



ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 656.61
EDN SDGAXN

СУДА ДЛЯ ПОСТРОЙКИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ МОРСКИХ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.С. Реуцкий, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

В работе представлены результаты анализа эксплуатирующихся в настоящий момент типов судов для постройки и обслуживания морских ветроэлектростанций. Представлены характеристики современных судов для установки ветрогенераторов, кабельных судов, а также судов для постройки и обслуживания ветрогенераторов. В научной и технической литературе, касающейся морской ветроэнергетики, упоминаются суда для постройки и обслуживания ветрогенераторов (СПОВ) и суда для обслуживания ветрогенераторов (СОВ) как два разных типа судов. Цель данной статьи — установить функциональные различия между этими двумя типами судов, выявить их основные особенности и точное назначение в процессе возведения и обслуживания ветрогенераторов. Помимо этого, в статье рассмотрены приспособления для перемещения обслуживающего персонала между судами и ветрогенераторами.

Ключевые слова: ветроэлектростанция, судно для установки ветрогенераторов, судно для постройки и обслуживания ветрогенераторов, суда для обслуживания ветрогенераторов, система динамического позиционирования.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Суда для постройки и обслуживания морских ветроэлектростанций / А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 112 — 123. — EDN SDGAXN.

SHIPS FOR CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF OFFSHORE WIND FARMS

A.S. Reutskii, PhD, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

The paper presents an analysis of existing types of vessels for the construction and maintenance of offshore wind farms. The characteristics of modern ships for the installation of wind turbines, cable ships, as well as ships for the construction and maintenance of wind turbines are presented. In the foreign literature on offshore wind energy, commissioning service operation vessels (CSOV) and service operation vessels (SOV) are constantly mentioned as two different types of vessels. Correspondingly, this article aims to establish functional differences between these two types of vessels, to identify their main features and purpose. In addition, the article discusses devices for moving maintenance personnel between ships and wind turbines.

Key words: wind turbine, wind turbine installation vessels, construction support offshore vessel, support offshore vessel, dynamic positioning.

For citation: Reutskii A.S. Ships for construction and maintenance of offshore wind farms. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 79. P. 112 — 123. EDN SDGAXN. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на существующее инфляционное давление мировой экономики, приведшее к росту цен на специализированное технологическое оборудование и вызвавшее в 2023 г. отмену многих амбициозных ветроэнергетических проектов, сектор «зеленой» ветроэнергетики активно развивается. В соответствии с анализом Clarkson's Research, капитальные затраты в этом секторе мировой экономики в 2023 г. составили 59 млрд долл., а прирост вырабатываемой мощности составил 19,8 ГВт. По сравнению с 2022 г., прирост вырабатываемой ветряными электростанциями (далее — ВЭС) мощности составил 150 % и превысил лучшие допандемийные показатели. Приращение генерируемой морскими ВЭС мощности в странах ЕС составило 9,2 ГВт, что потребовало привлечения 33 млрд долл.

Из рис. 1 следует, что наибольшие финансовые вложения в морскую ветроэнергетику в 2023 г. внесли Великобритания и КНР, а тройка лидеров по генерации электроэнергии на морских ветроэлектростанциях — КНР, Великобритания и Германия, суммарная доля которых составляет более 80 %. Наиболее заметными морскими проектами ВЭС в Европе стали Hollandse Kust Zuic (Нидерланды) мощностью 15 ГВт, Fécamp (Франция) мощностью 497 МВт, Dogger Bank (Великобритания) мощностью 3,6 ГВт, Seagreen (Великобритания) мощностью 11 ГВт.

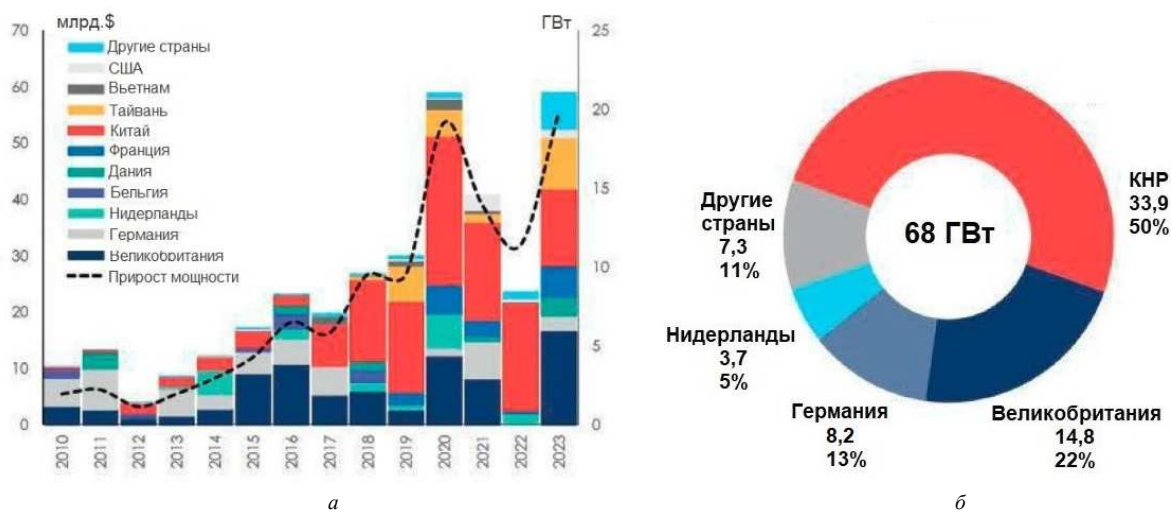


Рис. 1. Вклад разных стран в морскую ветроэнергетическую инфраструктуру: а) в капитальные затраты по ее созданию; б) в генерируемую ею мощность

