

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182  
УДК 327:656.61+504.7

В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин<sup>ID</sup>, А.В. Пустошный<sup>ID</sup>, О.В. Савченко  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## НОВОЕ В МЕЖДУНАРОДНОЙ ПОЛИТИКЕ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ СУДАМИ И НЕОБХОДИМЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В МОРСКОМ СЕКТОРЕ. ЧАСТЬ 2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

**Объект и цель научной работы.** Целью работы является анализ технических решений, которые могут быть применены для улучшения энергоэффективности судов, находящихся в эксплуатации, в свете новых положений политики Международной морской организации (ИМО), направленной на снижение эмиссии парниковых газов от международного судоходства. Настоящая работа является второй из серии статей, посвященной рассмотрению аспектов новой политики ИМО и задач судостроения, решение которых необходимо для выполнения актуальных требований.

**Материалы и методы.** Работа выполнена как аналитический обзор имеющихся публикаций по теме. Использован опыт работы Крыловского центра по повышению экономичности судов, а также материалы обсуждения энергоэффективности в корреспондентской группе ИМО с участием специалистов Крыловского центра и Российского морского регистра судоходства (РМРС).

**Основные результаты.** Проанализирована эффективность разработанных во всем мире мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности судов, с учетом опыта их внедрения на начальном этапе регулирования со стороны ИМО эмиссии парниковых газов. Показано, что применение каждого из таких мероприятий может привести к снижению эмиссии международного судоходства на величину порядка 5 %, что недостаточно для выполнения целевой задачи – снижения эмиссии к 2050 г. на 70 % по сравнению с 2008 г.

Кроме того, существуют ограничения по внедрению данных мероприятий. В частности, для России основным препятствием является необходимость практически для всех судов иметь ледовый класс, так что применение целого ряда энергосберегающих устройств связано с опасностью их разрушения льдом. Тем не менее установка приемлемых с точки зрения безопасности энергосберегающих устройств может оказаться полезной, а иногда и единственно возможной мерой для корректировки показателей эмиссии судна после нескольких лет его эксплуатации. Это предусмотрено в рамках рейтинговой системы оценки эмиссии судов согласно принятым в 2021 г. новым положениям Приложения VI МК МАРПОЛ, проанализированным в первой статье настоящей серии.

**Закключение.** Проведенный анализ энергосберегающих мер с оценкой их эффективности и применимости к судам ледового класса позволяет обоснованно подойти к выбору средств, корректирующих энергоэффективность судов в случае, если рейтинг годовой карбоновой интенсивности судна выйдет за пределы требований ИМО, которые по новым положениям Приложения VI МК МАРПОЛ постепенно ужесточаются. В то же время применение рассмотренных мер улучшения энергоэффективности не позволит достичь целевых показателей снижения эмиссии, определенных ИМО. Для их достижения нужны принципиальные изменения в энергетике судов, в частности, переход на альтернативные виды топлива с низким или нулевым карбоновым следом. Этот вопрос будет рассмотрен в третьей статье настоящей серии.

**Ключевые слова:** парниковые газы, регулирование эмиссии, индекс энергетической эффективности, энергосберегающие устройства.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

*Для цитирования:* Магаровский В.В., Половинкин В.Н., Пустошный А.В., Савченко О.В. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 2. Анализ эффективности энергосберегающих мероприятий, применяемых для снижения эмиссии парниковых газов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 1(403): 167–182.

*For citations:* Magarovskiy V.V., Polovinkin V.N., Pustoshnyy A.V., Savchenko O.V. Novelties in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry Part 2. Efficiency analysis of power-saving measures intended to reduce greenhouse gas emissions. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 1(403): 167–182 (in Russian).

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182  
UDC 327:656.61+504.7

V.V. Magarovsky, V.N. Polovinkin , A.V. Pustoshny , O.V. Savchenko  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## NOVELTIES IN THE INTERNATIONAL POLICY TOWARDS MITIGATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM SHIPS AND NECESSARY MEASURES IN MARINE INDUSTRY PART 2. EFFICIENCY ANALYSIS OF POWER-SAVING MEASURES INTENDED TO REDUCE GREENHOUSE GAS EMISSIONS

**Object and purpose of research.** This work was intended to analyse technical solutions that could contribute to power efficiency of in-service fleet in the light of new IMO policy aimed at the mitigation of greenhouse gas emissions from international marine traffic. This is the second publication in the series of articles discussing various aspects of this new IMO policy, as well as shipbuilding challenges that have to be faced in order to meet relevant requirements.

**Materials and methods.** This work is an analytical review of available publications on above-mentioned topic. It relies on Krylov State Research Centre experience in the optimization of ship fuel consumption, as well as on the results of IMO correspondence group discussions on power efficiency with participation of Krylov State Research Centre and RS experts.

**Main results.** This paper discusses the efficiency of measures taken all over the world to improve fuel efficiency of ships taking into account the experience of their implementation at the early stage of IMO regulations for greenhouse gas emissions. It is shown that each of these measures might reduce the emissions from global marine traffic by ~5%, which is not enough to achieve the final goal, i.e. 70% reduction in emissions by the year 2050 as compared to 2008.

Besides, these measures cannot be implemented in full due to certain limitations. For example, in Russia the main obstacle is that practically all its ships must have an ice class, so they cannot use a whole number of various power-saving devices because of their vulnerability to ice impact. Still, provided that power-saving devices are robust enough, they might prove to be a useful (and sometimes the only possible) way to reduce gas emissions of a ship after several years of service. It is incorporated to the system rating the ships in terms of their emission score assigned as per the new provisions of MARPOL Annex VI adopted in 2021, see Part I of this series.

**Conclusion.** Analysis of power saving measures (along with assessment of their efficiency and applicability to ice-class ships) enables a justified selection of power efficiency enhancement tools for a ship in case its annual Carbon Intensity Indicator (CII) goes beyond IMO thresholds that gradually become more and more stringent in accordance with new provisions of MARPOL Annex VI. Still, these measures will not be sufficient to achieve target levels of emission reduction prescribed by IMO. These levels could only be achieved through radical changes in marine power systems, like the transition to alternative fuels with low or zero carbon footprint. This matter will be discussed in the third article of this series.

**Keywords:** greenhouse gases, emission management, power efficiency index, power-saving devices.

*The authors declare no conflicts of interest.*

### Введение

#### Introduction

В первой статье настоящей серии [1] отмечалось, что на начальном этапе внедрения Международной морской организацией (ИМО) правил по регулированию эмиссии парниковых газов (GHG) для снижения индекса энергетической эффективности EEDI на 30 % к 2025 г. применялись в основном два решения.

Первым и наиболее эффективным было изменение проектных характеристик судов, прежде всего, снижение скорости хода. Так, на заседании Комитета ИМО по защите морской среды (MEPC)

судовладелец контейнеровозов сообщил, что для выполнения требований по EEDI на его новых судах принято проектное решение о снижении скорости полного хода с 24 до 18 уз при одновременном увеличении контейнерной вместимости. Этот пример дает представление о том, насколько серьезные меры применялись для выполнения требований ИМО по снижению эмиссии на 2013–2025 гг. с использованием регулирования индекса энергетической эффективности.

Вторым направлением снижения EEDI на начальном этапе было широкое внедрение средств энергосбережения, ранее разработанных в исследовательских центрах мира, включая различные

гидродинамические устройства для утилизации потерь энергии на корпусе и гребном винте, а также систем утилизации энергии выхлопных газов двигателей.

В [1] рассмотрены основные аспекты новой политики ИМО по дальнейшему снижению эмиссии от мирового судоходства. Важнейшим из них является введение ужесточающихся требований к эксплуатируемым судам с помощью рейтинговой системы вновь введенного индикатора годовой карбоновой интенсивности эксплуатирующихся судов СИ, рассчитываемого на основе данных о годовом расходе топлива. Эта рейтинговая система приводит к необходимости внедрения все новых мер по снижению эмиссии для уже эксплуатируемых судов. При этом целевыми показателями стали существенно более жесткие требования снижения эмиссии: на 40 % к 2030 г. и на 70 % – к 2050 г. по сравнению с 2008 г.

Введение новых требований заставило МЕРС ИМО организовать корреспондентскую группу (с участием специалистов Крыловского центра и РМРС) для анализа эффективности различных мер по снижению эмиссии: как уже внедренных, эффективность которых подтверждена опытом применения на первом этапе регулирования эмиссии, так и мер, которые еще находятся в разработке.

