

Современное гражданское судостроение, находясь под влиянием глобального энергетического кризиса и все ужесточающихся экологических норм, ищет способы сокращения количества потребляемого топлива и снижения выбросов продуктов сгорания. В соответствии с документом ИМО «Указания по учету инновационных технологий в области энергетической эффективности для расчета и проверки полученных значений EEDI и EEXI» [1] эти способы подразделяются на категории, рассмотренные в таблице.

АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА СУДНЕ ПРОЕКТА ВС90

С.Ю. Афанасьева, инженер-конструктор 3-й категории,
А.В. Сердечный, гл. конструктор, начальник проектного отдела,
С.М. Тимофеев, первый зам. ген. директора – гл. инженер,
И.В. Щербаков, ген. директор, ООО «ПКБ «Петробалт»,
О.Г. Власов, гл. конструктор АО «СПМБМ «Малахит»,
 контакт. тел. (812) 644 5686, + 7 (921) 902 7710

Инновационные технологии в области энергетической эффективности [1]

Таблица

Инновационные технологии в области энергетической эффективности				
Снижение мощности главного двигателя			Снижение вспомогательных мощностей	
Категория А	Категория В-1	Категория В-2	Категория С-1	Категория С-2
Неотделима от общих показателей судна	Может рассчитываться отдельно от общих показателей судна		Эффективна все время	Зависит от условий внешней среды
	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$
Покрывания с низким коэффициентом трения; прямая оптимизация; сопротивление пера руля; конструкция гребных винтов	Система воздушной смазки корпуса (создание воздушных каверн посредством впуска воздуха для снижения сопротивления судна (может быть выключено)	Использование энергии ветра с помощью ветродвигательных систем (паруса, роторы Флеттнера, кайты)	Система рекуперации отходящего тепла (утилизация тепла выхлопных газов и его превращение в электрическую или тепловую энергию)	Фотоэлектрические элементы

Здесь f_{eff} – коэффициент доступности

Технологии категории А трудно назвать принципиально инновационными, так как стремление снизить сопротивление – неотъемлемый этап проектирования на протяжении значительной части мировой истории. Установка же системы рекуперации отходящего тепла (категория С-1) – распространенная практика на современных судах различного назначения.

Технологии категорий В-1, В-2 и С-2 также не являются принципиально инновационными, однако их развитие и активное применение на судах наблюдается все чаще.

1 ноября 2022 г. Российский морской регистр судоходства (РС) предпринял первые шаги в направлении внедрения ветродвигательных систем (WAPS)*, выпустив документ «Руководство по судовым установкам, использующим для движения энергию ветра» НД № 2–030101–050 [2]. Требования к судам, оборудованным WAPS, также приводят норвежское классификационное общество Det Norske Veritas (DNV) [3] и Классификационное общество США American Bureau of Shipping (ABS) [4].

В настоящей работе речь пойдет о целесообразности использования технологий категорий В на балкере неограниченного района плавания пр. ВС90, так как они требуют внесения в проект наименьшего количества изменений и сравнительно просты в использовании. Данная тематика особенно актуальна для России с учетом отсутствия значительных разработок ветродвигательных систем и устройств пневмообмыва грузовых судов.

В настоящее время ООО «ПКБ «Петробалт» и АО «СПМБМ «Малахит» ведут разработку проекта сухогруза неограниченного района плавания пр. ВС90. Проведен расчет эффективности при установке на судно роторов Флеттнера**, плоского жесткого паруса, а также оценен эффект от установки системы пневмообмыва корпуса.

*Ветродвигательная система (WAPS, Wind Assisted Propulsion System) – система, передающая механические пропульсивные силы, возникшие в результате ее взаимодействия с ветром, непосредственно на конструкции судна.

**Ротор Флеттнера (ротормый парус) – тип WAPS, которая обычно имеет вращающийся цилиндр/ ротор для создания тяги от силы ветра за счет эффекта Магнуса.

