

Учет рисков при строительстве и эксплуатации морской ветряной электростанции для Арктики

В. И. Таровик¹, кандидат технических наук,

Н. А. Вальдман, кандидат технических наук

М. С. Труб, Л. Л. Озерова

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Рассмотрены риски при строительстве и эксплуатации электростанций на арктическом шельфе, использующих возобновляемые источники энергии, на примере морской ветряной электростанции. Анализ рисков приведен для элементов транспортно-энергетического комплекса, обеспечивающего строительство и эксплуатацию морской ветряной электростанции.

Ключевые слова: транспортно-энергетический комплекс, Арктика, риски, строительство, эксплуатация, морская ветряная электростанция.

В состав транспортно-энергетического комплекса (ТЭК), который обеспечивает строительство и эксплуатацию морской ветряной электростанции (МВЭС) в арктических условиях, входят следующие основные элементы [1]:

- фундамент с каменной подсыпкой или плавучее основание;
- башня с ветряной турбиной (ВТ);
- информационно-силовой кабель;
- морская трансформаторная подстанция (МТП);
- сваебойное судно (плавучее или самоподъемное);
- камнесбрасывающее судно;
- судно для транспортировки и установки фундамента, башни и ВТ;
- кабелеукладочное судно (КУС) или баржа (КУБ);
- скоростной катер (СК) для доставки вспомогательного персонала (ВП), проводящего инспекцию;
- морской ледокольный буксир (МЛБ) для доставки и замены вышедших из строя компонентов ВТ массой менее 1 т с устройством для перехода ВП на платформу башни;
- самоподъемное судно (СПС) или баржа (самоходная СПБ или несамоходная НСПБ) со стабилизирующими колоннами для доставки и замены вышедших из строя компонентов ВТ массой более 1 т;
- плавучая гостиница для проживания ВП.

Строительство МВЭС

Процесс монтажа МВЭС состоит из следующих этапов [4]:

- доставки и размещения фундамента, а в случае моносвайного основания забивки цилиндрической

стальной трубы в морское дно приблизительно на 25 м при помощи сваебойного судна;

- монтажа башни и ВТ с помощью СПС или СПБ;
- соединения ВТ по подводному кабелю с предварительно установленной МТП;
- соединения МТП по подводному кабелю с береговой энергосистемой.

Фундаменты МВЭС играют существенную роль, поскольку выбор типа фундамента зависит от глубины места установки и мощности ВТ. Как правило, фундаменты классифицируются по группам, приведенным на рис. 1.

Моносвая — стальная труба диаметром до 4 м, предназначенная для глубин до 25—30 м и мощности до 3,6 МВт. Эту конструкцию проектировщики и заказчики предпочитают благодаря простоте, а также скорости и дешевизне установки.

Каркас — это тяжелая решетчатая конструкция, которая может быть приспособлена для тяжелых ВТ на глубинах до 60 м.

Тренога — тяжелая металлоконструкция, предназначенная для глубин до 35 м и мощности ВТ до 5 МВт.

Альтернативные опорные конструкции приведены на рис. 2. Гравитационный фундамент выполняется из железобетона и предназначен для глубин до 30 м и мощности до 5 МВт. В 2012 г. было установлено 489 фундаментов МВЭС [6], из них моносваи составляли 73%, каркасы — 13%, треноги — 6%, трехсвайные — 5%, гравитационные — 3%.

Для ледовых районов возможно применение гравитационных фундаментов (рис. 2в).

Состав ТЭК может быть существенно сокращен при переходе на плавучие конструкции (рис. 3)

¹ Руководитель авторского коллектива,
e-mail: tarovik@krylov.sp.ru.

при глубинах более 60 м, слабых льдах или их отсутствии.

Плавающая конструкция, по мнению зарубежных специалистов [3], имеет следующие преимущества:

- снижение стоимости вследствие применения большей мощности при массовом производстве;
- высокое качество благодаря полной сборке на берегу;
- более высокие значения скорости ветра и производимой мощности;
- уменьшение взаимодействия окружающей среды с человеком;
- большая часть потенциального ресурса на глубине (например, в США в зоне 50 миль от берега на высоте 90 м при среднегодовой скорости более 8 м/с — 66%).

Несмотря на то что технические риски при этом повышаются, появляется возможность использования на одной платформе и других видов возобновляемых источников энергии (волнения, течения, солнечной) [2].

На рис. 4 приведены графики с выделением целесообразных областей применения фундаментов различных типов.