В настоящей статье такой анализ представлен с учетом опыта Крыловского центра и особенностей применения энергосберегающих мероприятий в России, где большинство судов должны иметь один из ледовых классов. Все меры сгруппированы в зависимости от принципов получения эффекта снижения эмиссии. Оценка эффективности мероприятий может существенно варьироваться, отражая разнообразие опыта их внедрения в мире.

## Проектные решения

### Design solutions

К группе мероприятий, требующих изменения проектных решений судна, относят обработку обводов корпуса, оптимизацию надстроек, оптимизацию гребных винтов (ГВ), применение колонок в качестве главных движителей, а также интеграцию корпуса, валолинии и движителей.

*Эффект обработки обводов корпуса* для снижения сопротивления ограничен наличием требований к количеству и типу груза, размерами портов и терминалов, глубинами акваторий. В ходе многовекового развития судостроения отработаны надежные принципы проектирования обводов для

заданных проектных требований. При выборе главных размерений и проектировании обводов определяющим параметром является значение ходового числа Фруда  $F_n = V / \sqrt{gL}$  (где  $V$  – скорость судна,  $L$  – его длина), характеризующего картину волнообразования [2–3].

Мировой опыт позволяет проектировать суда с обводами, обеспечивающими высокую степень близости сопротивления к минимальным величинам, которые можно считать в принципе достижимыми при данных проектных требованиях и ограничениях. Поэтому потенциал снижения сопротивления при отработке обводов весьма ограничен. Тем не менее наличие проектных требований и ограничений, уникальных для каждого судна, а также стремление максимально увеличить грузоподъемность приводят к тому, что первично принятые проектантом обводы корпуса всегда не совсем оптимальны и потому требуется их дополнительная отработка.

В последние десятилетия развитие расчетных методов привело к тому, что они стали обязательным инструментом первичной отработки обводов. Отработка для снижения волновой составляющей сопротивления (без учета вязкости) производится в ходе сопоставительных расчетов для ряда вариантов корпуса с систематически изменяемыми обводами. В Крыловском центре такие расчеты проводятся достаточно быстро, с помощью компьютерной программы собственной разработки Shipwave (авторы – И.А. Чичерин, М.В. Галушина, А.М. Клубничкин), реализующей нелинейный панельный метод решения волновой задачи. Однако эти методы, эффективные при сравнительных расчетах волнового сопротивления, не позволяют точно определить величину сопротивления. Поэтому сохраняется роль модельного эксперимента.

Более сложные и трудоемкие расчеты проводятся для выявления вязких эффектов, влияющих на вязкостное сопротивление (вихреобразование, отрывные явления), в т.ч. с учетом волнообразования. Расчеты проводятся с использованием методов компьютерной гидродинамики CFD (Computer Fluid Dynamic), объединяющих методы RANS (Reynolds Average Navier Stocks), LES (Large Eddy Simulation) и DES (Detached Eddy Simulation). По опыту суперкомпьютерного центра Крыловского центра, приемлемая точность расчетов методами CFD достигается на высококачественных сетках большой размерности. Проведение сравнительных расчетов для различных вариантов корпуса не укладывается в короткое время разработки проек-

тов, проигрывая модельному эксперименту как по срокам, так и по стоимости работ, поэтому модельный эксперимент остается неотъемлемой частью проектирования судов.

Опыт работы Крыловского центра показывает, что при отсутствии крупных ошибок в исходном корпусе максимальный эффект бассейновой обработки может составлять 2–3 % (реже 5 %) снижения сопротивления. Меньшие по размеру и скоростные суда более чувствительны к деталям проектирования, т.к. имеют большую долю волнового сопротивления.

Полностью отражает возможности и политику в снижении сопротивления выдержка из отчета комитета ИТТС по сопротивлению на конференции 2014 г. [4]: «Заинтересованность морской индустрии одновременно в снижении расхода топлива и как следствие, в сокращении расходов, а также в снижении вредных выбросов, заставляет сконцентрироваться на возможности аккуратной реализации в проектах малых изменений корпуса и выступающих частей для снижения сопротивления».

В ходе борьбы за снижение эмиссии GHG были развиты новые аспекты обработки корпуса. При обработке стали учитывать факторы, определяющие интегральный расход топлива судном при различных условиях его эксплуатации, включая:

- обработку обводов с учетом профиля скоростей эксплуатации судна;
- обработку обводов не только для проектной осадки, но и принимая во внимание необходимость снижения сопротивления на других осадках (балласт, полный груз, частичная загрузка, дополнительная балластировка), в т.ч. исследование влияния дифферента, что дает возможность расчета расхода топлива с учетом времени эксплуатации на каждом из режимов за жизненный цикл судна;
- оптимизацию для хода на нерегулярном волнении вместо традиционной обработки обводов в опытовом бассейне для условий спокойной воды (что стало общепринятым).

Эффект снижения сопротивления при оптимизации дифферента, по данным [4], может достигать 10 %, из них 80 % – благодаря более благоприятному обтеканию бульба.

Эксперты ИМО оценивают интегральный эффект снижения расхода топлива за жизненный цикл при обработке обводов с учетом спектра скоростей эксплуатации и волнения в 5–7 %.

Для судов с ледовым классом ниже 1ASuper (PC6, Arc5) оптимизация корпуса возможна, но

следует принимать во внимание ограничения ледового класса. Начиная с ледового класса Arc5 РМРС (PC6, 1ASuper) обязательно использовать ледокольный нос (без бульба) и не применять транцевые обводы. Это приводит к увеличению сопротивления на полном ходу до 20–30 %. Для таких судов оптимизация проводится, но она направлена, прежде всего, на снижение ледового сопротивления и улучшение ледопроеходимости.

*Оптимизация надстроек* в ходе проектирования направлена на снижение воздушного сопротивления судна в спокойном воздухе и при ветре, что актуально только для судов с большими надстройками и для судов, работающих на относительно высокой скорости. Так, для судов РСС (перевозчиков автомобилей), имеющих высокую и полную надводную часть от носа до кормы и достаточно высокое воздушное сопротивление, применение надстроек, интегрированных с корпусом, может привести к снижению ветрового сопротивления на 5–30 %, что соответствует снижению расхода топлива до 2 %.

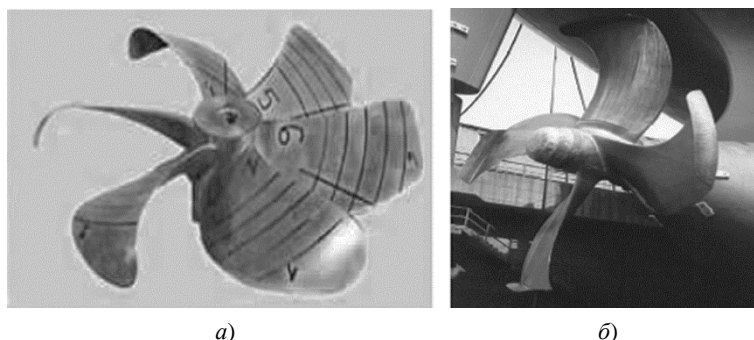
Для судов других типов потенциал снижения расхода топлива за счет обработки конфигурации надстроек оценивается в 1 %. Для снижения воздушного сопротивления возможны проектирование более обтекаемых надстроек, разработка специальных компоновок (например, для снижения воздушного сопротивления кранов на палубе), в ряде случаев – применение спойлеров.

*Эффект от оптимизации гребных винтов* в наиболее общем случае может быть достигнут при максимально возможном, с учетом требований, связанных с кавитацией и вибрацией, снижении дискового отношения. Возможно также повышение КПД винта при увеличении его диаметра со снижением частоты вращения (RPM). Диаметр ограничен требованием по величине клиренса между гребным винтом и корпусом, а также необходимой величиной заглубления винта на грузовой и/или балластной осадке. Поэтому низкооборотные винты больше подходят для судов с большой осадкой, таких как танкеры, балкеры и ряд судов для генеральных грузов. В меньшей степени они годятся для контейнеровозов и редко устанавливаются на суда типа Ro-Ro, Ro-Pax и круизные суда.

За рубежом упоминаются проработки для повышения КПД винта увеличения нагрузки конца лопасти, однако это решение связано с усилением кавитации на лопастях и вибрации. Тем не менее иногда эта мера может применяться для тихоходных судов.

**Рис. 1.** Винт Каппеля (а) и винт CLT (б) [8]

**Fig. 1.** Kappel (a) and CLT (b) propeller [8]



а)

б)

Потенциал повышения КПД винта за счет его обработки оценивается специалистами до 3 %, что подтверждается опытом Крыловского центра, где при проектировании проводятся тщательные расчеты вариантов винта с малым шагом изменения параметров.