Основные характеристики рассматриваемого сухогруза

Длина наибольшая, м.....	250
Длина между перпендикулярами, м.....	246
Ширина наибольшая, м.....	34,0
Высота борта, м.....	20,5
Максимальная осадка, м.....	15,0
Дедвейт, т.....	Ок. 90 000
Мощность, кВт.....	Ок. 14 000
Скорость эксплуатационная, уз.....	12
Расход топлива, г/кВт·ч.....	225
Диаметр гребного винта, м.....	7,7

Предполагаемые маршруты судна проходят от Новороссийска или Санкт-Петербурга до Монтевидео (Уругвай), Камсара (Гвинея), Бендер-Аббаса (Иран), Нава-Шевы (Индия) и Шанхая (КНР).

РОТОРЫ ФЛЕТТНЕРА

Роторный парус представляет собой вертикально расположенный цилиндр, вращаемый вокруг своей оси. Благодаря эффекту Магнуса роторный парус создает тягу, направленную перпендикулярно направлению вымпельного ветра (рис. 1).

В среднем оптимальные условия работы роторных парусов создаются при движении судна под углом 100–130° и 230–260° к истинному ветру*.

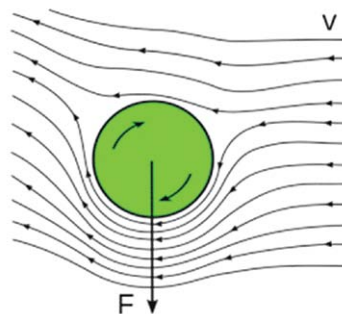


Рис. 1. Иллюстрация эффекта Магнуса [5]

***Истинный ветер – ветер, фиксируемый относительно неподвижного объекта.

Производство и установку роторных парусов осуществляют европейские компании Eco Flettner (Германия) [6], Norsepower (Финляндия) [7], Anemoi Marine (Великобритания) [8]. Размеры роторов могут варьироваться от 18×3 м до 35×5 м; масса – от ок. 20 до 63 т; масса основания – от 10 до 24 т.

Схема размещения. Исходя из анализа существующих проектов, оборудованных роторами Флеттнера и условия обеспечения видимости [9, 10], можно рассмотреть установку на сухогруз пяти роторов. По конструктивным условиям размещения определено, что их диаметр не должен превышать 4 м. Также необходимо, чтобы они не создавали помех тросам лебедок, расположенных между крышками грузовых трюмов, и оставляли проходы достаточной ширины для перемещения экипажа.

Расчеты показывают, что роторы большего размера более эффективны по сравнению с роторами меньших размеров, поэтому для судна пр. ВС90 оптимальными являются роторы размерами 28×4 м. Рассмотрена компоновка, при которой пять таких роторов размещены вдоль ДП, на переборках, разделяющих грузовые трюмы. Иные варианты размещения роторов создают недопустимые углы «слепых зон» [9, 10].

Вычисления в программном комплексе NAPA, проведенные в ПКБ «Петробалт», показали, что даже в наихудшем случае загрузки (судно порожнем) угол крена от действия ветра силой 540 Па на судно с установленными роторами составляет 1 град. Таким образом, остойчивость судна можно считать удовлетворительной при размещении роторных парусов любых размеров, вплоть до принятых.

Для упрощения грузовых операций могут применяться заваливающиеся роторы или роторы, способные смещаться по рельсам в плоскости шпангоута [7, 8].

3D-модель судна с установленными на него роторами сформирована с помощью ПО Cadmatic (рис. 2, а, б и в).

Программа Регистра Ллойда. На основе вычислений по общепринятым зависимостям в совокупности со статистическими и экспериментальными данными подразделением Регистра Ллойда Lloyd's Register Ship Performance Group создана онлайн-программа (рис. 3) для расчета экономии топлива судна при установке на него роторов Флеттнера [11].

Для этого в программу вводятся главные размерения судна, распределение затрачиваемой мощности по скорости, а также потребление топлива. Указываются размеры роторов и их количество, уточняются осадка и скорость судна. На карте обозначается маршрут движения судна.