Для создания и развития морской ветроэнергетической инфраструктуры потребовалось создание флота судов, позволяющего производить установку, достройку и ремонт ветрогенератора в открытом море. В соответствии с международной классификацией такие суда именуются wind turbine installation vessel [1], сокращенно WTIV (судно для установки ветрогенераторов, далее — СУВ), construction support offshore vessel, сокращенно CSOV (судно для постройки и обслуживания ветрогенераторов, далее — СПОВ). Вслед за появлением генерирующих мощностей возникает потребность в их ремонте и обслуживании, для чего применяется support offshore vessel — SOV (судно для обслуживания ветрогенераторов, далее — СОВ). На рис. 2 показана динамика роста флота СПОВ и СОВ, разделенная по типу судов и по их статусу (эксплуатируется/заказано).

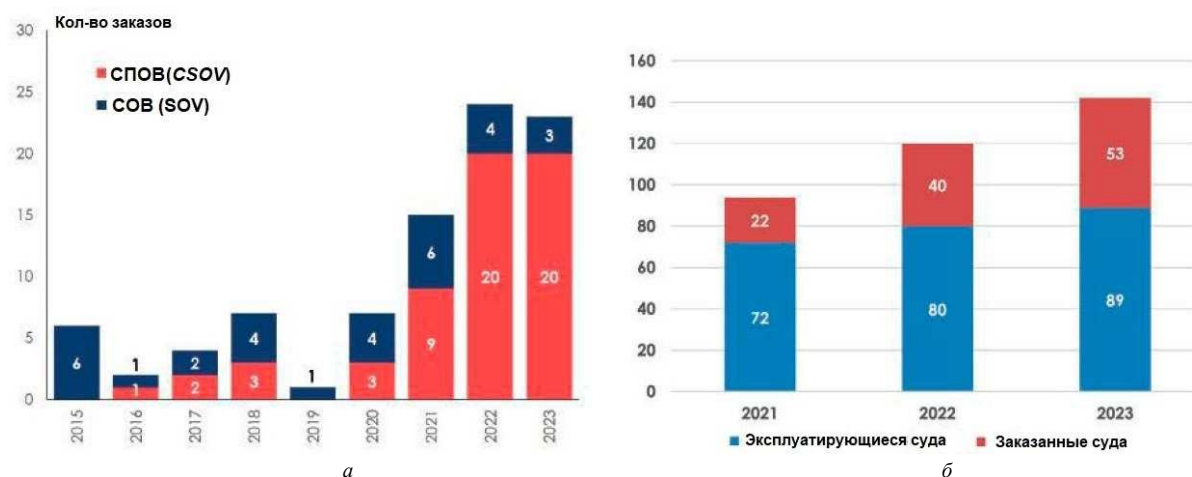


Рис. 2. Количество новых заказов СПОВ и СОВ (а); эксплуатирующиеся и заказанные СПОВ и СОВ (б)

В 2023 г. во всем мире было заказано 24 СПОВ и СОВ, что на одно судно меньше, чем в 2022 г. Суммарная стоимость этих судов составила 1,5 млрд долл. Все находящиеся в настоящий момент в портфеле заказов 53 судна демонстрируют новые в судостроении подходы к «зеленой» энергетике: 13 из них имеют в составе энергетической установки двигатели, работающие на альтернативном топливе (8 из них на метаноле [2]), при этом все они будут оснащены аккумуляторными батареями, использующимися как для движения, так и для питания судовых потребителей в течение ограниченного промежутка времени (например, пока судно находится в порту).