При проектировании судна решается вопрос о применении винтов фиксированного или регулируемого шага: ВФШ или ВРШ. КПД вторых в общем случае несколько ниже, чем первых. Однако ВРШ могут обеспечить более эффективную работу комплекса «двигатель – движитель» при существенной вариации нагрузки гребного винта в различных условиях эксплуатации (например, при неблагоприятных погодных условиях или при длительной эксплуатации судна на различных осадках). ВРШ также значительно облегчает реверс и маневрирование судна, в частности, при прямой передаче от дизеля на винт, что рассматривается как наиболее экономичная компоновка.

В ряде источников среди энергосберегающих устройств рассматриваются две активно внедряемые инновационные конструкции винта (рис. 1).

*Первая конструкция.* Винт CLT (Contracted and Loaded Tip Propeller, дословно – обжатый винт с нагруженным концом) [5–6] предполагает повышение КПД за счет следующих конструктивных особенностей. Концы лопасти CLT нагружены в результате увеличения шага к концу лопасти и конечной хорды на ее конце. Поэтому на конце лопасти создается значительный упор, что позволяет снизить средний гидродинамический шаг винта. Чтобы предотвратить перетекание воды с нагнетающей на засасывающую сторону (снизить интенсивность концевой вихря и его влияние на КПД, кавитацию и вибрации), на конце лопасти крепится концевая пластина в направлении нагнетающей стороны. Рекламные данные CLT говорят об эффекте повышения КПД винта от 4 % при коэффициенте нагрузки винта по упору порядка  $St = 1$  и до 10 % при  $St = 5$ .

*Вторая конструкция.* Близкие по идее винты Каппеля [7–8], в которых для снижения эффекта негативного влияния перетекания потока через конец лопасти и концевой вихря на КПД лопасти выполнены с отгибом конца (наподобие загнутых концов крыльев самолетов). Рекламные материалы прогнозируют повышение КПД винтов Каппеля на 4–5 % по сравнению с обычным винтом.

Отметим, что в личных контактах в комитетах ИТТС обсуждалась информация о том, что при применении CLT или винтов Каппеля не для всех судов удавалось выделить положительный эффект, причем заранее определить, в каком случае винты будут неэффективны, до сих пор затруднительно.

Для судов ледовых классов оптимизация винтов является рутинной практикой, однако для высоких ледовых классов приоритетом является обеспечение необходимого упора вперед и на реверс и надежности при работе во льдах. Такие винты обычно имеют более толстые лопасти и другие конструктивные особенности, которые могут быть неблагоприятны с точки зрения КПД на ходу в чистой воде и частичной кавитации. Для средних ледовых классов (ниже 1ASuper и эквивалентных) оптимизация винтов для условий чистой воды возможна, но ограничена требованиями ледового класса [9].

CLT и винты Каппеля не применимы для винтов даже легких ледовых классов из-за опасности, что их лопасти с отгибом или с пластиной на конце погнутся при контакте со льдом, как это неоднократно имело место для винтов с саблевидными лопастями.

*Применение колонок в качестве главных движителей* в некоторых источниках рассматривается как средство энергосбережения, т.к. гребной винт на тянущей колонке работает в более однородном потоке, что позволяет спроектировать его с более высоким КПД по сравнению с винтами на валу, функционирующими в существенно более неоднородном потоке. Однако, по мнению зарубежных

экспертов ИТТС и МЕРС, собственное сопротивление колонки как минимум сводит к нулю эти преимущества. Это совпадает с опытом работы Крыловского центра по проектированию винтов для колонок. Поэтому колонки вообще не следует относить к средствам энергосбережения.

Как отдельное направление энергосбережения рассматривается *интеграция корпуса, движителя и валовых линий*. Такое решение может оказаться существенно эффективнее, чем простое улучшение одного из элементов системы. Совместное изучение и настройка режимов работы двигателя и винта с учетом взаимодействия винта и корпуса для различных условий позволяет более полно учесть все режимы эксплуатации судна и определить оптимальные технические решения. По опыту компании Conoship International, такая интеграция может привести к эффекту энергосбережения до 20 %.

Для судов среднего и высокого ледовых классов такое рассмотрение характеристик режимов работы проводится, но это связано с надежностью работы во льдах и не относится к энергосбережению на чистой воде.

## Мероприятия по утилизации энергии гребного винта

Propeller energy utilization measures include application of coaxial propellers

В группу мероприятий по утилизации энергии гребного винта входят: соосные винты противоположного вращения, колесо Грима, винты в насадке, закручивающие устройства перед винтом, раскручивающие устройства за винтом и двухсеговая корма.

*Соосные винты противоположного вращения* являются комплексным движителем, в котором задний винт утилизирует энергию закрутки струи за передним винтом. Для исключения неблагопри-

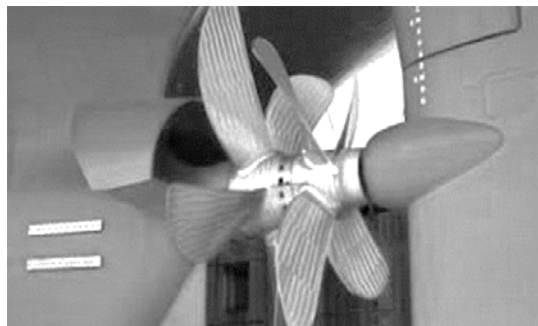
ятного воздействия кавитации концевой вихря переднего винта на лопасти заднего диаметр заднего винта обычно меньше диаметра переднего. Поэтому задний винт охватывает только часть струи носового винта, что снижает эффект утилизации энергии ее закрутки. Сложная система привода (соосный валопровод) создает определенные механические потери, что также снижает пропульсивный КПД.

Имеется большой разброс сведений об эффективности соосных винтов – от 0 до 20 %, причем утверждается, что эффекты 15 и 16 % зарегистрированы в двух различных натурных испытаниях (необходимо учитывать, что соосные винты испытывались только для случаев, когда их применение было признано практически целесообразным по результатам модельной отработки). При размещении соосной пары на валу привод мощности к соосным винтам осуществляется через короткий валопровод (рис. 2а), и таким образом, данную компоновку проще использовать на транспортных судах.

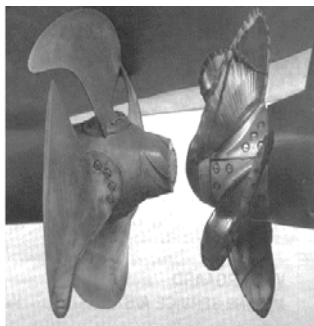
Соосные винты также используются в варианте размещения заднего винта на тянущей колонке (рис. 2б) или обоих винтов на одной колонке. В этом случае зарегистрированный эффект энергосбережения на модели составлял от 0 до 10 %. Из-за сопротивления гондолы и стойки колонки КПД такой системы даже теоретически должен быть существенно ниже, чем для соосной системы, смонтированной на одном валу.

В отношении КПД соосных винтов необходимо сделать ряд замечаний.

Во-первых, анализ данных испытаний ряда работ (в т.ч. считающихся классическими исследований, проведенных в бассейне Тэйлора в США и Голландии [10–13]), показал, что КПД соосной пары винтов превышал КПД сопоставимого одиночного винта не более чем на 13–14 %.



а)



б)

**Рис. 2.** Соосная пара гребных винтов: а) на валу (сверху, фото из открытых источников); б) с колонкой (спроектирована Крыловским центром для японского парома, фото АВВ)

**Fig. 2.** Coaxial couple of propellers: а) shafted (top, photo in public domain); б) pod-based (Krylov State Research Centre design for a Japanese ferry, courtesy of ABB)

Во-вторых, Крыловский центр участвовал в исследованиях и проектировании соосных пар с расположением задних винтов на колонке [14]. В рамках этих работ для некоторых судов получить положительный эффект энергосбережения вообще не удалось. Эффект увеличения КПД по сравнению с одиночным винтом зависит от удельной нагрузки движителя (упор на единицу площади винта), соотношения диаметров переднего и заднего винта и других факторов.

Анализ результатов исследований показал, что большую роль в эффективности соосных винтов играет суммарное дисковое отношение двух винтов. Если суммарное дисковое отношение пары превышает дисковое отношение одиночного винта, эффективность хорошо спроектированного одиночного винта может быть конкурентной с КПД пары. В то же время при КПД, конкурентном с одиночным винтом, и даже при эффекте порядка 4–5 %, соизмеримом с эффектом применения других энергосберегающих устройств, установка дорогостоящей дополнительной колонки для заднего винта или создание сложной соосной валолинии становятся коммерчески не привлекательными. Поэтому эффект, оправдывающий применение сложной и дорогой соосной системы (как на валу, так и в варианте с колонкой), может достигаться далеко не для каждого судна.