Строительство моносвайного основания состоит из нескольких этапов:

- отсыпка «матраца» из скальной породы и камней диаметром 0,03—0,02 м при помощи камнесбрасывающего судна для предохранения от эрозии и размыва;
- забивка свай через «матрац» на планируемую глубину при помощи сваебойного самоподъемного судна, оснащенного типовым свайным приводным плунжером;
- установка на цементном растворе с использованием стандартного технологического оборудования и гибких шлангов переходника (между подводной и надводной частями башни) для установки башни в вертикальном положении даже при неполностью выровненном фундаменте; переходник предварительно укомплектован катодной защитой, кабельными каналами и швартовным устройством;

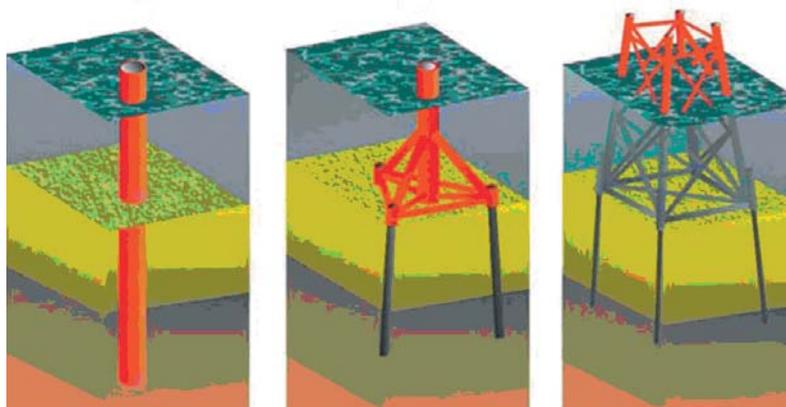


Рис. 1. Основные типы фундаментов МВЭС: а — моносвая; б — тренога; в — каркас



Рис. 2. Альтернативные опорные конструкции: а — тренога с возможностью забивки свай в подводном положении; б — перевернутый ковш, засасываемый с помощью вакуума (имеет большие перспективы, поскольку его изготовление, обработка и монтаж дешевле традиционных, а перемещение легче); в — гравитационный фундамент с развалом в надводной части и закреплением башни цементным раствором

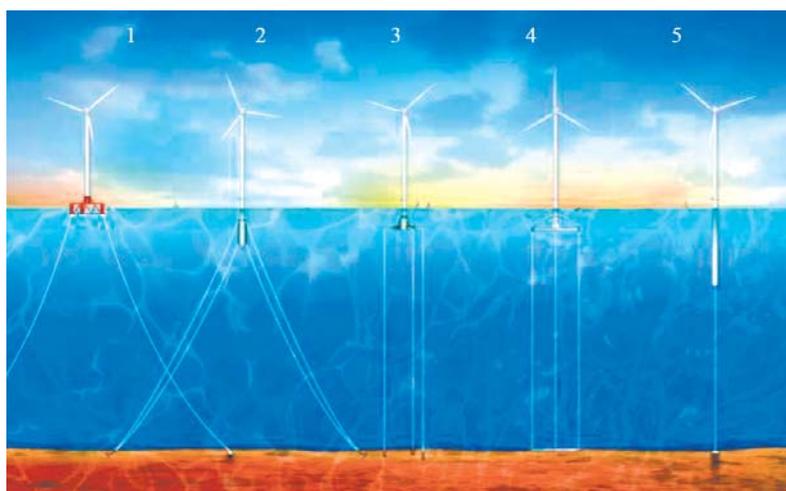


Рис. 3. Концепции плавучих глубоководных МВЭС: 1 — полупогружная (предложена в 2001 г.); 2 — SPAR с двумя парами тросов (2005 г.); 3 — трехопорная платформа с натяжными концами (TLP 2010 г.); 4 — железобетонная TLP со стационарными якорями (2006 г.); 5 — глубоководная SPAR (реализована в 2008 г. в Норвегии)

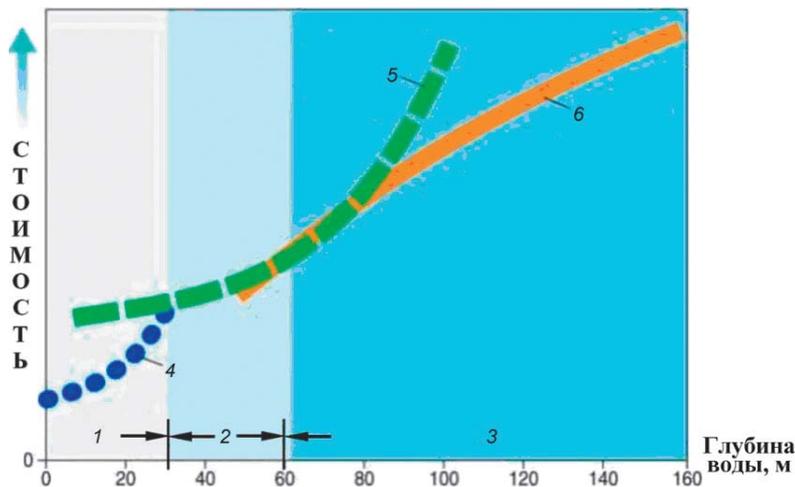


Рис. 4. Области целесообразного применения различных типов фундаментов МВЭС: 1 — мелководная зона (менее 30 м); 2 — транзитная зона (30–60 м); 3 — глубоководная зона (более 60 м); 4 — моносовая, гравитационный фундамент; 5 — каркас, тренога; 6 — плавучая конструкция



Рис. 5. Монтаж башни с помощью самоподъемного судна «Seacore»: а — нижняя часть; б — верхняя часть