СУДА ДЛЯ УСТАНОВКИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Концепция СУВ, представляющего собой специализированную самоподъемную установку, оснащенную специальным крановым оборудованием грузоподъемностью 300 — 3000 т для установки морских ветрогенераторов, впервые появилась в начале 2000-х гг. Ранее установка ветрогенератора представляла собой сложную морскую операцию, выполняемую с привлечением несамоходных барж и размещаемого на них грузоподъемного оборудования, разрабатываемого и изготавливаемого каждый раз вновь под очередной проект. Такой подход на практике оказался неудобен и дорог, поэтому в 2004 г. было построено СУВ MPI Resolution (рис. 3) валовой вместимостью 14 857 рег. т, длиной 130,5 м и шириной 38,0 м, способное одновременно перевозить до 10 турбин и поднимающее свои шесть опор на высоту от 3 до 46 м с помощью гидравлических домкратов. Энергетическая установка судна состоит из четырех 16-цилиндровых четырехтактных дизель-генераторов механической мощностью 1900 кВт. Пропульсивная установка состоит из четырех винторулевых колонок (далее — ВРК) Aquamaster US 205/3850 суммарной пропульсивной мощностью 6 МВт, позволяющей судну развивать скорость 10,5 уз. Судно MPI Resolution оснащено системой динамического позиционирования Kongsberg K-Pos DP-21. Грузоподъемность кранового оборудования Huisman 600 PMT составляет 600 т. Вскоре к MPI Resolution присоединились два его сестершипа, MPI Adventure и MPI Discovery. В настоящий момент все три судна активно эксплуатируются, хотя они уже не могут устанавливать современные ветрогенераторы. Устанавливаемые ими ветрогенераторы North Hoyle мощностью 2 МВт и высотой 67 м выглядят ничтожно малыми по сравнению с Haliade-X мощностью 14 МВт и высотой 260 м, устанавливающимися в настоящее время на ВЭС Dogger Bank (Великобритания). Размеры ветрогенераторов растут вслед за их мощностью, и существующий флот СУВ уже с трудом справляется с требуемой грузоподъемностью кранового оборудования более 1500 т, хотя есть несколько исключений в виде гигантских полупогружных плавучих кранов Thialf и Sleipnir, принадлежащих компании Heerema (рис. 3).



Рис. 3. СУВ MPI Resolution (а); плавкраны Thialf и Sleipnir (б, в)

Однако в 2023 г. на верфи COSCO Shipping в Наньтуне было построено СУВ Voltaire (рис. 4), устанавливающее ветрогенераторы на ВЭС Dogger Bank. Voltaire имеет 179,5 м в длину и 60 м в ширину, а четыре опоры высотой 130 м делают его самым высоким в мире СУВ, способным удерживаться на глубине до 80 м с грузом весом до 16 000 т. Его крановое оборудование имеет грузоподъемность около 3200 т (табл. 1). В том же 2023 г. флот СУВ пополнился судном Les Alizés (рис. 4), построенным на верфи МНН Наймен в КНР. Его крановое оборудование грузоподъемностью 5000 т оснащено универсальными быстроразъемными соединителями (UQC), электрическими захватами, компенсацией движения и полностью автоматизированной системой перемещения. При длине 236,8 м и ширине 52 м судно пригодно для погрузки, транспортировки, разгрузки и установки самых тяжелых фундаментов и компонентов морских ветрогенераторов. В настоящее время Les Alizés работает на ВЭС Gode Wind 3 и Borkum Riffgrund 3 в Северном море, а в 2027 г. присоединится к Voltaire для совместной работы над ВЭС Hollandse Kust West VII (Нидерланды). Несмотря на то, что в КНР построено около 90 % действующих в настоящее время СУВ, требования к размерам этих судов для собственных китайских ВЭС более скромные, чем для европейских, поскольку ветрогенераторы на китайских ВЭС, как правило, имеют меньший размер. Это означает, что некоторые старые европейские СУВ обрели вторую жизнь на внутреннем рынке Китая, где все производственные мощности по строительству СУВ заняты европейскими заказами.

Таблица 1

Изменение основных характеристик СУВ за последние 20 лет

Название	MPI Resolution	Vole au Vent	Voltaire
Год постройки	2004	2013	2022
Судовладелец	MPI Offshore Ltd	Jan De Nul Group	Jan De Nul Group
Флаг	Нидерланды	Люксембург	Люксембург
Судостроитель	Shanhaiguan Shipyard, КНР	Vidar, Польша	COSCO Shipping Heavy Industries, КНР
Класс	DNV GL	DNV GL	DNV GL
Длина наибольшая, L_{OA} , м	130,5	140,4	181,78
Ширина, B , м	38,0	41,0	60
Осадка летн., d , м	5,0	6,3	7,5
Высота борта, H , м	8,0	9,5	14,6
Дедвейт макс., т	5000	8000	21 500
Крановое оборудование, т	600 + 50	1500 + 100	3000 + 200
Площадь палубы, m^2	3200	3535	7000
Скорость, уз	11,0	12,0	11,5
Главные дизель-генераторы	$4 \times 1820 + 2 \times 1110$	6×4000	$4 \times 3535 + 4 \times 2650$
Мощность ВРК, кВт	4×1500	4×2600	4×3000
Стационарные носовые ПУ	3×890	3×2500	2×2600
Выдвижные носовые ПУ	—	—	2×2600
Мощность носовой ВРК, кВт	—	—	2×1600
Экипаж + персонал, чел	34 + 36	98	—



а



б

Рис. 4. СУВ Voltaire (а) и Les Alizés (б)

Ретроспективный анализ построенных за последние 20 лет СУВ демонстрирует рост их водоизмещения, вызванный необходимостью устанавливать ветрогенераторы большего размера, что ведет к росту главных размерений судов, увеличению палубных площадей, росту размера и мощности кранового и самоподъемного оборудования.