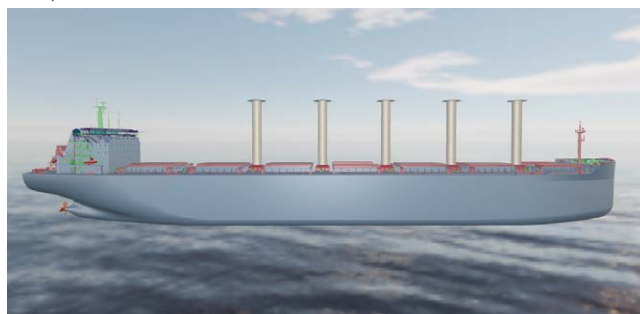
Экономия топлива для судна пр. ВС90, по данным программы, составила 11,2% в год из расчета среднего по основным мировым торговым путям [1]. На различных маршрутах, принятых вероятными для сухогруза, экономия составляла от 0,0% в год (Камсар–Санкт-Петербург) до 11,0% в год (Бендер-Аббас–Нава-Шева), в определенные месяцы на некоторых маршрутах достигая значений выше 15%.

Расчет экономии по указаниям ИМО. Документ МЕРС.1/Circ.896 [1] предлагает методику расчета доступной эффективной мощности WAPS, исходя из скорости судна, силы тяги системы, использующей энергию ветра, и глобального распределения вероятностей скорости и силы ветра. При этом принимаются несущественными и не учитываются сопутствующие эффекты использования WAPS, способные увеличить сопротивление судна: дрейф, увеличенные углы пера руля, крен, сниженная эффективность гребного винта. Предполагается также, что роторы эксплуатируются в ненарушенном потоке воздуха.

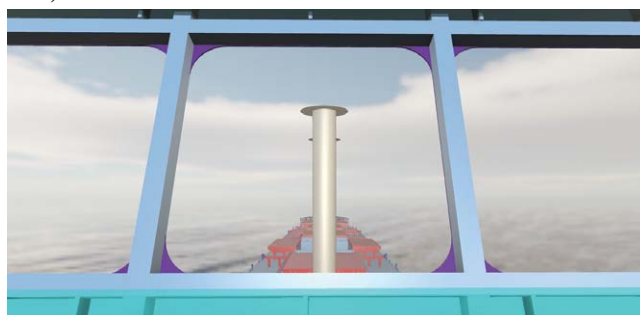
Доступная эффективная мощность ветродвигательной системы рассчитывается по формуле [1]

$$(f_{eff} \cdot P_{eff}) = \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^q W_k} \right) \times \left[\left(\frac{v_{ref}}{\eta_D} \sum_{k=1}^q F(v_{ref})_k \cdot W_k \right) - \left(\sum_{k=1}^q P(v_{ref})_k \cdot W_k \right) \right]. \quad (1)$$

а)



б)



в)

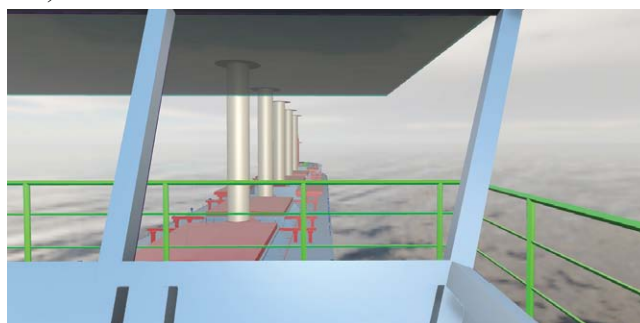


Рис. 2. Судно пр. ВС90 с роторами 28×4 м: а – вид сбоку, б – вид с ходового мостика вдоль ДП, в – вид с крыла ходового мостика

$F_1 - F_k \geq 0, F_{k-1} - F_k \geq 0$ (сортировка элементов матрицы сил по убыванию);

$\sum_{k=1}^{q-1} W_k < \frac{1}{2}, \sum_{k=1}^q W_k \geq \frac{1}{2}$ (q – количество элементов, введенных в формулу),

где $(f_{eff} \cdot P_{eff})$ – доступная эффективная мощность, кВт, производимая данной ветродвигательной системой*; W_k – глобальная матрица вероятностей ветров**; v_{ref} – средняя скорость судна, м/с; η_D – эффективность главного двигателя (главных двигателей) при 75% от установленной мощности. При отсутствии указаний на другие значения $\eta_D = 0,7$; $F(v_{ref})_k$ – матрица полезной тяги (кН) ветродвигательной системы в зависимости от скорости ветра и его направления относительно курса судна (0° – строго против ветра); $P(v_{ref})_k$ – матрица той же размерности, что W_k и $F(v_{ref})_k$, которая отражает мощность, кВт, затрачиваемую ветродвигательной системой в зависимости от скорости ветра и его направления относительно курса судна.