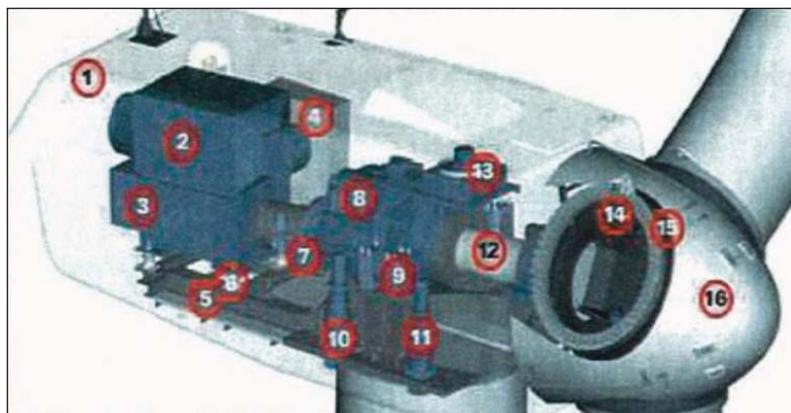


Рис. 6. Основные компоненты гондолы: 1 — гондола; 2 — теплообменник; 3 — генератор; 4 — контрольный щит; 5 — главная рама; 6 и 9 — противозумная изоляция; 7 — гидравлический стояночный тормоз; 8 — редуктор; 10 и 11 — система поворота гондолы; 12 — вал ротора; 13 — охладитель смазки; 14 — управление шагом лопасти; 15 — ступица ротора; 16 — конус передней части

- присоединение башни к верхнему ободу переходника (фланцу) болтами;
- закрывание защитного «матраца» дополнительным слоем скальной породы и камней диаметром 0,35—0,55 м общей толщиной 0,8 м.

Башня монтируется из нескольких частей с помощью самоподъемного судна (рис. 5).

На башне устанавливается гондола (рис. 6), поворачивающаяся, как правило, вокруг вертикальной оси башни с закрепленными на ней лопастями [9].

Как видно из рис. 7, ротор устанавливается по частям при помощи грузового крана на СПС.

Указанные работы в Европе проводятся при условиях погоды, приведенные в табл. 1 [7].

Монтаж и ремонт кабеля

Типовой подводный кабель включает 2—3 медных проводника с соответствующей изоляцией, световод и общую изоляцию, состоящую из полипропиленовой нити, битума и морского армирования.

Одной из общих проблем МВЭС является риск, связанный с кабелями, — повреждение якорями и рыболовными травами, а также воздействие моря. Эти явления широко обсуждаются на международных конференциях и могут быть сведены к минимуму при тщательном выборе трассы, погружении в грунт или прикрытии бетонной подушкой, а также соответствующей конструкции сопряжения кабеля с гондолой, МТП и берегом.

Кроме того, должны тщательно выполняться условия эксплуатации и качественного обследования морского дна, а также выбран метод прокладки (плугом или гидромонитором) и протягивания кабеля через конструкцию башни.

По мнению экспертов, ключевым элементом стратегии успешного внедрения МВЭС является ее эффективное интегрирование в береговую сеть передачи и распределения электроэнергии. Увеличение применения МВЭС поднимает ряд проблем:

Таблица 1. Предельные условия погоды при транспортировке и монтаже МВЭС с помощью СПС

Операция	Скорость ветра, м/с	Волнение		Скорость течения, м/с	Параметры при мощности 3 МВт			
		Высота, м	Период, с		Длина, м	Ширина, м	Высота, м	Масса, т
Выгрузка	12,0	—	—	—	—	—	—	—
Переход	12,5	3,5	—	—	—	—	—	—
Позиционирование включая подъем на колоннах	14,5	3,5/1,5 *	6,8	1,5	—	—	—	—
Установка фундамента	20,0	—	—	—	—	—	—	—
Установка башни (2 секции)	12,0	—	—	—	2×60	5	5	210
Установка гондолы со ступицей	15,0	—	—	—	20	4	4,5	180
Установка лопасти (3 единицы)	12,0	—	—	—	52	2,5	4,5	3×18

* В числителе — при нерегулярном значительном волнении H_s , в знаменателе — при зыби.

- выходная мощность МВЭС колеблется и прерывается в значительной степени в зависимости от скорости ветра;
- МВЭС часто располагают на периферии распределительных сетей, тогда как большинство энергосистем посылают мощность на периферию, а не в противоположном направлении;
- технические характеристики МВЭС отличаются от характеристик обычных электростанций;
- методы прогнозирования ветра находятся на ранней стадии разработки, поэтому их улучшение могут сделать более достоверными сведения об энергии ветра для операторов системы, уменьшая и определяя погрешность прогноза.

Кабель прокладывается с КУС/КУБ (рис. 8), которые перемещаются и позиционируются якорями и лебедками.

Работа на мелководье вызывает дополнительные опасности, учитывая возможность работы в любой фазе прилива-отлива и при сильном течении.

Решение относительно наиболее подходящего метода прокладки кабеля определяется главным образом состоянием морского дна. Оценка риска при прокладке кабеля предусматривает учет глубины прокладки, факторы, относящиеся к интенсивности и маршрутам прохождения транспортных судов, возможность повреждения якорями. В некоторых случаях могут потребоваться глубины прокладки более 3 м, поскольку даже якоря небольших судов проникают на глубину дна до 1,5 м, а больших — приблизительно на 5 м в мягкий грунт, а также возможно повреждение колоннами СПС/СПБ.