КАБЕЛЬНЫЕ СУДА

Суда-кабелеукладчики имеют давнюю и насыщенную историю, берущую начало еще в XIX в. При строительстве морских ВЭС они выполняют две основные функции: создание кабельной сети, соединяющей ветрогенераторы с подстанцией, и прокладка кабелей высокого напряжения между подстанцией ВЭС и береговой сетью. В настоящий момент существует около 70 кабелеукладочных судов, большинство из которых принадлежат компаниям-операторам Boskalis, Van Oord и Jan De Nul и морским кабелеукладочным компаниям Nexans, NKT и Prysmian.

Основная масса кабельных судов построена для военно-морского флота. Первое судно такого типа, спроектированное специально для строительства ВЭС, — Fleeming Jenkin (рис. 5, табл. 2) — в настоящий момент строится на верфи CMHI Haimen shipyard. Судно имеет грузоподъемность 28 000 т, предназначено для прокладки кабеля на глубинах до 3000 м и способно выдерживать натяжение кабеля в 15 т. Удержание судна в заданной точке будет обеспечивать СДП второго поколения, судно оборудовано дополнительным носовым подруливающим устройством.

Таблица 2

Основные характеристики кабельного судна для ВЭС Fleeming Jenkin

Год постройки	2026
Судовладелец	Jan De Nul Group
Судостроитель	CMHI Haimen shipyard, KHP
Длина наибольшая, L_{OA} , м	215
Ширина, B , м	40
Осадка летн., $d_{л}$, м	9,75
Осадка пор., $d_{пор}$, м	5,5
Грузоподъемность, т	28 000
Кол-во и грузоподъемность поворотных столов, т	$2 \times 11\,000 + 1 \times 7500$
Палубные поворотные столы	11 000 т, внутр. диам. 8 м
Поворотный стол твиндека	7500 т, внутр. диам. 8 м
Скорость, уз	13,5
Главные дизель-генераторы	30 600
ВРК, ед $\times$ кВт	4×2600
Стационарные носовые ПУ, ед $\times$ кВт	3×2100
Выдвижные носовые ПУ, ед $\times$ кВт	2×2600
Размещение экипажа и специалистов	120 одноместных кают



Рис. 5. Кабельное судно для ВЭС Fleeming Jenkin, строящееся в КНР

Экологичность является важной особенностью судна, поэтому оно будет оснащено системами очистки отработавших газов его дизель-электрической энергетической установки. Его двухтопливные двигатели работают на биотопливе и метаноле. Также Fleeming Jenkin получит гибридную силовую установку, которая объединит его электрические генераторы с аккумуляторными батареями мощностью 2,5 МВт для снижения пиковых нагрузок в бортовой электросети. В январе 2024 г. стало известно, что компания Anglo Belgian Corporation поставит на это кабельное судно четыре двигателя мощностью 7,2 МВт и один двигатель мощностью 1,8 МВт, использующие метанол в качестве топлива. Введение судна в эксплуатацию ожидается в 2026 г.

СУДА ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ И СУДА ДЛЯ ПОСТРОЙКИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Различия между СОВ и СПОВ

В источниках информации о СОВ и СПОВ различия между ними определяются как существенные или, наоборот, не имеющие принципиального значения. Не давая оценок, сопоставим главные отличительные особенности судов этих типов. СОВ используется для обслуживания и ремонта оборудования во время эксплуатации морской ВЭС. При использовании СОВ обычно заключается договор на долгосрочный чартер, судно может вместить около 60 человек обслуживающего персонала. СПОВ используется для строительства, установки и запуска в эксплуатацию ветрогенераторов, а также в гарантийный период после их постройки. При использовании СПОВ обычно заключается договор на краткосрочный или среднесрочный чартер. Типичное СПОВ вмещает около 120 техников. В целом, СПОВ имеют большие размеры и строятся специально для морской ветроэнергетики, в то время как некоторые СОВ являются существенно модернизированными судами снабжения. Таким образом, основное различие заключается в том, что СОВ используется для текущих работ, а СПОВ — для начальных этапов строительства и запуска в эксплуатацию ВЭС, и флот этих судов значительно моложе флота СОВ.

Поскольку СОВ характеризуются меньшими размерениями, они больше подходят для реализации концепции электрического судна, однако в настоящее время при заказе судов предпочтение отдается более крупным СПОВ (рис. 6а). Динамика роста морской ветроэнергетики такова, что по различным оценкам [3 — 5] к концу этого десятилетия для удовлетворения спроса потребуется от 150 до 250 СОВ и СПОВ. Это связано не только с увеличением числа ВЭС, но и с тем, что они все чаще располагаются в открытом море вдалеке от берега, где преобладает постоянство направления ветра, а сами ветрогенераторы могут иметь больший размер и мощность.



