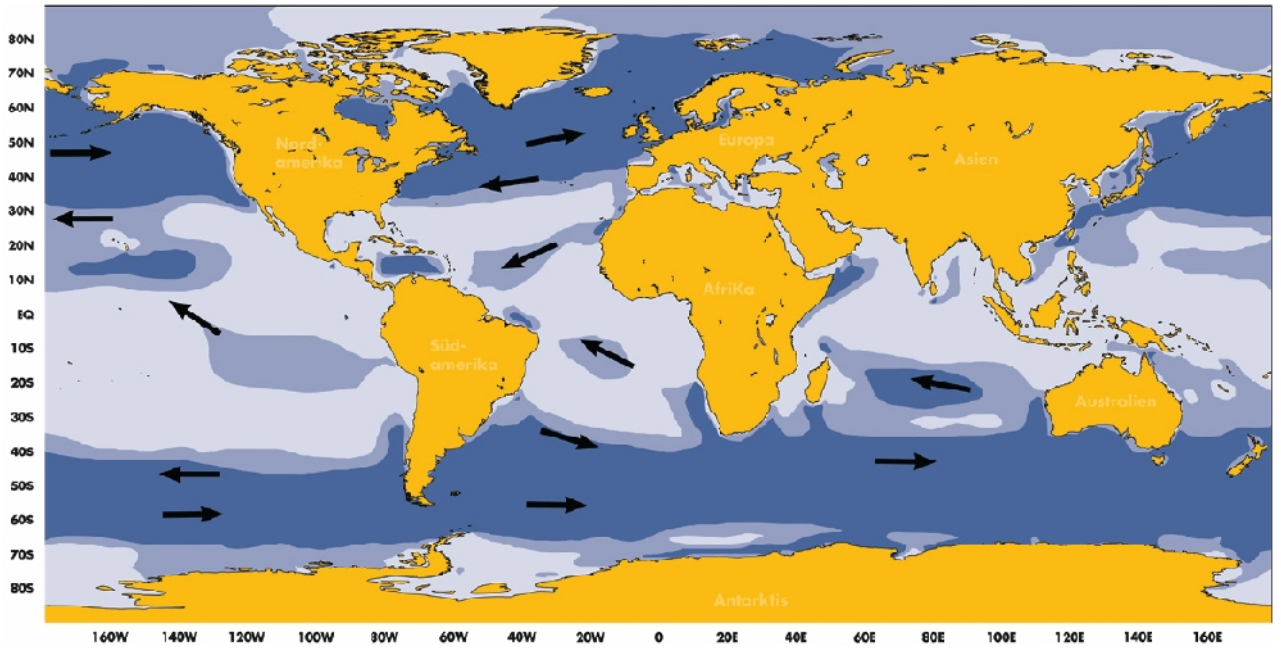

Рис. 3. Основные устойчивые направления ветряных потоков в мировом океане:
- сильный ветер 10…20 м/с, - умеренный ветер 5…10 м/с, - слабый ветер до 5 м/с

По данным фирмы Zeppellin [3] стоимость системы SkySails с парусом площадью 320 м^2 и установкой ее на судне, составляет около 700 тыс. €. При использовании системы в среднем до ⅓ общего времени выполнения морских переходов (≈ 250 суток в год по 12 часов в сутки, поскольку в ночное время ее применение затруднено), общий эквивалент выработанной энергии составит величину $N_П$:

$$N_{П} = 1(МВт / час) \times 12 (часов / сутки) \times \frac{1}{3} \times 250 (суток) = 1000 (МВт). \quad (1)$$

Учитывая более высокую сложность изготовления и эксплуатации известных поворотных (рис. 4.а) или подъемных (рис. 4.б) парусных систем в проектах суден будущего [4, 5], их стоимость и получение в них эквивалента 1 кВт/ч мощности будут более высокими, чем в системе SkySails. При этом кпд огибаемых ветром жестких парусов (а) снижен с 0,5 до 0,2 [9], а кпд вогнутых парусов (б) – снижен за счет сложности их ориентации к направлению ветра, поэтому технико-экономические показатели эксплуатации данных парусных систем, даже при увеличении времени их эксплуатации с 12 до 24 часа в сутки, будут ниже показателей (1).