После прокладки кабеля результаты уточняются путем обследования или даже подтверждения

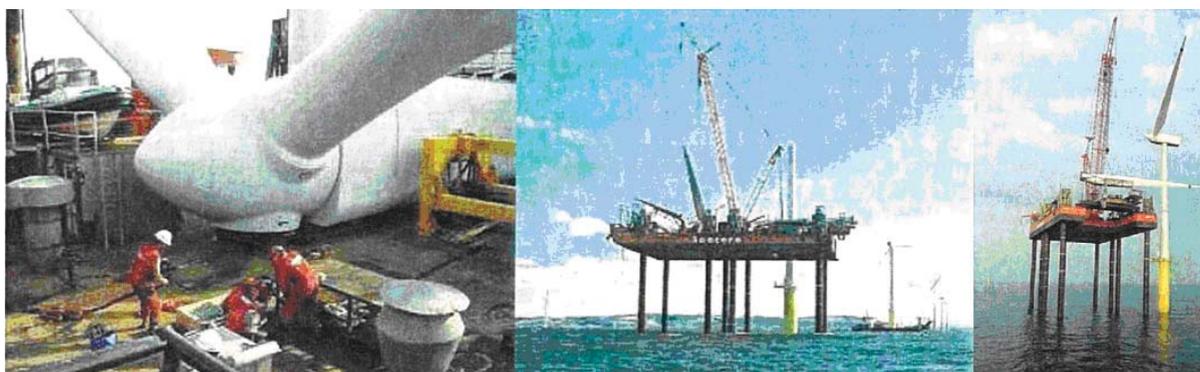


Рис. 7. Установка ротора при помощи СПС: а — гондola с двумя лопастями на палубе при транспортировке; б — подъем гондолы с двумя лопастями; в — установка третьей лопасти



Рис. 8. Кабелеукладочная баржа:
а – прокладка кабеля;
б – подход к берегу в переходной зоне

в реальном масштабе времени, что кабель находится в требуемом положении и не нуждается в дополнительной механической защите, такой как «матрац» или наваливание камня.

Бурение в горизонтальном направлении или рытье траншеи может потребоваться при подходе кабеля к берегу или пересечении острова. В этом случае буровую установку размещают за прибрежной отмелью и бурят направляющее отверстие, а затем большее отверстие, через которое проводят кабель. Как

только кабель, пересекающий дюны, присоединен и испытан, опалубка заполняется бентонитом. При этом сталкиваются со следующими проблемами:

- неопытностью части экипажа, обследующего проложенный кабель (например, при учете скоростей и сил лобового сопротивления);
- климатическими условиями и прогнозом погоды;
- отсутствием оперативной связи между заводом-изготовителем и подрядчиком;
- некачественным выбором трассы и места обследования;
- нереалистичными условиями, предусмотренными в разрешении;
- недостаточным расчетом/планированием непредвиденных обстоятельств (устройства, блокирующие воду / уплотнители);
- плохим состоянием кабеля (например, недостаточным армированием).

Подводные кабели могут быть отремонтированы с использованием специальных ремонтных узлов, поскольку кабель содержит водонепроницаемые наполнители, и вода не распространяется вдоль него, даже если он поврежден. В этом случае должен быть заменен только небольшой кусок. Для проведения ремонтной операции необходимо КУС/КУБ с подводным аппаратом.

Морская трансформаторная подстанция

Произведенная мощность поступает, как правило, на МТП, а затем передается на берег.

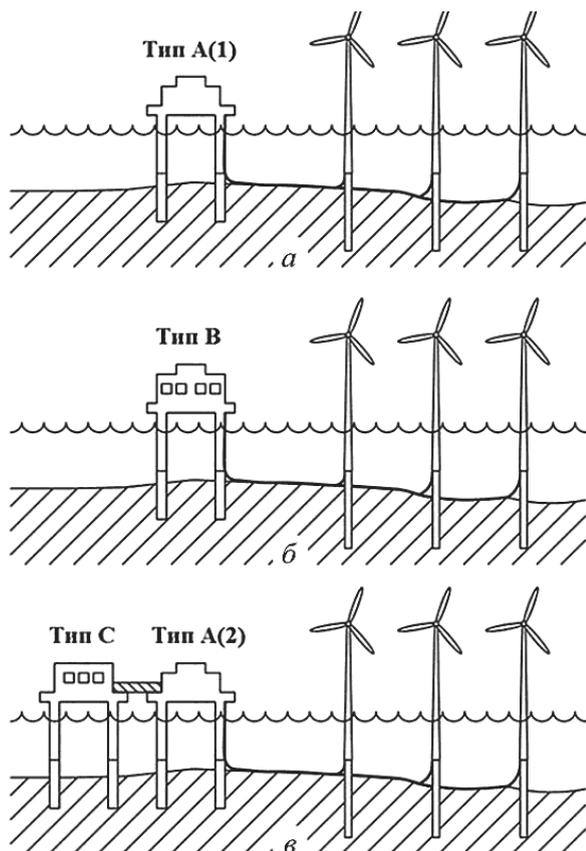
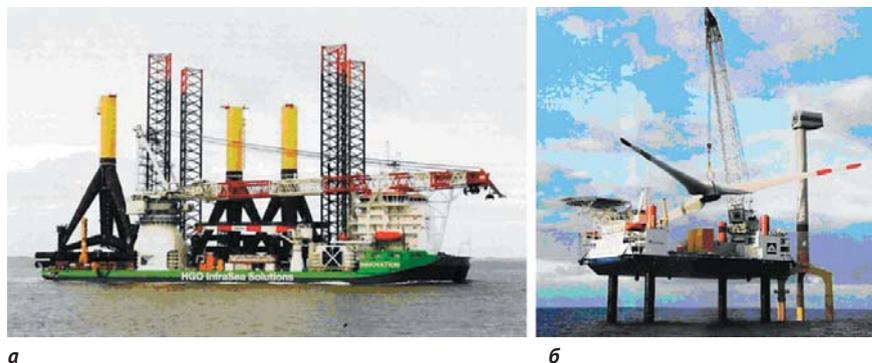