а



б

Рис. 6. СПОВ Wind of Change (а), COB Olympic Boreas (б)

Назначение и особенности COB и СПОВ

Ранее для обслуживания морских ветроэлектростанций использовали суда-снабженцы или якорезаводчики (рис. 7а). Однако с начала эксплуатации в 2015 г. первого COB Esvagt Froude (рис. 7б), характеристики которого представлены в табл. 3, этот тип судов так хорошо зарекомендовал себя, что обслуживающие морские ВЭС компании все чаще отказываются от идеи модернизации судов-снабженцев под свои цели и задачи, в пользу заказа COB и СПОВ, что наглядно демонстрирует растущий портфель их заказов (рис. 2а).



а



б

Рис. 7. Якорезаводчик Manta буксирует ветрогенератор мощностью 50 МВт [6] (а), COB Esvagt Froude осуществляет передачу технического персонала на ветрогенератор [7] (б)

Таблица 3

Основные характеристики COB

	COB	СПОВ
Тип судна	Esvagt Froude	WINDEA Leibniz
Название	2015	2022
Год постройки	Esvagt A/S	Bernhard Schulte Offshore/ICBC Leasing
Судовладелец	Дания	Норвегия
Флаг	Navyard Ship Technology, Норвегия	Ulstein Verft AS, Норвегия
Судостроитель	DNV	DNV
Класс	83,7	88,0
Длина наибольшая, L_{OA} , м	17,6	18,0
Ширина, B , м	6,5	6,4
Осадка летн., d , м	14,0	13,5
Скорость, уз		

Приведенные в табл. 3 технические характеристики указывают, что СОВ и СПОВ имеют мало различий с точки зрения их технических характеристик. При этом назначение СОВ или СПОВ определяет предъявляемые к ним специальные требования:

- продолжительная автономность по запасам топлива, смазочных материалов и провизии;
- обеспечение комфортных условий для экипажа и обслуживающего ветрогенераторы персонала;
- наличие мастерских, кладовых и прочих вспомогательных помещений, где можно разместить оборудование и провести ремонт деталей ветрогенераторов;
- обязательное применение системы динамического позиционирования;
- комплектование судна системой пересадки персонала Walk to Work (W2W);
- повышенный контроль экологической составляющей эксплуатации.

Автономность, размещение экипажа и обслуживающего персонала. СОВ или СПОВ несет дежурство вблизи ВЭС в течение продолжительного времени, чем объясняется требование продолжительной автономности. На его борту должны размещаться не только собственный экипаж, но и обслуживающий ветрогенераторы персонал. К примеру, на Esvagt Froude постоянно работают 60 человек: 20 человек команды и 40 — обслуживающего персонала. Прежде чем вернуться в базу для пополнения запасов и смены персонала, судно может провести в открытом море до четырех недель. Такая автономность позволяет избежать потерь времени на переходы от ВЭС к месту его берегового базирования и сокращает время простоя ветрогенераторов в случае их выхода из строя.

Обеспечение комфортных условий для проживания экипажа и обслуживающего персонала. Несмотря на то, что СОВ или СПОВ во многом схожи с судами-снабженцами [8] морских нефтедобывающих платформ, их отличают более комфортные условия размещения экипажа и обслуживающего персонала. Для них нормой являются одноместные каюты, оборудованные собственным санузлом, интернетом, телевидением и другими удобствами (рис. 8а). Помимо этого, на судах есть места для отдыха, фитнес-залы, кинотеатры, сауны и игровые комнаты (рис. 8б).



а



б

Рис. 8. Изображение каюты на СОВ/СПОВ (а); спортивный комплекс на борту СОВ Esvagt Froude (б) [1]

Наличие на борту значительного количества людей, не относящихся к экипажу, изначально ставило вопрос безопасности. Согласно СОЛАС [9], судно, перевозящее более 12 пассажиров, является пассажирским, однако технический персонал, который регулярно работает на морских объектах, нельзя отнести к пассажирам, поскольку он прошел проверку состояния здоровья и получил необходимую подготовку по технике безопасности согласно МКУБ [10]. По этой причине на СОВ и СПОВ распространяется действие Кодекса судов специального назначения (SPS) [11], который обеспечивает надлежащий уровень их безопасности и безопасности перевозимого ими персонала.

Необходимость в мастерских, кладовых и прочих вспомогательных помещениях для размещения оборудования и проведения ремонта деталей ветрогенераторов. Схема обслуживания ветрогенераторов предполагает их ремонт и техническое обслуживание прямо на борту обслуживающего судна вспомогательных помещений. Например, на «родоначальнике» СОВ Esvagt Froude (рис. 7б) площадь мастерских составляет значительные 450 м², и такая же площадь предназначена для размещения кладовых и шести TEU для запасных частей к турбинам. На многих СОВ есть возможность организовать ремонт крупногабаритных деталей прямо на верхней палубе в ее открытой части. Также на борту СОВ и СПОВ должны храниться все необходимые для ремонта и обслуживания запасные части и дополнительное оборудование. В некоторых случаях они могут занимать всю свободную площадь верхней палубы.

Требования к обязательному применению системы динамического позиционирования. Для выполнения требований к безопасности морских операций практически все суда обслуживающего ВЭС флота, будь то СПВ, СОВ, СПОВ или суда-кабелеукладчики, должны быть оборудованы системой динамического позиционирования (далее — СДП). По сравнению с технологиями СДП, применявшимися ранее в нефтегазовой отрасли при организации морских операций на шельфе, современные технологии шагнули далеко вперед. В использовавшихся ранее СДП время подготовки системы могло достигать 20 и более минут, что недопустимо при работе с ВЭС в открытом море.