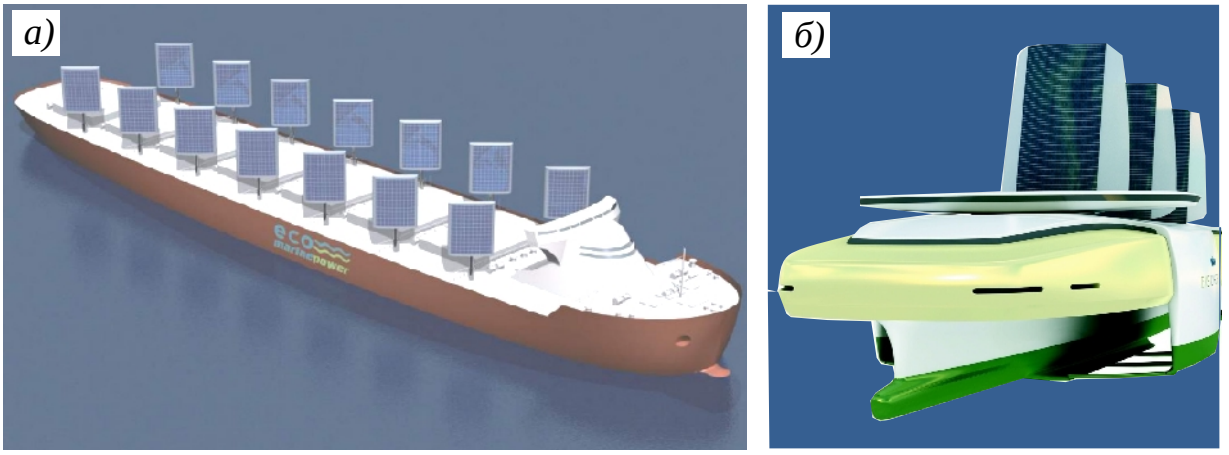

Рис. 4. Системы жестких парусов мачтового типа: а) поворотных в проекте сухогруза будущего 2025 года ***eCO marinepower*** (Япония), б) подъемных в проекте парома будущего 2025 года **E/S ORCELLE** (Швеция).

Для судовых ветряных систем встречного принципа действия наиболее эффективным является использование электрогенераторов с барабанными ветряными колесами 1, установленными вплотную на лобовой поверхности надстроек 2 судна [6], пример такой установки для судна "Atlantic Bulker" с мощностью ДВС 15 МВт показан на рис. 5.

В этом случае вредная работа сопротивления встречному потоку воздуха надстроек судна превращается в полезную работу барабанных ветряных колес. Мощность 1-го ветряного колеса диаметром 0,75 м и длиной 4 м при скорости судна 7 м/с и полном отсутствии встречного ветра составит 1,5 кВт/ч, а при среднерейсовой скорости встречного ветра 14 м/с – мощность достигает 9 кВт/ч. При установке на надстройке судна 32 таких ветряных колес, они обеспечат суммарную мощность до 0,3 МВт/ч, или 6…1,5% мощности ДВС в 5…20 МВт.

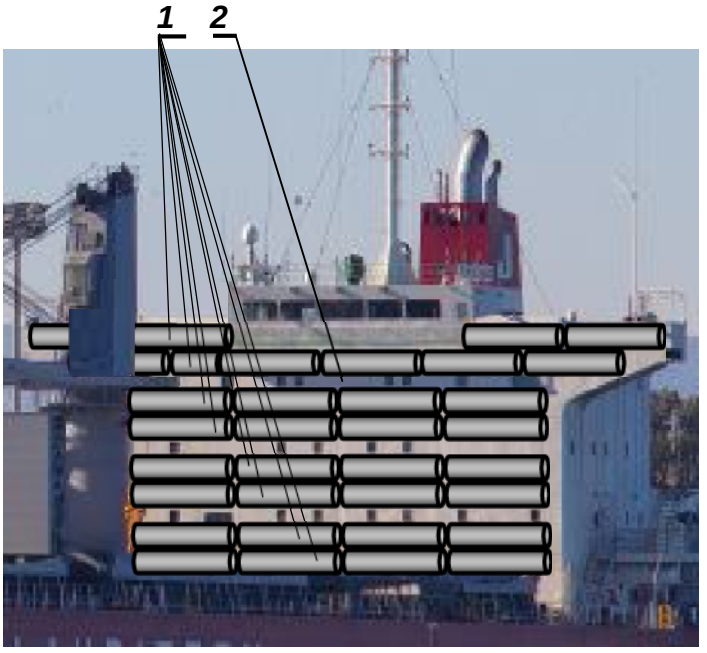

Рис. 5. Судовая барабанная ветряная система встречного действия

Система из 32 модулей стоимостью по 10 тыс. € и стоимости рамы для их установки на палубе судна 50 тыс. €, с общей их стоимостью 10 × 32 + 50 = 370 тыс. €, работающая в среднем до ⅓ длительности года в 365 суток по 24 часа в сутки, обеспечит выработку электроэнергии, которая составит величину N_K:

$$N_K = 0,3(\text{МВт / час}) \times 24(\text{часа / сутки}) \times \frac{1}{3} \times 365(\text{суток}) = 876(\text{МВт}). \quad (2)$$

Однако мощность ветряных систем встречного принципа действия не превышает 1.5…2 МВт, поскольку ограничена площадью лобовых надстроек судна.