В-третьих, наибольший эффект соосных винтов следует ожидать, когда одиночный винт быстроходного судна будет подвержен влиянию кавитации (как правило, когда его диаметр ограничен). В этом случае соосные винты в отсутствие кавитации могут обеспечить значительное преимущество по энергосбережению. Такая ситуация имела место на японских скоростных паромках, на которых эти винты были успешно внедрены.

Для ледовых судов применение сложных соосных валолиний будет заведомо подвержено повреждениям. Соосная система с задним винтом на колонке менее сложна и, в принципе, может быть использована для ледовых транспортных судов. Имеется один пример применения соосной системы для судов ледового класса: установка колонок Steerprop с механической передачей на два винта, расположенных по обоим концам гондолы. Данные колонки применяются на некоторых зарубежных ледоколах, однако для таких судов экономия топлива на чистой воде неактуальна.

*Свободно вращающееся колесо за винтом (колесо Грима)* представляет собой свободно вращающийся винт, устанавливаемый позади главного винта



**Рис. 3.** Колесо Грима. На фото также видна система крыльев, которые спрямляют поток, натекающий на винт [8]

**Fig. 3.** Grim vane wheel. The photo also shows the stator that rectifies propeller inflow [8]

(рис. 3). Диаметр колеса больше, чем диаметр винта. Часть колеса, расположенная непосредственно за винтом, вращается как турбина закрученным за винтом потоком, при этом часть лопастей колеса, расположенная за пределами диаметра главного винта, работает как винт и создает упор. Зарегистрированы эффекты снижения расхода топлива в диапазоне 0–10 %, хотя величину 10 % эксперты считают завышенной. Колесо Грима берет на себя часть нагрузки винта, так что главный винт может быть меньше по диаметру и для его вращения может применяться двигатель меньшей мощности.

Однако опыт внедрения колеса Грима показывает, что его длинные тонкие лопасти уязвимы для повреждений, особенно в тяжелых морских условиях. Кроме того, справедливо отмечается, что если обводы кормовой оконечности позволяют разместить колесо Грима, то может быть размещен и одиночный винт большего диаметра, что способно привести к такому же снижению расхода топлива.

Поскольку колесо Грима имеет большие проблемы с прочностью даже в чистой воде, проблема прочности длинных узких лопастей колеса при взаимодействии со льдом становится неразрешимой, и его применение на судах ледовых классов неприемлемо.

*Конфигурация «Винт в насадке»* в ряде случаев рассматривается как средство энергосбереже-

ния. Насадка как кольцевое крыло генерирует дополнительный упор, но имеет и собственное сопротивление. При большой нагрузке винта это сопротивление более чем компенсируется позитивным эффектом от винта с насадкой. Поэтому насадку можно рассматривать как энергосберегающее устройство при коэффициенте нагрузки двигателя по упору  $St$  выше 2–2,5, характерной для таких судов, как танкеры, балкеры, буксиры, некоторые суда снабжения. Потенциал снижения расхода топлива таких судов может составлять 5–20 %, причем 10 % эксперты рассматривают надежной величиной.

Винты в насадке в ряде случаев применяются на судах легкого и среднего ледовых классов, например на буксирах, для увеличения упора при большой нагрузке винта, но это не может рассматриваться как задача энергосбережения. Недостатком применения насадок в ледовых условиях является частая блокировка насадки льдом, что требует реверсирования вращения винта, чтобы «промыть» лед из насадки. На судах высоких ледовых классов применяются только открытые винты.

К устройствам, закручивающим поток перед гребным винтом (pre-swirl devices), относятся асимметричная корма, которая может быть создана только на вновь строящихся судах, а также крылья, устанавливаемые на корпусе перед винтом (в т.ч. на эксплуатирующихся судах в процессе ремонта). Одно из объяснений эффекта направляющих крыльев, устанавливаемых с обеих сторон старнпоста, – уменьшение поперечных течений, возникающих в корме на судах полных обводов или с кормовым бульбом. Поэтому наибольший эффект следует ожи-

дать для одновальных судов полных обводов, таких как танкеры и балкеры.

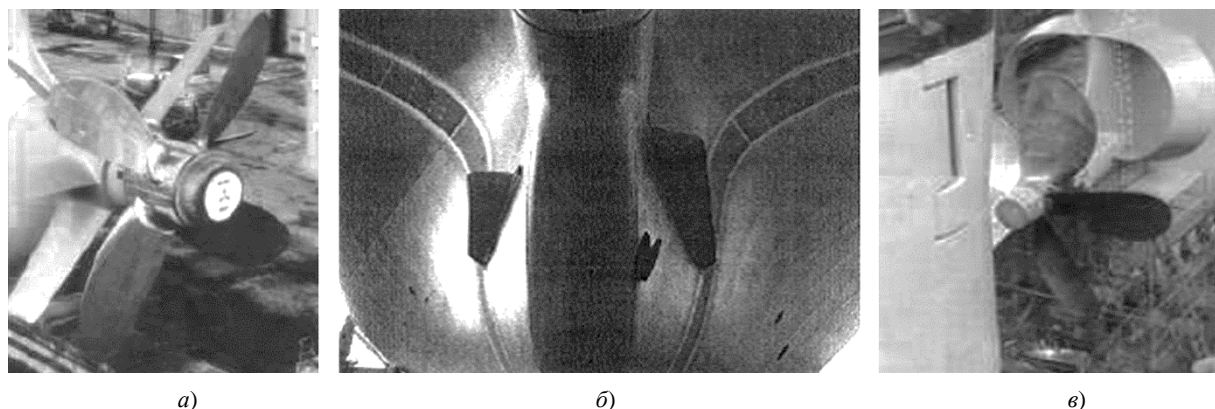
По данным модельных испытаний для асимметричной кормы, снижение мощности прогнозировалось для разных судов в пределах 1–9 %. При применении системы крылышек снижение расхода топлива может достигать 3–8 %, причем эффект крылышек 7–8 % подтвержден рядом натурных испытаний. Эффект, зарегистрированный в натурных испытаниях, во многих случаях подтверждал модельные прогнозы, однако в ряде других случаев эффект на натуре оказывался существенно ниже, т.е. прогнозируемая эффективность таких устройств пока ненадежна.

К закручивающим устройствам, которые могут устанавливаться на эксплуатируемых судах, относят также насадки, выравнивающие поток, и комбинации выравнивающих насадок и крыльев (например, насадки Мэвиса [15]).

Выравнивающие насадки (рис. 4) состоят из двух полукольцевых конструкций с крыловым профилем сечения, устанавливаемых на каждой стороне кормовой части корпуса перед винтом. Они ускоряют поток, натекающий на винт, в верхнем квадранте, и замедляют поток в нижней части диска винта, так что поток становится более однородным. Коэффициент попутного потока при этом меняется незначительно.

Снижение мощности и расхода топлива для хорошо спроектированных преднасадок обусловлено несколькими факторами, включая:

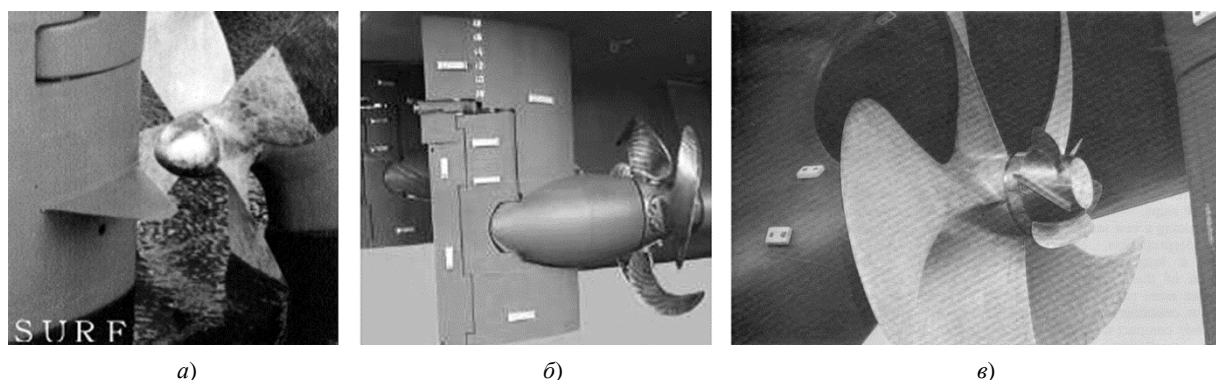
- улучшение КПД винта за счет более однородного натекающего на винт потока;
- снижение сопротивления благодаря уменьшению отрывных зон на кормовой оконечности,



**Рис. 4.** Закручивающие поток выравнивающие крылья (а), крыльевое устройство (б), выравнивающие полунасадки (в) [8]

**Fig. 4.** Equalizing fins for flow turbulization (a); vane (b); partial ducts for flow equalization (c) [8]





**Рис. 5.** Примеры раскручивающих устройств: а) крылья на руле; б) интегрированные установки «винт – руль»; в) установка крыльевой системы на обтекателе гребного винта BCF [8]

**Fig. 5.** Examples of turbulizers: a) rudder fins; b) integrated “propeller-rudder” systems; c) vane system on BCF propeller fairing [8]

наличие направленной вперед подъемной силы на насадке;

- благоприятную дополнительную закрутку натекающего на винт потока за счет специальной ориентации осей насадок;
- улучшенную управляемость благодаря спрямлению потока, натекающего на рули.