Для улучшения быстродействия путем уменьшения времени подготовки современные СДП используют как глобальные, так и локальные датчики определения местоположения. Глобальные датчики используют спутниковые сети, такие как GNSS, в то время как локальные используют такие технологии, как лазерные и микроволновые системы наведения для определения дальности и пеленга на цель (например, ближайший ветрогенератор).

ВЭС представляют собой сложную среду для спутникового позиционирования, поскольку ветрогенераторы и их вращающиеся лопасти зачастую блокируют сигнал. Для позиционирования судна при потере спутниковой связи используется сочетание систем спутникового позиционирования, инерциальных навигационных систем (волоконно-оптических гироскопов) и систем без целеуказания. Последние используют системы лазерного позиционирования, которые сканируют местную среду, а не полагаются на физические цели, такие как отражатели, поскольку традиционные лазерные датчики иногда обнаруживают ложные отражения, вызванные другими отражающими поверхностями, и могут сбить с толку судовую СДП (рис. 9).

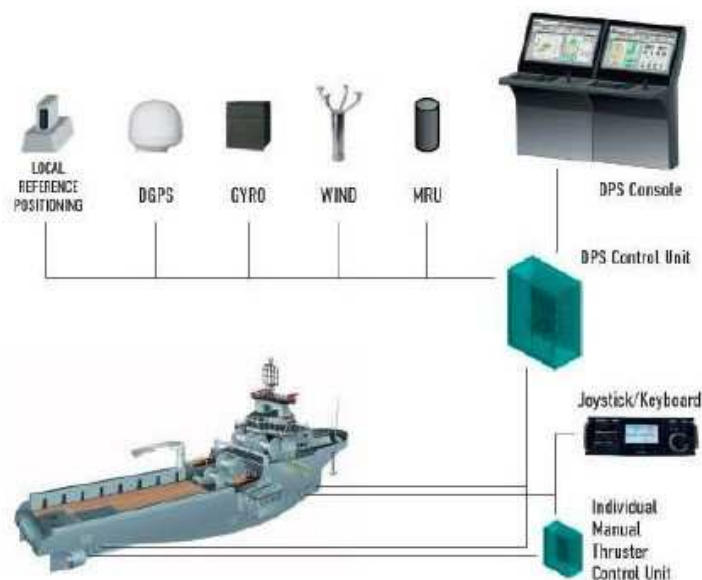


Рис. 9. Состав современной системы динамического позиционирования

Доставка обслуживающего персонала и/или оборудования на морской ветрогенератор. Поломки ветрогенераторов чаще всего происходят при неблагоприятных погодных условиях (значительной силе ветра, волнении), а задержки при ремонте зачастую приводят к значительным материальным и временным потерям, поэтому СОВ/СПОВ должно иметь возможность незамедлительно доставлять ремонтные бригады и перемещать оборудование даже при неблагоприятных погодных условиях.

В зависимости от оснащения, СОВ/СПОВ может доставлять технический персонал на ветрогенератор при помощи системы передачи с компенсацией перемещений судна Walk to Work (далее — W2W) (рис. 10а), а также при помощи специализированного судна для перевозки производственного персонала (далее — СПП; crew transfer vessel, CTV) (рис. 10б) или вертолета (рис. 10в).

Зачастую на ветрогенератор необходимо не только высадить спецперсонал, но и передать инструменты, провизию и другие грузы, поэтому наиболее востребованы системы W2W, способные динамически компенсировать все перемещения судна относительно ветрогенератора, что позволяет безопасно осуществлять пересадку персонала и перемещение грузов вручную (на тележках). Основным производителем этих систем является компания Ampelmann [11], в 2008 г. выпустившая первую версию системы «hexapod» (названной так из-за гидравлического привода с шестью приводными цилиндрами и реагирующей на шесть

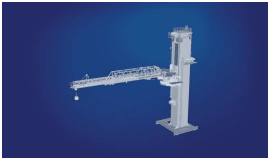


Рис. 10. Способы пересадки персонала с СОВ/СПОВ на ветрогенератор

степеней свободы) — A-типе. Сейчас продукция компании представлена моделями A-type, E-type, W-type и множеством других специализированных конструкций (табл. 4).