*Доступная эффективная мощность – результат умножения эффективной мощности P_{eff} и коэффициента доступности f_{eff} согласно указаниям документа МЕРС.231(65) «Руководство по использованию инновационных энергоэффективных технологий при расчете и освидетельствовании EEDI и EEXI» [1].

**Глобальная матрица вероятностей ветров – двухмерная матрица, содержащая данные о вероятности определенных скорости ветра и его направления относительно курса судна на основании статистики по основным морским торговым путям. Сумма всех вероятностей равна 1 и является безразмерной величиной [1].

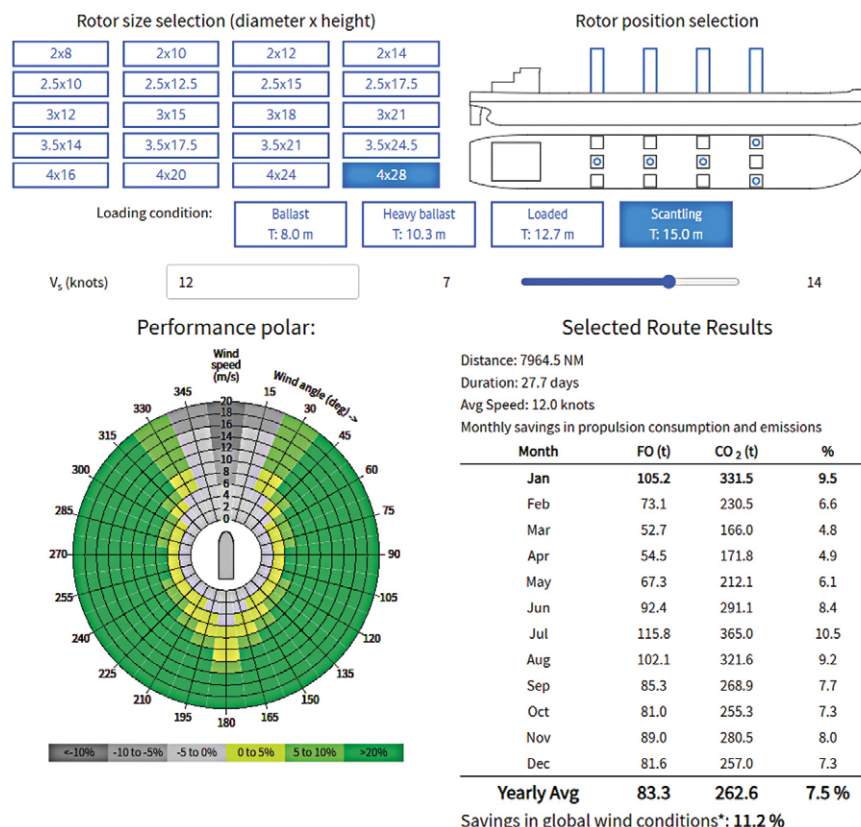


Рис. 3. Расчет программы Регистра Ллойда на маршруте Новороссийск – Монтевидео

По известным зависимостям вычислена тяга роторов и мощность, необходимая для их вращения [5]. Принято, что роторы функционируют тогда, когда мощность, сгенерированная ими, превышает мощность, затрачиваемую на их вращение. В противном случае роторы остановлены и создают дополнительное сопротивление воздуха, учтенное в расчетах.

В результате расчета по известным зависимостям и формуле (1) получаем для пяти роторов

$$f_{eff} P_{eff} = 766 \text{ кВт.}$$

Значение активной мощности для судна пр. ВС90 в ходовом режиме составляет 8411 кВт. Экономия мощности и топлива на всех основных судоходных путях, таким образом, в ходовом режиме равняется 9,1%.

Экономическая эффективность. Стоимость ротора размерами 28×4 м можно принять равной 1 млн. долл. США [5].

В качестве топлива рассматриваемое судно использует дизель, среднемировая стоимость которого по состоянию на январь 2023 г. составляет 1075 долл./т [12].