Эффект закручивающих устройств перед винтом оценивается до 4–8 % снижения потребной мощности, величина 7–8 % подтверждена в натуральных условиях при применении насадок Мевиса, а также прогнозируется при совместном применении закручивающих устройств перед винтом и раскручивающих устройств за винтом.

Закручивающие устройства перед винтом не применяются для судов ледовых классов из-за опасности срезания устройств вместе с частью обшивки корпуса льдом.

К устройствам, раскручивающим струю за винтом (post-swirl devices), относят различные крылья, устанавливаемые на руле и создающие дополнительный упор, бульбы на руле, устанавливаемые совместно с крылышками, асимметричные рули, а также установку крыльевой системы на обтекателе гребного винта BCF (Boss Cap Fins).

Раскручивающие устройства могут применяться на новых и уже эксплуатирующихся судах. Данные модельных испытаний позволяли прогнозировать снижение потребной мощности в диапазоне 1–8 %. В ходе натуральных испытаний получен эффект 8–9 % при установке крыльев на руле и 3–4 % для BCF. Однако, как и для закручивающих устройств, в ряде случаев эффект сложно выделить при натуральных испытаниях.

К числу раскручивающих устройств относят также винт и руль, интегрированные в одну установку (рис. 5), при этом на руле устанавливается бульба, расположенный сразу за осью винта. Эффект такого устройства задокументирован как для модельных, так и для натуральных условий – как типичное может рассматриваться снижение потребной мощности на 5 %. Устройство применяется для судов для генеральных грузов, RoPax и контейнерных судов, работающих на относительно высоких скоростях хода.

Раскручивающие устройства с установкой крылышек на руле не могут применяться на судах ледовых классов из-за опасности срезания крыльев льдом. Интегрированная схема «руль – винт» и асимметричный руль также неприемлемы для судов ледовых классов, т.к. они должны работать во льдах безопасно и эффективно на переднем и заднем ходу. Исключение составляет BCF с короткими прочными крылышками на обтекателе винта.

Двухскеговая корма обеспечивает улучшение пропульсивного КПД за счет снижения нагрузки винтов и эффективна для широких судов. Определенный наклон стоек выкружек для образования вихрей, закручивающих поток перед винтом, может привести к энергосберегающему эффекту. Эффект для различных судов составлял 3–6 %.

На судах высоких и средних ледовых классов для защиты валов всегда формируются усиленные выкружки, так что близкий аналог двухскеговой конфигурации является типичной для судов ледовых классов, но это не рассматривается как энергосберегающее решение.

## Покрyтия корпуса, воздушная смазка и подвод полимеров

Hull coating, air lubrication and polymers

*Покрyтия корпуса* исследовались в связи с разработкой как противообрастающих, так и «сбрасывающих» обрастание (foul-release) красок. Результаты испытаний на ряде норвежских судов позволяют сделать вывод, что производители уже преодолели последствия запрещения ИМО [16] широко использовавшихся ранее покрyтий на базе трибутилоловянистых систем (ТВТ), содержащих очень вредные для морской фауны вещества. Разработаны новые покрyтия, эффективность которых оценивается в 1–3 % снижения сопротивления (большая величина соответствует судам, где преобладает сопротивление трения).

В настоящее время в качестве перспективных рассматриваются покрyтия, основанные на нанотехнологиях, в частности гидрофобные. Они могут напыляться на корпус как на новых, так и на эксплуатирующихся судах. Такие покрyтия еще находятся на стадии исследований, но уже рекламируются как способные значительно снизить сопротивление трения подводной части (до 15 %) и замедлить обрастание на длительный срок.

Следует отметить, что, по данным первых исследований нанопокрyтий в Крыловском центре [17–18], они оказывают влияние на сопротивление в очень узком диапазоне скоростей, как правило, не совпадающем с диапазоном, соответствующим натурным условиям. Эффект гидрофобных нанопокрyтий практически все исследователи связывают с эффектом снижения трения пузырьками воздуха, застрявшими между элементами шероховатости покрyтия, но с вымыванием воздуха турбулентными потоками при больших числах Рейнольдса эффект резко снижается. Во всяком случае такие покрyтия нуждаются в дополнительных исследованиях в сфере и гидродинамики, и экономики.

Для судов высоких и средних ледовых классов применимы только специально разработанные покрyтия, способные противостоять взаимодействию корпуса со льдом, которые не рассматриваются как средство энергосбережения.

*Подвод полимеров* к поверхности как мера снижения сопротивления трения исследуется в России и в мире минимум в последние 30–40 лет. Считается, что эффект снижения сопротивления обусловлен влиянием длинных молекул полимеров на турбулентные структуры. Однако до настоящего момента подвод полимеров не является технологией,

доведенной до промышленного уровня, и остается на уровне академических упражнений. В последнее время обострились возражения против этой технологии со стороны «зеленых» – в связи с необходимостью постоянного ввода полимеров в воду.

*Воздушная смазка подводом воздушных пузырьков к корпусу или создания искусственных каверн на днище* в данный момент широко исследуется. Считается, что данная технология может снизить сопротивление до 4–5 %, однако при этом нужно учитывать затраты энергии на подвод воздуха. Кроме того, по опыту эксплуатации судов с подводом пузырьков фирмой – партнером Крыловского центра, в ходе эксплуатации в морских условиях отверстия окисляются и зарастают морской фауной, так что эффективность подвода за год-два резко снижается.

В Крыловском центре давно исследуются различные варианты применения воздушных каверн [19–21], эффективность которых для полных судов с большой длиной цилиндрической вставки может достигать 20–25 % снижения потребной мощности. Однако применение каверн связано с некоторой потерей полезного объема судна за счет необходимости создания ниши на днище, в которой и образуется каверна. Кроме того, модельные испытания показали сильную зависимость эффекта каверны от погодных условий: так, в шторм каверна может разрушаться и ее эффект способен снизиться до 0, а сопротивление корпуса может даже увеличиться из-за отрыва потока со стенок ниши.

На судах ледового класса воздушная смазка запатентована и испытана, но ее цель – снижение сопротивления трения льда о корпус. Любые отверстия для подвода воздуха или полимера для судов ледовых классов должны иметь подогрев для сохранения работоспособности во льдах.

Перспективы применения воздушной смазки могут рассматриваться с большим оптимизмом, если будет найден надежный метод создания и удержания каверны (или серии тонких каверн) на днище существующих судов без изменения днищевых обводов. Именно на развитие этого решения должны быть направлены современные исследования.

## Технологии утилизации энергии двигателей

Technologies for engine power utilization

К данной группе технологий относят утилизацию энергии выхлопных газов двигателей, гибридные двигатели и технологию с применением топливных элементов.

*Системы утилизации энергии выхлопных газов дизелей* начали внедряться много лет назад. Базовым элементом системы является турбина, которая утилизирует часть энергии выхлопных газов из ресивера выхлопных газов. Турбина связывается с электрогенератором или валом двигателя. Ее эффективность варьируется в пределах 3–6 % энергии главного двигателя.

В последние годы развиваются более передовые и коммерчески привлекательные системы. Пример такой системы для низкооборотных дизелей – TES (Thermo Efficiency System) фирмы B&W, она комбинирует утилизационную турбину в потоке выхлопных газов с паровым циклом, который обеспечивается теплом выхлопных газов и вращает паровую турбину. Две турбины сочленяются с генератором для производства электроэнергии, которая может использоваться для вспомогательных двигателей или других потребителей на судне.