Таблица 4

Системы пересадки персонала W2W [11]

Характеристика	A-type	E-type	W-type
Изображение			
Класс	DNV	LR, DNV	DNV
Высота волны, м	3,0	4,5	3,5
Грузоподъемность, кг	200	1000	2000
Вылет стрелы, м	20 или 25	30	32
Конструкция	модульная	модульная	встраиваемая
Требования к судну	$L_{OA} > 55$ м	$L_{OA} > 70$ м	—
Размеры, м	6,3 × 7,2	8,4 × 9,5	—
Вес конструкции, т	40	105	—

Бизнес-модель компании Ampelmann долгое время была основана на предоставлении своего оборудования в аренду судовладельцам для работ с нефтегазовыми и ветроэнергетическими проектами. Имеющие модульную структуру A-type и E-type могут быть установлены на верхнюю палубу практически любого судна подходящего размера (см. табл. 4), однако эта структура определенным образом ограничивает их применение (невозможность работать на оба борта, не всегда оптимальное место установки на незанятой палубе судна). Модульные трапы, способные полностью компенсировать движение, представляют собой тяжелое и достаточно громоздкое оборудование. Переходной трап A-type, установленный на COV Esvagt Froude, может работать на судах длиной не менее 55 м. Более крупная модель E-type больше подходит для морской ветроэнергетики, но для ее эффективной работы требуется судно длиной не менее 70 м.

По этой причине в 2022 г. для COV и СПОВ была разработана система W-type. Она полностью интегрирована в судно и благодаря 32-метровому трапу позволяет работать на оба борта. У W-type есть башня с подъемником, благодаря чему пересадка выполняется на разной высоте. Система имеет электрический привод, занимает небольшую площадь и требует сравнительно мало электроэнергии. Установка электропривода на систему приводной гидравлики позволила сократить потребление электроэнергии на 80 %, что позволяет также использовать судовую электрическую систему вместо специализированного блока питания, характерного для A-type и E-type. Одним из заметных отличий W-type от многих (хотя и не от всех) систем Ampelmann является то, что при передаче персонала стрела крана всегда имеет горизонтальное положение, а перемещение судна под действием волн и ветра компенсируется подъемом, поворотом и телескопированием. Такое решение объясняется тем, что обслуживание ветроэлектростанций требует значительного количества оборудования и технические специалисты предпочитают брать с собой тележку (по этой причине трап на W-type также немного шире, чем обычно), что возможно только при использовании горизонтального трапа. Кроме того, W-образный кран также обладает значительно большей грузоподъемностью в 2000 кг по сравнению с 1000 кг у E-type.

В дополнение к средствам W2W для безопасного перемещения технических специалистов между COV и ветрогенератором используются суда для перевозки персонала (СПП). Их также можно использовать для

пассажиро- и грузоперевозок между СОВ и базой снабжения. Изначально для этой задачи использовались разьездные катера, однако, учитывая важность остойчивости судна при перегрузочных операциях, а также расширение диапазона эксплуатации, еще на ранних этапах развития ВЭС стало очевидно, что суда с небольшой площадью смоченной поверхности и двухкорпусной конструкцией катамарана обладают преимуществами как с точки зрения поперечной остойчивости, так и с точки зрения низкого сопротивления. Еще одним соображением было использование носовых передаточных устройств, при этом резиновые кранцы уступили место захватным устройствам и средствам W2W (рис. 10а).

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены существующие типы судов для постройки и обслуживания морских ветроэлектростанций. Представлены характеристики современных судов для установки ветрогенераторов, кабельных судов, а также судов для постройки и обслуживания ветрогенераторов.

Анализ СУВ за последние 20 лет показал, что из-за необходимости устанавливать ветрогенераторы все большего размера каждое новое судно строится с увеличенным водоизмещением, а это ведет к росту главных размерений судов, увеличению палубных площадей, размера и мощности кранового и самоподъемного оборудования, мощности судовой энергетической установки.

Для кабельных судов, обслуживающих ВЭС, характерны свои отличительные особенности, реализованные в новом проекте судна *Fleeming Jenkin*. Предварительно можно сказать, что относительно прочих морских судов для укладки кабеля оно имеет небольшие размеры. Также оно характеризуется особыми размерами палубных и трюмных поворотных столов (катушек) для хранения кабеля.

СОВ используются для обслуживания и ремонта оборудования во время эксплуатации морской ВЭС, часто они представляют собой модернизированные суда снабжения и вмещают около 60 человек обслуживающего персонала. При использовании СОВ обычно заключается договор на долгосрочный чартер.

СПОВ в целом строятся специально для морских ВЭС и применяются для их строительства, установки и запуска в эксплуатацию, а также в гарантийный период. Они имеют большие размерения по сравнению с СОВ и вмещают около 120 техников. При использовании СПОВ обычно заключается договор на краткосрочный или среднесрочный чартер.

Назначение СОВ или СПОВ определяет специальные требования к их автономности, к обеспечению комфортных условий для экипажа и обслуживающего ветрогенераторы персонала, к наличию мастерских, кладовых и прочих вспомогательных помещений для оборудования и проведения ремонта деталей ветрогенераторов, к применению СДП и комплектованию судна системой пересадки персонала W2W.

Для перемещения оборудования, инструментов, запасных частей, генераторов, контейнеров, а иногда и персонала с судна на платформу ветрогенератора используются системы с 3D-компенсацией наклонов и перемещений судна. Грузоподъемность систем W2W на СОВ/СПОВ варьируется от 1 до 20 т, и в последнее время наметился тренд на увеличение размера и грузоподъемности кранового оборудования из-за увеличения мощности и, соответственно, размеров ветрогенераторов. Большинство используемых в настоящий момент систем этого типа имеют гидравлическое исполнение, но в последние годы наблюдается переход к полностью электрическим моделям, которые позволяют значительно снизить энергопотребление и повысить эффективность выполнения грузовых операций.