Рис. 9. Возможные архитектурно-конструктивные типы МТП: а – тип А(1), платформа с силовым оборудованием, работающая в штатном режиме без обслуживающего персонала; б – тип В, платформа с временным или постоянным персоналом, на которой располагаются силовое оборудование и жилые помещения; в – типы А(2) и С, отдельные платформы с силовым оборудованием (А2) и жилыми помещениями (С), соединенные мостиком



Рис. 10. Внешний вид верхнего строения МТП

Рис. 11.
Наиболее современные самоподъемные транспортно-монтажные суда:
а – «Innovation»;
б – «Sea Installer»



Возможные архитектурно-конструктивные типы МТП приведены на рис. 9 [8], а внешний вид построенного в ФРГ верхнего строения — на рис. 10.

Наряду с другим оборудованием в верхнем строении МТП (рис. 9, тип В) размещаются:

- распределительный щит;
- трансформатор;
- контрольно-измерительная система и блок связи;
- аварийный дизель-генератор с его топливом и смазочным маслом;
- противопожарное оборудование, использующее морскую воду;
- обслуживающий персонал и вспомогательное оборудование;

- вертолетная площадка;
- гусеничный кран;
- спасательная шлюпка.

Опасности возможных последствий для персонала (П), окружающей среды (О) и имущества (И) делятся на следующие группы:

- отказ конструкции;
- отказ электрического оборудования;
- пожар и взрыв;
- аварии при доступе и перемещении;
- сбой аварийного реагирования,
- другие аварии.

Некоторые из опасностей для МТП приведены в табл. 2.

Таблица 2. Идентификация некоторых опасностей для морской трансформаторной подстанции

№ п/п	Опасность	Возможные причины	Возможные последствия
1. Отказ конструкции			
1.1	Повреждение конструкции	Столкновение с судном Взрыв трансформатора Пожар в отстойной цистерне Экстремальные погодные условия Оседание грунта Износ Землетрясение Зона коррозии подводная и надводная (заплеск волны)	
1.2	Столкновение с судном	Потеря судном мощности Неудовлетворительный метод операции/расчета Человеческий фактор Неблагоприятная погода или состояние моря Отсутствие навигационных средств Дрейфующее судно	Повреждение конструкции (И)
1.3	Падающий груз	Поднимаемый груз превышает паспортную грузоподъемность Полный или частичный обрыв стропа Механическая неисправность Неблагоприятная погода Человеческий фактор	Травмы, смерти (П) Повреждение (И)
2. Отказ электрического оборудования			
2.1	Повреждения в цепи высокого напряжения	Соединительный узел	Травмы смерти (П)

№ п/п	Опасность	Возможные причины	Возможные последствия
2.2	Короткое замыкание в электрооборудовании	Плохое обслуживание Не отвечающие техническим условиям составляющие/кабели Неудовлетворительный проект	Пожар, взрыв (И)
2.3	Выделение SF ₆ *	Дефектная операция Отказ системы Неудовлетворительный проект системы	Травма, наркотическое воздействие, удушье (П) Выделение парникового газа (О)
2.4	Электрический удар, электрический шок	Действия по техническому обслуживанию Необученный персонал Прикосновение Отсутствие знаков высокого напряжения	Травмы, смерти (П)
2.5	Оставленный без присмотра потребитель электроэнергии	Отказ выключения электричества от потребителей	Пожар (И)
2.6	Отказ защиты освещения	Неадекватное заземление Недостатки проекта Плохое обслуживание	Пожар, взрыв (И)
2.7	Электромагнитная совместимость	Электромагнитное излучение от оборудования	Риск для здоровья (П) Взаимное влияние (И)
2.8	Потеря аварийного питания	Начинающийся отказ генератора Нехватка мощности дизеля Отказ батареи или непрерывного источника питания	Отключение потребителей (И)
2.9	Вытекание топлива из аварийного генератора, расходного танка или цистерны запаса	Потеря герметичности Неисправность трубы, клапана или шланга Человеческий фактор	Загрязнение (О) Пожар (И) Потеря аварийного питания (И)
2.10	Выделение водорода из аккумуляторных батарей	Разрушение источников Отсутствие вентиляции Отказ при зарядке батарей	Травмы (П) Взрыв (И)
2.11	Утечка аккумуляторной батареи	Неисправность конструкции Старение аккумуляторных батарей Плохое обслуживание Отказ при зарядке	Травмы (П)
3. Пожар и взрыв			
3.1	Пожар или взрыв основного трансформатора	Внутренняя неисправность Короткое замыкание Отсутствие охлаждающей среды Снижение качества смазочного масла Внешний пожар Перегрузка Плохая схема или расчет	Травмы, смерти (П) Выделение смазочного масла (О) Непроизводительная потеря времени (И)
3.2	Пожар вспомогательного трансформатора	Внутренняя неисправность Короткое замыкание Отсутствие охлаждающей среды Внешний пожар Перегрузка	Травмы (П) Непроизводительная потеря времени (И)