Оценка дополнительной энергии колеблется в пределах 9–11 % мощности главного двигателя (доля турбин составляет 5 и 6% соответственно от утилизационной турбины выхлопных газов и паровой турбины). При том, что температура выхлопных газов в зависимости от типа двигателей варьируется в диапазоне 300–350 °С, КПД парового цикла при использовании дизельного топлива ограничен минимальной рекомендованной температурой выхлопных газов в трубе. Она должна быть выше 180 °С, чтобы контролировать формирование отложений и коррозии окислов серы, связанных с использованием тяжелых сортов топлива.

При применении для морских двигателей газового топлива потенциал восстановления энергии более высок, что обусловлено более высокой температурой выхлопных газов (обычно в диапазоне 400–430 °С), а также возможностью снизить температуру газов на трубе ниже 100 °С. Снижение температуры на трубе происходит из-за того, что при сжигании газового топлива отсутствует сера и содержится минимальное количество твердых частиц, поэтому выхлопная система мало уязвима с точки зрения коррозии при низких температурах выхлопных газов.

Так, по данным оценок, при температуре выхлопных газов 430 °С и температуре на трубе 50 °С следует ожидать величины утилизации тепловой энергии выхлопных газов 13 % мощности на валу. По мнению экспертов корреспондентской группы МЕРС, при применении газового топлива с меньшим содержанием CO<sub>2</sub> при сгорании в сочетании с описанными выше дополнительными системами утилизации энергии выхлопных газов суммарный

эффект снижения эмиссии парниковых газов может достигать до 22 %.

Использование систем утилизации энергии сложно и неэффективно для судов ледовых классов. При операциях во льдах требуется частое применение реверса и работы двигателя на частичной нагрузке. Как следствие, например, генерация пара в утилизационном котле от тепла выхлопных газов будет нестабильна. Кроме того, во льдах используется подогрев топлива, балласта и другого специального оборудования, что сокращает возможности использования пара для турбогенератора.

*Технологии гибридных двигателей* выгодно применять, когда судно имеет несколько двигателей и эксплуатируется на существенно различающихся режимах нагрузки энергетической установки. Возможности энергосбережения возникают за счет того, что при частичной нагрузке часть двигателей могут работать на оптимальном режиме, в то время как другие будут просто отключаться.

*Топливные элементы (ТЭ)* имеют высокий потенциал термального КПД и низкую эмиссию и в принципе могут представлять собой интересную альтернативу использованию традиционных двигателей внутреннего сгорания для транспортных судов. ТЭ рассматриваются как перспективные генераторы энергии для обогрева судов, а в комбинации с дизелями – как часть гибридной пропульсивной системы. Небольшие ТЭ уже сейчас используются как главные источники энергии для малых пассажирских барж.

Использование ТЭ на борту крупно- и среднетоннажных судов осложняется размерами и объемом ТЭ. Кроме того, ТЭ используют нетрадиционные виды топлива, такие как водород, метанол, дизель, с низкой точкой воспламенения, требующие существенной подготовки топлива. Развитие технологии приводит к постепенному снижению цены и размеров, а также увеличению надежности.

Вопрос безопасности хранения и использования на борту топлива (водорода), сегодня также решается – в процессе завершения разработки международного стандарта безопасности. Соответствующие исследования находятся в стадии натурных проверок на судах и включают следующие направления:

- а) развитие топливных систем для ТЭ, способных работать на жидком топливе;
- б) системы утилизации энергии (котлы, турбины) для использования совместно с высокотемпературными ТЭ (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell) и твердооксидными ТЭ (SOFC – Solid Oxid Fuel Cell);

- в) стандартизация систем ТЭ (включая вспомогательные системы) в модулях от 0,5 МВт до 1,0 МВт;
- г) системы безопасности бортового хранения и работы с топливом;
- д) условия развития (надежность, возможность поставок) и проверка работы систем в морских условиях (вибрации, ускорения, соленость, влажность, вариативность мощности).

Для вспомогательных двигателей снижение эмиссии при применении ТЭ – 5–10 %; но может достигать 25–30 % и 100 % – для рейсов на короткие дистанции при применении в качестве топлива водорода, производимого за счет возобновляемой энергии. ТЭ могут применяться на судах ледовых классов, но имеются проблемы бункеровки, если для ТЭ используется обычное для них топливо (водород или метанол).

## **Возобновляемые источники энергии (ветровая и солнечная энергия)**

Green energy (solar and wind)

В качестве возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для применения на судах рассматривают источники для использования ветровой и солнечной энергии.

*Ветровая энергия*, согласно анализу экспертов ИМО, может утилизироваться на судах четырьмя способами: традиционные паруса, воздушные змеи, твердые паруса и роторы Флетнера.

Паруса, несмотря на то, что когда-то они были единственным двигателем, сейчас рассматриваются только как средство для обеспечения дополнительной вспомогательной энергии. При использовании парусов соображения прочности заставляют устанавливать мачты, продолжающиеся внутрь корпуса вплоть до киля. Наличие таких мачт и их креплений внутри корпуса усложняет работу с грузами.

Воздушные змеи отличаются от других концепций использования ветровой энергии относительно малой площадью, необходимой для их установки, и поэтому вполне пригодны для переоборудования судов, находящихся в эксплуатации. К минусам системы с воздушным змеем относятся сложности с ее постановкой, уборкой и управлением, а также недостаточная долговечность легких материалов, используемых для изготовления змея.

Жесткие паруса – это конструкции, подобные крыльям самолета, создающие большой упор при меньшем сопротивлении по сравнению с обычными

парусами, но имеющие те же недостатки, что отмечены выше для обычных парусов.

Роторы Флетнера генерируют упор как подъемную силу на вращающемся теле, реализуя т.н. эффект Магнуса. Эта система имеет различные характеристики упора в зависимости от таких параметров, как угол атаки ротора (угол ветра), сила ветра, его стабильность и скорость судна.

Сейчас отсутствуют надежные данные и опыт эксплуатации всех ветровых систем. Не отработаны и расчетные модели. При оценке интегрированного эффекта энергосбережения необходимо учитывать, что ветровая энергия в различных регионах океана не одинакова. Поэтому дать оценки возможного эффекта энергосбережения при ее использовании весьма затруднительно.

Для ориентировки могут использоваться цитированные в корреспондентской группе МЕРС данные исследований Боннского университета по парусной концепции. Эти исследования показали, что для судов с наилучшим выбором парусов при эксплуатации в благоприятных по ветровой энергии маршрутах в Северной Атлантике осредненные эффекты снижения расхода топлива в зависимости от скорости судна варьировались в пределах от 15 до 44 %.

На ледовых судах использовать ветровую энергию трудно из-за обледенения ветрового оборудования, так что управление им становится невозможным, и появляется риск потери остойчивости судна.

*Для солнечной энергии* возможности использования на судах представлены в материалах корреспондентской группы МЕРС. Эксперты оценивали потенциал солнечной энергии следующим образом.

На поверхность земли в среднем падает примерно  $342 \text{ Вт/м}^2$  солнечной энергии. Примерно 30 % этой энергии отражается обратно в пространство в основном из-за облаков. Солнечная радиация зависит от широты места, сезона, погоды, времени дня. Как много из этой энергии способны захватить солнечные фотоэлементы, зависит от КПД элементов и их позиционирования относительно солнца. Современные фотоэлементы имеют КПД примерно 13 % (номинальная мощность с учетом отражения –  $31 \text{ Вт/м}^2$ ). Лучшие элементы, имеющиеся пока только в лабораториях и на космических объектах, имеют КПД порядка 30 % (номинальная мощность с учетом отражения –  $72 \text{ Вт/м}$ ). Для третьего поколения солнечных элементов, которое еще только разрабатывается, прогнозируется довести КПД до 45–60 % и номинальную мощность до  $144 \text{ Вт/м}$ .

К примеру, для танкера длиной 270 м, шириной 50 м, с двигателем мощностью 18 МВт и вспомогательным оборудованием мощностью примерно 1 МВт был оценен возможный съем солнечной энергии. Расчеты проводились исходя из предположения, что вся площадь палубы покрыта фотоэлементами. Оценки показали, что максимальная мощность, снимаемая с солнечных батарей трех поколений, составит соответственно 0,4, 1,0 и 2,0 МВт.

Приведенные данные оценки показывают, что современные солнечные батареи позволяют лишь частично покрыть нужды энергоснабжения вспомогательных механизмов танкера, даже если вся палуба будет покрыта фотоэлементами. В определенное время и в определенном месте солнечная радиация может быть выше средней, и в эти моменты солнечная энергия способна всего лишь покрыть потребности в энергии для вспомогательных механизмов. Такая энергия может быть генерирована только при использовании очень производительных и, следовательно, дорогих солнечных батарей (как в космической отрасли).