Принято, что сухогрузное судно находится в пути 2/3 всего времени. Мощность ротора судна пр. ВС90 в ходовом режиме составляет 8411 кВт; мощность при погрузке-разгрузке равна 889 кВт. Чистая годовая экономия при использовании пяти роторов составит таким образом 1 080 623 долл., или 8,65%, и обеспечит окупаемость роторов за 6 лет.

Следует, однако, помнить, что данный срок окупаемости рассчитан для условного судна, движущегося по всем основным судоходным путям. Исходя из оценки отношения количества топлива, сэкономленного на предполагаемых для проектируемого сухогруза маршрутах, к количеству топлива, сэкономленного на всех судоходных путях, можно оценить срок окупаемости роторов размерами 28×4 м – он будет близок к 12 годам.

ЖЕСТКИЙ ПАРУС

Жесткий парус представляет собой подъемную или телескопически раздвигающуюся крыльевую конструкцию. Система управления поднимает или раздвигает парус, а также поворачивает его вокруг вертикальной оси в зависимости от курса судна к ветру.

Жесткие паруса в грузовом судостроении подразделяются на три основных типа: сегментные (segment), серповидные (crescent) и паруса-крылья (wing), поперечные сечения которых изображены на рис. 4 [13].

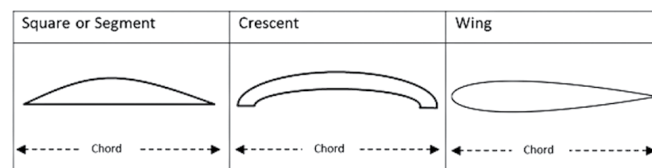


Рис. 4. Типы жестких парусов

Наиболее простым в изготовлении и в расчете является сегментный парус, который и будет рассмотрен далее. Методика расчета других двух типов парусов принципиально аналогична, но менее точна без соответствующих испытаний [13].

Wind Challenger. Сухогруз «Shofu Maru» ($L = 235 \text{ м}$, $B = 43 \text{ м}$, $DW = 100 422 \text{ т}$) первым в мире был оборудован жестким парусом Wind Challenger, который создан компаниями MOL [14] и Oshima Shipbuilding [15]. Он состоит из четырех секций, высота которых составляет ок. 15 м, ширина – ок. 20 м. Максимальная высота паруса – ок. 53 м. Сечение в горизонтальной плоскости серповидное.

Утверждается, что использование паруса на «Shofu Maru» снижает выбросы CO₂ на 5% на маршруте Япония – Австралия и на 8% – на маршруте Япония – западное побережье Северной Америки [14].

Размещение. Жесткий парус на сухогрузе может быть только один, так как он не должен создавать помех грузовым и швартовным операциям, и может быть размещен в носу судна. Оптимальное место его расположения – шп. 257 (рис. 5). Диаметр основания паруса принят равным 3,0 м, а возвышение над палубой бака – 2,5 м.

Принятые размеры паруса: ширина – 20 м, высота – 53 м, толщина – 3 м, соотношение длин задней и передней поверхностей паруса – 1,06. Эти значения близки к параметрам паруса Wind Challenger и, следовательно, технически выполнимы. Кроме того, размерения Shofu Maru и ВС90 близки между со-