Продолжение табл. 2.

№ п/п	Опасность	Возможные причины	Возможные последствия
3.3	Пожар или взрыв коммутационной аппаратуры высокого напряжения	Отсутствие SF ₆ [*] Отказ заземления Короткое замыкание Перегрузка Сбой оборудования Плохое техническое обслуживание Отсутствие обучения Неправильные рабочие процедуры	Травмы (П) Непроизводительная потеря времени (И)
3.4	Пожар низковольтного оборудования	Короткое замыкание Перегрузка Сбой оборудования	Травмы (П) Непроизводительная потеря времени (И)
3.5	Пожар аварийного генератора	Внутренняя неисправность Закончилось топливо дизель-генератора Утечки топливной системы Плохое техническое обслуживание	Травмы (П) Загрязнение окружающей среды(О) Потеря аварийного питания (И)
3.6	Ядовитый дым	Пожар трансформатора или электрооборудования Взрыв Потеря герметичности	Травмы (П) Повреждение (И)
3.7	Пожар в жилом помещении или камбузе	Курение Плохая административно-хозяйственная работа Оставленное без присмотра электрооборудование	Травмы, смерти (П)
3.8	Пожар или взрыв на вертолетной палубе	Воспламенение течи или статический разряд	Травмы (П)

* SF₆ — изолирующий и дугогасящий газ (гексафторид серы или элегаз), нетоксичный, негорючий и не разрушающий озоновый слой. Тем не менее он отнесен к парниковым газам, на которые распространяется действие Киотского протокола.

Таблица 3. Отказы и неполадки в работе ВЭУ в порту Тикси за 2007—2011 гг.

Отказ	Причины	Период простоя	Устранение	Продолжительность, сут
Выход мощности за пределы допустимого	Неисправность компьютера, резкие порывы ветра	03—04.10.07	Поворот гондолы на 40° налево к ветру, отрегулирован автомат по максимальному току	1
Выход из строя азимутного двигателя	Износ двигателя	05—09.10.07	Установлен новый двигатель	4
Отказ гидравлической системы	Низкая температура, застывание масла	01—28.11.07	Замена масла на более низкотемпературное	27
Аварийная остановка	Низкая температура	26—28.12.07	Самоустранилась	2
Выход из строя анемометра	Причина не установлена	10.01—31.03.08	Установлен новый анемометр	80
Пробой соединительной муфты 6 кВ	Старение изоляции самой муфты	10—11.04.08	Установлена новая муфта	1
Выход из строя анемометра и румбометра	Снос ветром верхней части ВЭУ	20.10.08—19.03.09	Установлены новые анемометр и румбометр	150

Таблица 4. Основные характеристики транспортно-монтажных судов, построенных до 2010 г.

Название	Владелец	Максимальная глубина эксплуатационная, м	Максимальная грузоподъемность крана, т	Конструктивный тип
JB-109	A2SEA	50	280	НСПБ
«Liss»	«Smit»	500	600	НСПБ
JB-114 и JB-115	«Jack up Barge NV»	50	280	НСПБ
«Sea Jack»	A2SEA	35	600	СПБ
«Titan 2»	«KS Energy»	50	180	СПБ
«Resolution»	«MPI Vroon»	35	300	СПС
«Kruken»	«Seajacks Jnt.»	40	700	СПС

Суда обеспечения

В Арктике затраты на монтаж и техническое обслуживание существенно возрастают из-за удаленности центров строительства и снабжения, суровых гидрометеорологических условий и недостаточной надежности оборудования.

Например, 25 сентября 2007 г. в порту Тикси была передана в эксплуатацию ветроэнергетическая установка (ВЭУ) мощностью 250 кВт, до этого 20 лет проработавшая в Германии. Как видно из табл. 3, из-за отказов и неполадок ВЭУ не работала 265 дней из 540, т. е. 49% времени.

На основании опыта эксплуатации выдвинуты следующие требования:

- установить новое оборудование без гидравлической системы торможения и редуктора;
- предусмотреть регулирование углов атаки лопастей;
- установить дистанционные датчики выдачи мощности в сеть, скорости ветра и технического состояния оборудования.

Основные характеристики транспортно-монтажных судов приведены в табл. 4 и 5, внешний вид наиболее современных из них — на рис. 11.

Таблица 5. Основные характеристики самоподъемных транспортно-монтажных судов постройки 2011 г.