Зоны, в которых производится монтаж ВЭС, являются особыми зонами контроля выбросов судовых энергоустановок, в них предъявляются особые требования к экологической составляющей эксплуатации. СОВ/СПОВ представляют собой суда, используемые для обслуживания отрасли возобновляемых источников энергии, поэтому они должны концептуально соответствовать «зеленой» повестке. В настоящий момент при их проектировании в качестве источника энергии на борту рассматриваются аккумуляторные батареи повышенной емкости и системы электродвижения, использующие метанол в качестве топлива. В качестве декларируемых достоинств таких энергоустановок необходимо упомянуть их эффективность, демонстрируемое ими сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу и уменьшение шумового загрязнения окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berezniński A. Wind turbine installation vessel of a new generation / A. Berezniński // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2011. — Vol. 5. — P. 329 — 334.
2. Буянов А.С. Анализ опыта применения метанола и этанола в качестве топлива на судах / А.С. Буянов, О.Н. Леонова, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 91 — 97. — EDN MIMXNW.
3. Díaz H. Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms / H. Díaz, C. Guedes Soares // Ocean Engineering. — 2020. — Vol. 209. — P. 107381.
4. Li M. A closed-loop maintenance strategy for offshore wind farms: Incorporating dynamic wind farm states and uncertainty-awareness in decision-making / M. Li, X. Jiang, J. Carroll, R.R. Negenborn // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2023. — Vol. 184. — P. 113535.
5. Sykes V. A review and analysis of the uncertainty within cost models for floating offshore wind farms / V. Sykes, M. Collu, A. Coraddu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2023. — Vol. 186. — P. 113634.
6. McAuliffe F.D. Modelling the installation of next generation floating offshore wind farms / F.D. McAuliffe, F.M. Judge, J. Murphy // Applied Energy. — 2024. — Vol. 374. — P. 124001.
7. Горин Е.А. Мировое судоходство и морская техника. Часть 2. Проекты и технологии (по итогам «Norshipping-2015») / Е.А. Горин, К.С. Чернов // Морской вестник. — 2016. — № 1. — С. 119 — 124.
8. Kondratenko A.A. A holistic multi-objective design optimization approach for Arctic offshore supply vessels / A.A. Kondratenko, M. Bergström, A. Reutskii, P. Kujala // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — No. 10. — P. 5550. — DOI 10.3390/su13105550.
9. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года. СОЛАС. 2024.
10. Guidelines on the Application of the IMO International Safety Management (ISM) Code. 6th ed., 2024.
11. Кодекс по безопасности судов специального назначения 2008 года (Кодекс ССН 2008 г.). (MSC.266(84) с поправками). 2016.
12. Lie K.W.L. Inverse dynamics control for the Ampelmann system: MSc thesis / K.W.L. Lie; Delft University of Technology. 2017.

REFERENCES

1. Berezniński A. Wind turbine installation vessel of a new generation. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2011. Vol. 5. P. 329 — 334.
2. Buyanov A.S., Leonova O.N., Reutsky A.S. Methanol and ethanol as ship fuel: analysis of application experience. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64/65. P. 91 — 97. EDN MIMXNW. (In Russ.)
3. Díaz H., Guedes Soares C. Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms. *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 209. P. 107381.
4. Li M., Jiang X., Carroll J., Negenborn R.R. A closed-loop maintenance strategy for offshore wind farms: Incorporating dynamic wind farm states and uncertainty-awareness in decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 184. P. 113535.
5. Sykes V., Collu M., Coraddu A. A review and analysis of the uncertainty within cost models for floating offshore wind farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 186. P. 113634.
6. McAuliffe F.D., Judge F.M., Murphy J. Modelling the installation of next generation floating offshore wind farms. *Applied Energy*. 2024. Vol. 374. P. 124001.
7. Gorin E.A., Chernov K.S. Mirovye sudokhodstvo i morskaya tekhnika. Chast' 2. Proekty i tekhnologii (po itogam "Norshipping-2015") [World shipping and marine engineering. Part 2. Projects and technologies (based on the results of "Norshipping-2015")]. *Morskoi vestnik [Maritime Herald]*. 2016. No. 1. P. 119 — 124.
8. Kondratenko A.A., Bergström M., Reutskii A., Kujala P. A holistic multi-objective design optimization approach for Arctic offshore supply vessels. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 10. P. 5550. DOI 10.3390/su13105550.
9. International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 (SOLAS). 2024.
10. Guidelines on the Application of the IMO International Safety Management (ISM) Code. 6th ed., 2024.
11. Code of Safety for Special Purpose Ships, 2008 (2008 SPS Code) (MSC.266(84)), as amended in 2016.
12. Lie K.W.L. Inverse dynamics control for the Ampelmann system: MSc thesis / Delft University of Technology. 2017.