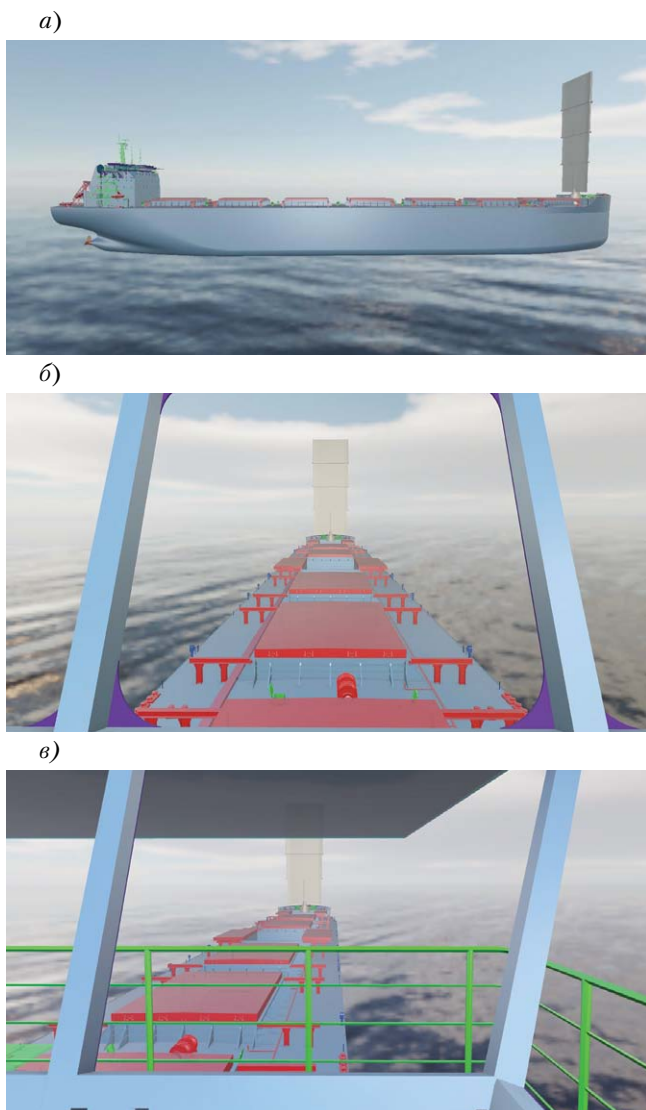


Рис. 5. Судно пр. ВС90 с плоским парусом в раздвинутом состоянии: а – вид сбоку, б – вид с ходового мостика вдоль ДП, в – вид с крыла ходового мостика

бой, и можно ожидать, что и характеристики влияния на них парусов схожих размеров будут близкими.

3D-модель судна с установленным на нем плоским парусом сформирована с помощью ПО Cadmatic (рис. 5, а, б и в).

Расчет экономии при установке жесткого паруса. Общий расчет экономии определяется по формуле (1).

По известным формулам тяги плоского паруса и создаваемой им боковой силы выполнен расчет дополнительной мощности, генерируемой парусом. При этом принимается, что парус не функционирует при угле к выпелному ветру менее 30° [13]. Вторым фактором, ограничивающим использование паруса, является создаваемый им крутящий момент, который необходимо компенсировать с помощью рулевого устройства. Расчетный момент на руле составляет ок. 1380 кН·м на переднем ходу. Приняв запас 20%, можно оценить максимальный допустимый момент паруса в 1100 кН·м.

Мощность, затрачиваемая парусом для поворота и сдвигания-раздвигания, принимается пренебрежимо малой и не учитывается.

В результате расчета для плоского паруса размерами 20×53 м

$$f_{eff} \cdot P_{eff} = 449 \text{ кВт.}$$

Активная мощность всех потребителей в ходовом режиме при мощности 14000 кВт составляет 15635 кВт. При мощности 6776 кВт, необходимой для движения с эксплуатационной скоростью, значение активной мощности равно 8411 кВт.

Экономия мощности и топлива на всех основных судоходных путях, таким образом, равняется 5,34% в ходовом режиме.

Экономическая эффективность. В качестве топлива судно пр. ВС90 использует дизель, среднемировая стоимость которого по состоянию на январь 2023 г. составляет 1075 долл./т [20].

Принято, что сухогрузное судно находится в пути 2/3 всего времени. Мощность рассматриваемого сухогруза в ходовом режиме составляет 8411 кВт; мощность при погрузке-разгрузке равна 889 кВт. Чистая годовая экономия при использовании жесткого паруса составит таким образом 633 175 долл., или 5,07%.

Следует помнить, что полученная экономия рассчитана для условного судна, движущегося по всем основным судоходным путям. С учетом ветровых условий на предполагаемых для судна пр. ВС90 маршрутах, можно оценить, что реальная экономия будет порядка 2–2,5%.

Стоимость паруса Wind Challenger, установленного на сухогрузе «Shofu Maru», не афишируется производителями. Выгоду или убыток от установки паруса на судно можно, таким образом, установить только после оценки стоимости его постройки.