Характеристика	«Innovation», «Vidago»	«Sea Installer»	«Mbi Adventure»
Страна-строитель	Польша	•	Нидерланды
Верфь-строитель	«Crist»	•	COSCO
Наибольшая длина, м	147	132	138
Ширина, м	42	39	40,8
Высота борта	•	•	10,0
Осадка, м	•	5,8	5,5
Максимальная глубина эксплуатации, м	90	•	40
Мощность двигателей, кВт	28 600	11 400	13 500
Скорость хода, уз	12	12	12,5
Грузоподъемность на колоннах, т	6500	•	7500
Краны:			
грузоподъемность, т	1500/1200	800/900	1000/160
вылет, м	31,5	•	24/70
высота подъема, м	120	•	104
Серия, единиц	4	•	2
Площадь свободной палубы, м ²	•	•	3600
Азимутальные движители, кВт	•	•	3×3250

Рис. 12. Внешний вид судна с малой площадью ватерлинии GESA



Таблица 6. Условия эксплуатации судов обеспечения в Великобритании

Категория ТО	Техническое средство	Ремонтная группа	Применение	Условия погоды		Скорость перехода, км/ч	Время стоянки, ч	Возможность использования в году, %
				H_s max, м	V ветра, м/с			
1	Жесткая лодка	2	Транспортировка персонала для инспекции и ремонта	1	10	56	0	37,3
2	Снабженец	2—4	Транспортировка персонала	2,5	12	20	0,5	78,1
			Замена компонентов массой менее 1 т	1,5	8	20	1	40,0
3	Самоподъемное судно / баржа	4—8	Переход	2	15	7	•	•
			Позиционирование	2	8	—	3	46,5
			Замена ротора и гондолы	5	10	—	•	52,7

Таблица 7. Основные характеристики быстроходных двухкорпусных судов, осуществляющих ТО-1

Характеристика	«MarineCo Shamal»	«CW Alliance»	«MCZ Zephyr»	GESA
Длина наибольшая, м	26,0	18,5	19,4	29,5
Ширина наибольшая, м	10,4	•	7,2	9,9
Высота борта, м	2,4	2,28	2,4	4,4
Осадка проектная, м	2,05	0,68	1,1	2,2
Скорость хода, уз:				
эксплуатационная	20	25	24	22,5
максимальная	27	30	26	24
Дальность плавания, миль	1210	2200	•	•
Мощность двигателей, кВт	2×895	2×449	2×710	2×900
Носовые подруливающие устройства, кВт	2×52	—	•	•
Экипаж, человек	4	2	2—3	•
Пассажиры, человек	12/24	14	12	24
Кран	20	—	•	•
Грузоподъемность на палубе, т	15		•	10
Серия, единиц	2	2	2	•



Рис. 13. Внешний вид буксиров ледового класса: а – проект BLV01; б – проект 21110; в – ПОСС 106

В табл. 6 сопоставлены требования к условиям эксплуатации судов обеспечения в Великобритании согласно [5] и ее результаты.

За рубежом для ТО-1 широко применяют быстроходные катамараны и суда с малой площадью ватерлинии, которые отмечены в 2011 г. как наиболее прогрессивные [11]. Основные характеристики этих судов приведены в табл. 7, внешний вид одного из них — на рис. 12. Более высокие мореходные качества этих судов по сравнению с однокорпусными такого же размера позволяют увеличить время их использования.

Для технического обслуживания МВЭС в ледовых условиях Арктики могут быть использованы морские буксиры ледового класса, имеющие соответствующую форму корпуса и конструкцию (табл. 8, рис. 13).

Оценка риска ТЭК

Типичные элементы ТЭК с высоким риском делятся на следующие группы:

- конструкция;
- энергетика;

- предотвращение воспламенения;
- пожар и газ;
- ликвидация аварий и эвакуация;
- системы покидания;
- судовые устройства и системы.

Примерный список некоторых типичных элементов ТЭК с высоким риском приведен в табл. 9 по аналогии с требованиями DNV.

В табл. 10 приведена шкала последствий аварийных ситуаций, предложенная DNV [10].

Создание и эксплуатация объектов транспортно-энергетического комплекса в Арктике, использующих энергию ветра, связаны со значительными рисками.

Актуальной задачей является разработка технорабочего проекта арктической ветроэнергетической станции с использованием инновационных технических решений, обеспечивающих минимальные риски для окружающей среды и надежную эксплуатацию станции в суровых климатических условиях.

Таблица 8. Основные характеристики морских буксиров ледового класса

Характеристика	Проект BLV01	Проект 21110	ПОСС 106
Страна-строитель	Россия	Россия	Украина и Норвегия
Верфь-строитель	ОАО «Завод “Нижегородский теплоход”»	ОАО «Выборгский судостроительный завод»	—
Наибольшая длина, м	43,09	36,65	31,00
Наибольшая ширина, м	10,20	35,00	9,50
Высота борта, м	3,30	6,20	4,80
Осадка, м	2,50	5,72	3,30
Мощность ГД, кВт	2×405	1980	2×1305
Тяга на швартовых, т	10	64	40
Скорость хода, уз	10,0	13,5	10,0
Экипаж, человек	8	5	9
Ледовый класс	Ice3	ЛУ5	ЛУ5