Однако, поскольку солнечная энергия не доступна ночью, потребуется устанавливать на судне другие источники энергии до тех пор, пока не будут созданы системы хранения энергии на борту. Все это позволило экспертам ИМО сделать вывод, что из-за ограниченной производительности солнечных батарей такая технология не может рассматриваться как эффективный источник снабжения энергией судов, а ее эффективность оценивается в 1 % снижения потребления топлива для судов, имеющих достаточную площадь палубы для установки солнечных батарей.

Для ледовых судов вопрос об использовании солнечной энергии не рассматривается, т.к. в северных районах солнечная активность много меньше и вообще отсутствует в полярную ночь. В дополнение обростание солнечных батарей льдом делает их работу нестабильной без специального подогрева батарей для оттаивания льда.

## Заключение

### Conclusion

1. Целевой задачей по снижению эмиссии парниковых газов, коррелированной с Парижскими соглашениями 2015 г., является снижение интегральной эмиссии CO<sub>2</sub> морским сектором на 40 % к 2030 г. и на 70 % к 2050 г. по сравнению с 2008 г.

Согласно приведенным выше данным, эффект снижения эмиссии парниковых газов при примене-

нии средств энергосбережения составляет в среднем 3–5 %, а интегральный эффект их применения на первом этапе внедрения регулирования EEDI достиг порядка 20–30 % снижения эмиссии. Перспективы дальнейшего снижения индекса энергоэффективности EEDI связываются с рядом инноваций [20]. Так, эффект дальнейшего применения энергосберегающих устройств интегрально оценивается величиной 0–5 % с учетом того, что большинство таких устройств уже внедрялось на судах на первом этапе. Прогнозируемый эффект внедрения технологии воздушной смазки составляет около 5 %, хотя, по данным Крыловского центра, это направление является одним из наиболее перспективным. Порядка 10 % могут принести технологии применения теплоутилизационных контуров, особенно на судах с газовым топливом, однако эти технологии целесообразно использовать на судах с электрическими установками, где энергию утилизации можно эффективно использовать.

Дополнительно в 5–10 % оценивается использование энергии ветра, хотя достижение этих величин, согласно приведенному анализу, не столь очевидно и совершенно точно нестабильно. Анализ, проведенный корреспондентской группой МЕРС ИМО, показал бесперспективность удовлетворения экологических амбиций в морском секторе при прямом применении ВИЭ. Свойственные этим источникам энергии технические ограничения позволяют рассматривать возобновляемую энергетику как источник энергии, количество которой можно считать незначительной дополнительной частью энергоснабжения судна, не имеющей принципиального значения для достижения целевых задач снижения эмиссии CO<sub>2</sub>.

2. Эффективность описанных выше мер не позволяет даже близко подойти к целевому показателю эмиссии парниковых газов, достижение которого предписано к 2050 г. Однако перечисленные меры по энергосбережению могут рассматриваться как актуальные для некоторого улучшения показателей энергоэффективности, в частности индикатора годовой карбоновой эффективности СП, который введен совместно с рейтинговым инструментом его регулирования для судов, находящихся в эксплуатации. Эти меры позволяют улучшить энергоэффективность на несколько процентов, что и необходимо для повышения рейтинга после нескольких лет эксплуатации судна в свете ужесточившихся требований ИМО.

3. По данным проведенного анализа, для России, где большинство судов должны иметь ледовый

класс, применение множества энергосберегающих мер связано с опасностью разрушения судов при работе даже в относительно легких льдах. Может рассматриваться лишь очень небольшая номенклатура устройств с весьма ограниченным эффектом энергосбережения (например, РВCF или очень короткие прочные крылья перед винтом). Поэтому для условий нашей страны существенно возрастает роль расчетной и модельной отработки обводов корпуса при проектировании судна.

Необходимо также продолжить разработки систем воздушной смазки для снижения сопротивления корпуса, последовательно устраняя выявленные в ходе ранее проведенных исследований недостатки этих систем. А также, что наиболее важно в свете новой политики ИМО, – адаптировать системы подвода воздуха, обеспечив возможность их установки и применения на эксплуатируемых судах. В качестве перспективного направления можно рассматривать разработку инновационных покрытий корпуса, в т.ч. ледостойких, однако это направление находится в начальной стадии исследований.

4. Для удовлетворения целевым показателям эмиссии парниковых газов необходимо применение принципиально новых средств. В частности, наиболее перспективным решением представляется применение некоторых альтернативных видов топлива совместно с применением энергетических установок, адаптированных к работе с альтернативным топливом. Этот вопрос будет рассмотрен в третьей из настоящей серии статей.

## Список использованной литературы

1. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 1. Анализ руководящих документов, определяющих новую политику снижения эмиссии парниковых газов / В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 4(402). С. 141–156. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-141-156.
2. Справочник по теории корабля : В 3 т. Т. 1 : Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / [Я.И. Войткунский и др.]. Ленинград : Судостроение, 1985. 764 с.
3. Пустошный А.В. Проблемы ходкости транспортных судов : монография. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2016. 142 с.
4. Resistance Committee: Final Report and Recommendations to the 27<sup>th</sup> ITTC // Proceedings of 27<sup>th</sup> International Towing Tank Conference (August 31 – September 5 2014, Copenhagen): in 3 vol. Zürich : ITTC, 2014. Vol. 1. P. 14–59. URL: <https://itc.info/media/6063/3-resistance-committee-new.pdf> (Accessed: 27.10.2022).
5. Unconventional tip shape propellers : 2014 Technology Review / Studio di Ingegneria Navale e Meccanica. Genova, 2014. 42 p. (Report SINM ; № 350/14). URL: <http://www.sinm.it/sites/default/files/Report350-14.pdf> (Accessed: 27.10.2022).
6. Adalid J.G., Genmaro G. Latest experiences with Contracted and Loaded Tip (CLT) propellers // Sustainable Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources : proceedings of the 14<sup>th</sup> International congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM-2011). Boca Raton [et al.] : Balkema book, 2011. P. 47–54.
7. Kappel Propeller // Technical University of Denmark : [site]. Kgs. Lyngby, 2017. URL: [https://www.mek.dtu.dk/english/research/feature\\_articles/kappel\\_propeller](https://www.mek.dtu.dk/english/research/feature_articles/kappel_propeller) (Accessed: 01.11.2022).
8. Choi Y.B. Energy Saving Devices / Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering. Seoul : DSME, 2008. 37 p.
9. Pustoshny A.V., Darchiev G.K., Frolova I.G. The problems of propeller design for ice class transportation ships // Proceeding of fifth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'17). Espoo : VTT, 2017. Vol. 3. P. 390–397.
10. Morgan W.B. The design of counterrotating propellers using Lerb's theory // Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1960. Vol. 68. P. 6–31.
11. Hadler J.B., Morgan M.B., Meyer K. Advance propeller propulsion for high-powered single screw ships // Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1964. Vol. 72. P. 231–293.
12. Lindgren H., Johnsson C.A., Dyne G. Studies of the application of ducted and contra-rotating propellers on merchant ships // Proceeding of 7<sup>th</sup> Symposium on Naval hydrodynamics (August 25–30, 1968, Rome). Arlington : Office of Naval Research, 1968. P. 1265–1303.
13. Manen J.D., Osterveld M.W. Model tests of contra-rotating propellers // International Shipbuilding Progress. 1968. Vol. 15, № 172. P. 401–417. DOI: 10.3233/ISP-1968-1517201.
14. On the design of Shafted Propeller plus Electric Thruster Contra-Rotating Propulsion Complex / Bushkovsky A., Frolova I., Kaprantsev S.V. [et al.] // First International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion : T-POD : proceedings. Newcastle upon Tyne : School of Marine Science and Technology, 2004. P. 247–261.
15. Mewis F., Guiard T. Mewis duct–new developments, solutions and conclusions // Second International Sym-