В *солнечной судовой энергетике* пока созданы маломощные тихоходные суда, поскольку для обеспечения 1 МВт мощности потребуется площадь солнечных батарей в 5,7 тыс. м^2, что составляет по размерам величину 100×57 м^2 (почти футбольное поле). Такие площади могут иметь только танкера и крытые паромы длиной около 240 м.

При определении технико-экономических показателей существующих солнечных судовых электроэнергетических систем, заменяющих ДВС на 100%, учтен опыт изготовления и эксплуатации яхты-катамарана "TURANOR SOLAR PLANET" (рис. 6), которая прошла реальные испытания в 2007-2008 годах, совершив кругосветный переход за 584 суток [7].

Площадь поверхности солнечных батарей катамарана 537 м^2 и состоит из 38 тыс. фотоэлектрических панелей, генерирующих до 93,5 кВт электроэнергии, которая обеспечивает работу 2-х электродвигателей пиковой мощностью по 250 кВт в стойком режиме, создающих крейсерскую скорость 7,5 узлов. Удельная мощность системы таких батарей 0,175 кВт/м^2. Яхта существенно уступает в скорости обычным парусным яхтам, а ее наиболее эффективная эксплуатация возможна только в экваториальной зоне. Стоимость яхты 12,5 млн. €. При стоимости проекта ≈ 20% от стоимости яхты, которую можно исключить в следующих исполнениях, ее стоимость составит около 10 млн. €, из ко-

торых ¾ – стоимость раздвижных панелей с солнечными батареями и систем для накопления и передачи электроэнергии потребителям.

Рис. 6. Яхта-катамаран "TURANOR SOLAR PLANET", работающая на солнечных батареях

Для уменьшения стоимости аналогичных яхт, швейцарской компанией "Solarwave" и турецкой судостроительной компантей "Nedship" в 2014 г. была построена 62-футовая яхта "Solarwave 62" (Солнечная волна-62) стоимостью около 2 млн. €, показанная на рис. 7 [8].

Рис. 7. Яхта "Solarwave 62" фирмы "Solarwave" на солнечных батареях, построенная в 2014 г. судостроительной компанией "Nedship"

Снижение цены обеспечено уменьшением размеров и водоизмещения яхты, снижением стоимости материалов и сокращением площади солнечных батарей до 80 м^2, что привело к уменьшению их мощности до 15 кВт/ч при удельной мощности с 1 м^2 0,186 кВт/(ч·м^2), и снижению скорости до 7 узлов. Для обеспечения бытовых нужд яхты требуется дополнительная энергия и батареи, или снижение мощности питания главных электродвигателей.

В данном проекте стоимость 1 м^2 панелей солнечных батарей и систем электропитания составила около 1000 €, с общей стоимостью 80 тыс. €. При эффективном использовании системы в среднем до ¾ длительности года в 365 суток по 12 часов в сутки, общий эквивалент энергии N_C, составит:

$$N_C = 1{,}5(Вт/час) \times 12(часов/сутки) \times \frac{3}{4} \times 365(суток) = 49(МВт). \quad (3)$$

Учитывая, что для выработки 1 кВт энергии судовые электрогенераторы расходуют 0,18 кг дизельного топлива или 0,19 кг мазута, то его годовая экономия в пределах мощностей (2)…(3) составит величину ΔQ, тогда при нынешней стоимости 1 кг дизельного топлива около 0,35 € и мазута около 0,2 €, срок окупаемости проектов составит величину ΔT, от 8 до 29 лет, приведенную в табл. 2. При этом учитывали, что расходы на эксплуатацию и обслуживание систем составляют около 10% от их исходной стоимости.