Таблица 9. Примерный список некоторых типичных элементов ТЭК с высоким риском

Раздел и элемент	МВЭС		Трансформаторная подстанция	Судно для установки и ремонта		Судно техобслуживания	
	стационарная	плавающая		самоподъемное	плавающее	с устройством для перехода	без устройства для перехода
Конструкция							
Опорные блоки и сваи	x	—	x	—	—	—	—
Опоры самоподъемного корпуса и соответствующие системы подъема и блокировки	—	—	—	x	—	—	—
Корпус включая водонепроницаемые закрытия	x	x	x	x	x	x	x
Вышка для перехода и перегруза	—	—	—	—	x	x	—
Основная конструкция верхнего строения	x	x	x	x	x	x	x
Основание крана	—	—	—	x	x	x	—
Фундаменты	x	x	x	x	x	x	x
Вертолетная площадка	—	—	x	—	—	—	—
Энергетика							
Аварийное энергоснабжение	x	x	x	x	x	x	x
Батареи	x	x	x	x	x	x	x
Защита электрооборудования	x	x	x	x	x	x	x
Предотвращение воспламенения							
Непрерывность электрического заземления	x	x	x	x	x	x	x
Электрооборудование в опасных зонах	x	x	x	x	x	x	x
Защита горячих поверхностей	x	x	x	x	x	x	x
Естественная вентиляция	x	x	x	x	x	x	x
Пожар и газ							
Система (обнаружения воспламеняющегося и токсичного) газа	x	x	x	x	x	x	x
Система обнаружения пожара	x	x	x	x	x	x	x
Система орошения	x	x	x	x	x	x	x
Спринклерная система	x	x	x	x	x	x	x
Пожарные насосы	x	x	x	x	x	x	x
Противопожарный кольцевой водопровод	—	x	x	x	x	x	x
Система пенного пожаротушения	x	x	x	x	x	x	x
Система газового пожаротушения	x	x	x	x	x	x	x
Пассивная противопожарная защита	x	x	x	x	x	x	x
Система вентиляции	x	x	x	x	x	x	x

Таблица 10. Шкала последствий аварийных ситуаций

Обозначение	Расшифровка	Коэффициент безопасности	Описание
Угроза безопасности здоровью и жизни (потенциальная потеря жизни)			
НН	Очень высокая	Более 1	Множество фатальных исходов
Н	Высокая	1	Единичный фатальный исход
М	Средняя	10–1	Большая часть ранены и инвалиды
Л	Низкая	10–2	Небольшая часть раненых
LL	Очень низкая	10–3	Единичные травмы
Воздействие на окружающую среду			
НН	Очень высокое	Более 1600	По всем параметрам
Н	Высокое	10 000—16 000	Сильное
М	Среднее	1000—10 000	Местное
Л	Низкое	100—1000	Слабое
LL	Очень низкое	Менее 100	Незначительное
Экономические последствия (от начальной стоимости, %)			
НН	Очень высокие	Более 20	По всем параметрам
Н	Высокие	2—20	Сильное
М	Средние	0,2—2	Местное
Л	Низкие	0,02—0,2	Слабое
LL	Очень низкие	Менее 0,02	Незначительное
Вероятность выхода из строя за год			
НН	Очень высокая	Более 10–2	Ожидаемый выход из строя
Н	Высокая	10–2—10–3	Высокая вероятность
М	Средняя	10–4—10–3	Средняя вероятность
Л	Низкая	10–5—10–4	Низкая вероятность
LL	Очень низкая	Менее 10–5	Выход из строя не ожидается

Литература

1. Иванова И. Ю. и др. Ветроэнергетические ресурсы г. Верхоянска Республики Саха (Якутия) и возможность их использования для энергоснабжения // *Фундамент. исслед.* — 2013. — № 4. — С. 30—38.

2. Таровик В. И., Вальдман Н. А., Труб М. С., Озерова Л. Л. Развитие морских электростанций, использующих возобновляемые источники энергии // *Арктика: экология и экономика* // 2013. — № 2 (10). — С. 34—47.

3. Large-Scale Offshore Wind Power in the United States Assessment of opportunities and barriers / National Renewable Energy Laboratory. — [S. I.], Sept. 2010. — 221 p.

4. Ciamberlano F. et al. Engineering Insurance of Offshore Wind Turbines: Paper presented at at the 39th IMIA Annual Conference on 12 September 2006 in Boston.

5. Coache D. Maintenance of offshore wind turbines — An analysis of the effect of accessibility / Cranfield Univ. — [S. I.], 2006. — 191 p.

6. The European offshore wind industry-key trends and statistics 2012 / European Wind Energy Association. — [S. I.], Jan. 2013.

7. Masabayashi K. Technical challengers in offshore wind turbine generator installation // *Marine Renewable and Offshore Wind Energy* / RINA. — [S. I.], 2010. — P. 135—141.

8. Offshore substations for wind farms: DNV-OS-J201. — [S. I.], Oct. 2009. — 67 p.

9. Risk Assessment of a Wind farms // *The Write Pass J.* — 2012. — XI.

10. Risk based verification: DNV-OSS-300. — [S. I.], Apr. 2004. — 28 p.

11. Significant Small Ships. — [S. I.], 2011.