ПНЕВМООБМЫВ

Пневмообмыв (воздушная смазка) – способ уменьшения сопротивления трения корпуса о воду (лед) с помощью подачи сжатого воздуха, который образует прослойку воздуха или пузырьков между корпусом судна и водой (льдом). На современных грузовых судах могут устанавливаться устройства пневмообмыва (ПОУ) для уменьшения сопротивления трения и, следовательно, экономии топлива и снижения вредных выбросов.

Принципиальная схема. ПОУ состоит из устройств выпуска воздуха; трубопроводов, по которым к ним подводится воздух; компрессора, обеспечивающего выпуск воздуха с необходимой скоростью. Кроме того, предусматриваются система ручного управления с ходового мостика и система автоматизации (рис. 6 и рис. 7).

Оценка экономии. Производители ПОУ для транспортных судов Silverstream Technologies [17], Wärtsilä [16] и Howden [18] оценивают чистую экономию топлива при ис-

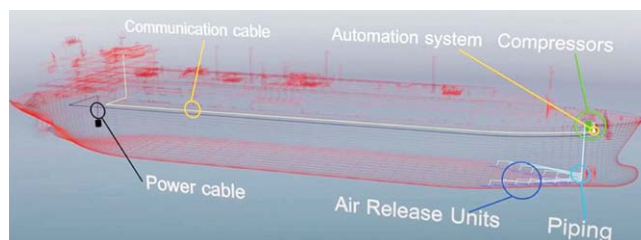


Рис. 6. Принципиальная схема ПОУ [16]



Рис. 7. Устройства выпуска воздуха на днище судна [17]

пользовании воздушной смазки в 6–11% для крупных балкеров ($DWT > 100$ тыс. т), 7–10% и до 10% соответственно. Эти данные практически идентичны, поэтому их можно принимать как основу для предварительных выводов.

Для получения более точных данных экономии топлива для конкретного судна необходимо моделирование, проведение экспериментов по выявлению оптимального расположения устройств выпуска воздуха и, при возможности и необходимости, корректирование формы днища.

ВЫВОДЫ

Расчеты и соображения, приведенные в данной работе, показали, что установка на судне пр. ВС90 ветродвигательных систем в виде плоского жесткого паруса или роторных парусов может быть целесообразна, особенно на маршрутах с ровными ветрами стабильного направления.

С учетом того, что большая часть предполагаемых маршрутов не проходит по оптимальным для использования парусов зонам, можно ожидать экономию в размере 4–5% при использовании пяти роторных парусов размерами 28×4 м и 2–3% при использовании жесткого складного паруса размерами 20×53 м.

Следует также учитывать принятое в расчетах допущение, что роторы либо все работают на полную мощность, либо все остановлены, жесткий парус же либо раздвинут с максимальной площадью, либо сложен и не создает сопротивления воздуха. В действительности между указанными состояниями существует множество промежуточных, включение которых в расчет даст более точное представление об экономии мощности. Для этого необходимы модельные испытания, подробное изучение параметров работы существующих WAPS с роторными парусами, а также, вероятно, специальное программное обеспечение. Также следует дополнительно исследовать возможности оптимизации маршрута следования судна с учетом получения актуальной погодной информации.

Системы пневмообмыва корпуса, исходя из заявлений производителей, являются эффективным средством, позволяя экономить до 10% топлива. В случае с рассматриваемым судном можно принять размер экономии по нижней границе, предложенной Silverstream Technologies [17], равный 6%, что более существенно, чем при установке роторных парусов или жесткого паруса. Преимущество системы пневмообмыва – в том, что она может применяться независимо от ветровых условий.

С учетом слабой развитости технологий повышения энергоэффективности в России и отсутствия реализованных проектов, где они были бы внедрены, необходимо продолжать исследования в данном направлении. Для этого следует проводить модельные эксперименты и расширять производственные мощности, ориентируясь на возможность производства комплектующих систем повышения энергоэффективности.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. MEPC.1/Circ.896–2021 Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI and EEXI/International Maritime Organization (IMO), London, UK, 14.12.2021.
2. НД № 2–030101–050. Руководство по судовым установкам, использующим для движения энергию ветра/Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург, Россия, 1.11.2022.
3. DNVGL-ST-0511. Wind assisted propulsion systems/Det Norske Veritas, 2019.