Таблица 2 – Соотношение затрат и сроков окупаемости ветряных систем попутного и встречного принципов действия и солнечных фотодиодных систем

№ варианта	Эквивалент мощности (тыс. кВт)	Расходы на систему (тыс. €)	Экономия топлива ΔQ (тыс. кг)	Стоимость 1 кг топлива (€/кг)	Экономия затрат (тыс. €)	Срок окупаемости ΔT (годы)
1	1000	700×1.1= = 770	180	0.35	63	12,1
			190	0,2	38	20,2
2	876	370×1.1= = 407	149	0.35	52	7,8
			166	0,2	33	12,3
3	49	80×1.1= = 88	14,4	0.35	5	17,6
			15,2	0,2	3	29,3

Следует учесть, что проекты со сроком окупаемости свыше 5 лет считаются экономически нецелесообразными, поэтому экологически чистые проекты [3 – 8] малопривлекательные для судовладельцев и частного капитала и практически сводятся к дотационным. Аналогичные проблемы, но в еще большем масштабе, возникают для прибрежных и континентальных ветряных с солнечных электростанций, поскольку их количество значительно больше судовых.

Проведенный анализ показывает, что реализация принятой на Парижском Саммите 2015 г. COP-21 [3] новой программы по уменьшению загрязнения окружающей среды, предусматривающей предотвращение повышения температуры более, чем на 2^{o}C к 2100 году (при этом задача полного исключения роста температуры пока еще даже не ставится), требуется уменьшение к 2030 году выбросов CO_2 на 40%. В ее рамках 28 стран Евросоюза обязались сократить выбросы CO_2 на 40%, США – на 26…28%, Канада – на 30%, Россия – на 25%, Япония – на 25%, Южная Корея – на 37%, Мексика – на 22% и др. Значительную их долю обеспечит переход на водородное топливо и альтернативную энергетику.

Для борьбы с ухудшением климата, в решениях Парижского Саммита, начиная с 2020 года, предусмотрены ежегодные дотации 100 млрд. $. Однако этих дотационных средств, без привлечения частного капитала, может быть недостаточно даже для решения минимальных поставленных задач.

Следует учесть, что в решениях Парижского Саммита судовая энергетика выведена из списка тем, требующих сокращения выбросов CO_2, поэтому выделяемая с 2020 г ежегодная сумма в 100 млрд. € не сможет быть направлена в сферу судоходства, Поскольку решение проблемы применения альтернативной энергетики на транспортном флоте невозможно без дотационных средств и привлечения частного капитала, требуется решать эту задачу и пересмотреть политику будущих саммитов COP.

Общие выводы по работе

1. На судах транспортного флота до 20% энергии могут вырабатывать ветряные и солнечные энергетические системы, использующие бросовую природную энергию, отказ от которой можно считать расточительством.
2. При современных ценах на топливо около 200 € за 1 т, экологически чистые проекты сводятся к дотационным, поэтому нынешнее резкое снижение цен на нефть чревато отсутствием прогресса в их создании и внедрении, что в угоду ситуационных интересов *некоторых стран мира* увеличивает угрозу усиления парникового эффекта для *всех стран мира*.
3. Экологически чистые судовые проекты могут быть экономически привлекательными для судовладельцев и частного капитала при снижении их себестоимости в 2 раза и при стоимости топлива свыше 450 € за 1 т, что следует учитывать в ценовой политике и в объемах добычи нефти.
4. Для развития судовой альтернативной энергетики, позволяющей снизить выбросы парниковых газов до 10% от исходных 2300 млн. т. в год, следует учесть данное направление в решениях будущих международных саммитов COP и предусмотреть выделение дотационных средств на создание данных систем и экологически чистого транспортного флота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кемпбел К. Грядущий нефтяной кризис – М.: Группа независимых издателей, 1997. -- 210 с.
2. Шурляк В. К. Применение альтернативных видов энергии и альтернативных топлив на морских судах/СПГ как альтернативное топливо для морских судов. Материалы Всероссийского Семинара –- С-Петербург: ГМА им. Макарова, 2012. -- 24 с. www.korabel.ru/filemanoger/OTHER/0/0/3.pdf
3. http://www.ecomarinepower,com/en/energysail
4. https://www.youtube.com/watch.v=wAIAC4vU4lM
5. Zeppelin SkySails, Sales and Servise – Germany: Hamburg, 2007. –- 32 p.
6. Заявка на патент Украины на изобретение № 201405695 «Спосіб установки на судні системи вітрових генераторів барабанного типу. Від 25.05.2014 р. Авт. Настасенко В.О.»
7. SOLAR TURANOR http://alternathistory.org.ua/turanor-planet-solar-samoe-bolshoe-v-mire-sudno-na-solnechnikh-batareyakh
8. www.solarwave-yachts.com
9. COP-21. Парижский Всемирный Саммит 2015 года по проблемам климата (www.un.org/sustainabledevelopment/ru/cop21/)

Поступила в редколлегию 12.01.2016 г.