- posium on Marine Propulsion (SMP'11). Hamburg : Inst. for Fluid Dynamics and Ship Theory, 2011. P. 64–71.
16. Международная конвенция о контроле за вредными противообращающимися системами на судах // Бюллетень международных договоров. 2013. № 8.
  17. Супергидрофобные покрытия. Возможности и перспективы их применения для снижения гидродинамического сопротивления / *А.В. Пустошный, А.А. Хомяков, Л.Б. Бойнович, А.М. Емельяненко* // Труды международной конференции по судостроению и океанотехнике (NAOE2016). Санкт-Петербург, 2016. С. 516–521.
  18. *Сверчков А.В., Орлов О.П.* Оценка возможности применения водоотгаливающих покрытий для снижения гидродинамического сопротивления транспортных судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 1(383). С. 43–59. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-43-59.
  19. State of Art in Investigation and Development for the Ship on the Artificial Cavity / *A. Butusov, A. Sverchkov, A. Poustosny, S. Chalov* // Proceedings of International Workshop on Ship Hydrodynamics (IWSH'99). China, 1999.
  20. *Sverchkov A.V.* Perspectives of artificial cavity application aimed on resistance reduction of ocean/river ships // Proceedings of Third International Shipbuilding Conference (ISC-2002). St. Petersburg, 2002. Sect. B. P. 95–100.
  21. Гидродинамические характеристики судна с искусственной каверной при движении по ограниченному фарватеру / *М.В. Галушина, А.В. Сверчков, И.А. Чичерин* [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Вып. 1(391). С. 11–28. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-11-28.
  22. ABS Study of the Future of the EEDI. The Maritime Executive Media Kit // The Maritime Executive : [site]. URL: <https://maritime-executive.com> (Accessed: 01.11.2022).
  3. *Pustosny A.V.* Propulsion performance of cargo carriers. St. Petersburg : Krylov State Research Centre. 2016. 142 pp. (in Russian).
  4. Resistance Committee: Final Report and Recommendations to the 27<sup>th</sup> ITTC // Proceedings of 27<sup>th</sup> International Towing Tank Conference (August 31 – September 5 2014, Copenhagen): in 3 vol. Zürich : ITTC, 2014. Vol. 1. P. 14–59. URL: <https://itcc.info/media/6063/3-resistance-committee-new.pdf> (Accessed: 27.10.2022).
  5. Unconventional tip shape propellers : 2014 Technology Review / Studio di Ingegneria Navale e Meccanica. Genova, 2014. 42 p. (Report SINM ; No. 350/14). URL: <http://www.sinm.it/sites/default/files/Report350-14.pdf> (Accessed: 27.10.2022).
  6. *Adalid J.G., Gennaro G.* Latest experiences with Contracted and Loaded Tip (CLT) propellers // Sustainable Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources : proceedings of the 14<sup>th</sup> International congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM-2011). Boca Raton [et al.] : Balkema book, 2011. P. 47–54.
  7. Kappel Propeller // Technical University of Denmark : [site]. Kgs. Lyngby, 2017. URL: [https://www.mek.dtu.dk/english/research/feature\\_articles/kappel\\_propeller](https://www.mek.dtu.dk/english/research/feature_articles/kappel_propeller) (Accessed: 01.11.2022).
  8. *Choi Y.B.* Energy Saving Devices / Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering. Seoul : DSME, 2008. 37 p.
  9. *Pustosny A.V., Darchiey G.K., Frolova I.G.* The problems of propeller design for ice class transportation ships // Proceeding of fifth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'17). Espoo : VTT, 2017. Vol. 3. P. 390–397.
  10. *Morgan W.B.* The design of counterrotating propellers using Lerb's theory // Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1960. Vol. 68. P. 6–31.
  11. *Hadler J.B., Morgan M.B., Meyer K.* Advance propeller propulsion for high-powered single screw ships // Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1964. Vol. 72. P. 231–293.
  12. *Lindgren H., Johnsson C.A., Dyne G.* Studies of the application of ducted and contra-rotating propellers on merchant ships // Proceeding of 7<sup>th</sup> Symposium on Naval hydrodynamics (August 25–30, 1968, Rome). Arlington : Office of Naval Research, 1968. P. 1265–1303.
  13. *Manen J.D., Osterveld M.W.* Model tests of contra-rotating propellers // International Shipbuilding Progress. 1968. Vol. 15, No. 172. P. 401–417. DOI: 10.3233/ISP-1968-1517201.
  14. On the design of Shafted Propeller plus Electric Thruster Contra-Rotating Propulsion Complex / *Bushkovsky A.,*

## References

1. Novelties in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry. Part 1. Analysis of regulatory documents governing the new policy of greenhouse gas emission mitigation / *V.V. Magarovsky, V.N. Polovinkin, A.V. Pustosny, O.V. Savchenko* // Transactions of Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 4(402). P. 141–156. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-141-156 (in Russian).
2. Handbook of ship theory: in 3 volumes. Vol. 1: Hydromechanics. Ship resistance. Ship propulsors / [Ya. Voitkunsky et al.]. Leningrad : Sudostroenie, 1985. 764 p. (in Russian).

- Frolova I., Kaprantsev S.V.* [et al.] // First International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion : T-POD : proceedings. Newcastle upon Tyne : School of Marine Science and Technology, 2004. P. 247–261.
15. *Mewis F., Guiard T.* Mewis duct–new developments, solutions and conclusions // Second International Symposium on Marine Propulsion (SMP'11). Hamburg : Inst. for Fluid Dynamics and Ship Theory, 2011. P. 64–71.
  16. International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships // Bulletin of International Treaties. 2013. No. 8 (in Russian).
  17. Superhydrophobic coatings. Capabilities and prospects of their application for hydrodynamic resistance mitigation / *A.V. Pustoshny, A.A. Khomyakov, L.B. Boynovich, A.M. Yemelyanenko* // Transactions of International conference on Naval Architecture and Ocean Engineering (NAOE 2016). St. Petersburg, June 6–8 2016. P. 516–521 (in Russian).
  18. *Sverchkov A.V., Orlov O.P.* Assessing the possibility of applying hydrophobic coatings to reduce hydrodynamic resistance of cargo carriers // Transactions of Krylov State Research Centre. 2018. Vol. 1(383). P. 43–59. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-43-59 (in Russian).
  19. State of Art in Investigation and Development for the Ship on the Artificial Cavity / *A. Butusov, A. Sverchkov, A. Poustoshny, S. Chalov* // Proceedings of International Workshop on Ship Hydrodynamics (IWSH'99). China, 1999.
  20. *Sverchkov A.V.* Perspectives of artificial cavity application aimed on resistance reduction of ocean/river ships // Proceedings of Third International Shipbuilding Conference (ISC-2002). St. Petersburg, 2002. Sect. B. P. 95–100.
  21. Hydrodynamic parameters of air-cavity ship in a narrow fairway / *M.V. Galushina, A.V. Sverchkov, I.A. Chicherin* et al. // Transactions of Krylov State Research Centre. 2020. Vol. 1(391). P. 11–28. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-11-28 (in Russian).
  22. ABS Study of the Future of the EEDI. The Maritime Executive Media Kit // The Maritime Executive : [site]. URL: <https://maritime-executive.com> (Accessed: 01.11.2022).

### Сведения об авторах

*Магаровский Вячеслав Валерьевич*, к.т.н., начальник отделения гидродинамики ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-65-05. E-mail: [2\\_otd@ksrc.ru](mailto:2_otd@ksrc.ru).

*Половинкин Валерий Николаевич*, д.т.н., профессор, научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-67-03. E-mail: [krylov@krylov.spb.ru](mailto:krylov@krylov.spb.ru). <https://orcid.org/0000-0003-4044-2551>.

*Пустошный Александр Владимирович*, член-корреспондент РАН, д.т.н., главный научный сотрудник-консультант ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-99. E-mail: [2\\_otd@ksrc.ru](mailto:2_otd@ksrc.ru). <https://orcid.org/0000-0003-4797-2213>.

*Савченко Олег Владиславович*, к.т.н., генеральный директор ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-23. E-mail: [krylov@krylov.spb.ru](mailto:krylov@krylov.spb.ru).

### About the authors

*Viacheslav V. Magarovsky*, Cand. Sci. (Eng.), Head of Hydrodynamic division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-65-05. E-mail: [2\\_otd@ksrc.ru](mailto:2_otd@ksrc.ru).

*Valery N. Polovinkin*, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Principal, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-67-03. E-mail: [krylov@krylov.spb.ru](mailto:krylov@krylov.spb.ru). <https://orcid.org/0000-0003-4044-2551>.

*Alexander V. Pustoshny*, Dr. Sci. (Eng.), Corresponded member of Russian Academy of Science, Principal research scientist – consultant, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-99. E-mail: [2\\_otd@ksrc.ru](mailto:2_otd@ksrc.ru). <https://orcid.org/0000-0003-4797-2213>.

*Oleg V. Savchenko*, Cand. Sci. (Eng.), Director General, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-23. E-mail: [krylov@krylov.spb.ru](mailto:krylov@krylov.spb.ru).

Поступила / Received: 29.06.22  
Принята в печать / Accepted: 03.02.23  
© Коллектив авторов, 2023