4. Guide to Wind-Assisted Propulsion System Installation/American Bureau of Shipping (ABS), 2020.
5. Berendschot R.J. Flettner rotor vessel design optimization: дисс. на соискание квалификационной академической степени магистра, Дельфт, Нидерланды, 2019.
6. Компания Eco Flettner: официальный сайт. – URL: <https://ecoflettner.de/> (дата обращения: 23.01.2023).
7. Компания Norsepower: официальный сайт. – URL: <https://www.norsepower.com/> (дата обращения: 23.01.2023).
8. Компания Anemoi Marine: официальный сайт. – URL: <https://anemoimarine.com/> (дата обращения: 23.01.2023).
9. MSC/Circ.982–2000 Guidelines on ergonomic criteria for bridge equipment and layout/IMO, London, UK, 20.12.2000.
10. НД № 2–020101–171. Правила по оборудованию морских судов. – Ч. V: навигационное оборудование/Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург, Россия, 1.03.2023.
11. Калькулятор экономии для судна с роторами Флеттнера. – URL: <https://flettner.lr.org/> (дата обращения: 23.01.2023).
12. Актуальная стоимость судового топлива на сайте PBT International NV. – URL: <https://pbt-international.com/price-information/> (дата обращения: 25.01.2023).
13. Atkinson G.M., Binns J. Power profile for segment rigid sail//Journal of Marine Engineering & Technology. – 2018. – Vol.17:2. – P.99–105, DOI: 10.1080/20464177.2017.1319997.
14. Компания MOL: официальный сайт, страница о жестком парусе. – URL: <https://www.mol-service.com/case/windchallenger02?hsLang=en> (дата обращения: 27.01.2023).
15. Компания Oshima Shipyards: официальный сайт. – URL: <https://en.osy.co.jp/> (дата обращения: 27.01.2023).
16. Компания Wartsilä: официальный сайт, страница о пневмообмыве. – URL: <https://www.wartsila.com/marine/products/propulsors-and-gears/energy-saving-technology/air-lubrication-system> (дата обращения: 02.02.2023).
17. Компания Silverstream Technologies: официальный сайт, страница о пневмообмыве. – URL: <https://www.silverstream-tech.com/what-is-air-lubrication/> (дата обращения: 02.02.2023).
18. Компания Howden: официальный сайт, страница о пневмообмыве. – URL: <https://www.howden.com/en-gb/applications/hv-turbo-air-lubrication> (дата обращения: 02.02.2023).
19. МАРПОЛ, Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененной протоколом 1978 г./International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78).
20. НД № 2–020101–134. Правила по предотвращению загрязнения с судов, эксплуатирующихся в морских районах и на внутренних водных путях РФ (ПЗС РФ)/Российский морской регистр судоходства (РС), Санкт-Петербург, Россия, 2020.
21. Badalamenti C., Prince S. Effects of Endplates on a Rotating Cylinder in Crossflow. – In: 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Honolulu, Hawaii, 2008. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
22. De Marco A., Mancini S., Pensa C., Calise G. and De Luca F. Flettner Rotor Concept for Marine Applications: A Systematic Study//International Journal of Rotating Machinery, 2016.
23. Reid E. G. Tests of Rotating Cylinders Report NACATN209, National Advisory Committee for Aeronautics, 1924.
24. Performance analysis of Flettner rotor installations: дисс. на соискание квалификационной академической степени магистра/Finn Lorange. – Тронхейм, Норвегия, 2022.
25. Fujiwara T., Hirata K., Ueno M., Nimura T. On development of high performance sails for an ocean going sailing ship. – In: International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability (MARSIM'03). – Kanazawa: National Maritime Research Institute (Japan), 2003.
26. Atkinson G.M., Nguyen H., Binns J. Considerations regarding the use of rigid sails on modern powered ships//Cogent Engineering. – 2018. – 5:1543564.
27. Martínez Antonio Gallardo. Investigation of the air-lubrication effect on friction resistance: диссертация на соискание квалификационной академической степени магистра. – Картахена, Испания, 2016. ■