

Развитие морских электростанций, использующих возобновляемые источники энергии

В. И. Таровик¹, кандидат технических наук,
Н. А. Вальдман, кандидат технических наук,
М. С. Труб, Л. Л. Озерова

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Приведены результаты разработки концепций создания морских плавучих электростанций, использующих возобновляемые источники энергии.

Рассмотрены различные конструктивные типы и мощности таких электростанций. Показана экономическая и экологическая целесообразность их эксплуатации в условиях Арктики. Проанализированы основные проблемы, пути их решения, риски, способы их снижения.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, морская плавучая электростанция, концептуальный проект

Перспективы использования возобновляемых источников энергии

Во ФГУП «Крыловский государственный научный центр» с 80-х годов XX в. ведутся исследования, направленные на разработку конструкций, использующих возобновляемую (экологически чистую) энергию.

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) — это энергетические ресурсы, которые восполняются естественным образом, в первую очередь за счет энергии солнечного излучения (рис. 1). С точки зрения практического использования этих ресурсов технический интерес представляет энергия ветра, морского волнения и морских течений.

По результатам исследований были сделаны выводы о целесообразности применения парусов на некоторых типах судов, энергии приливов, солнца и разницы температур в поверхностных и глубинных слоях воды, получены патенты и реально установлены конструкции.

В последние годы разработан ряд концептуальных проектов морских электростанций различных типов, поданы заявки на изобретение и принято решение о выдаче патента [6].

В сотрудничестве с ООО «Гидроэнергоспецпроект» выполнены технические проработки сооружений для комплексного использования волнения, ветра и солнца, а также защиты берегов черноморских курортов Евпатории и Анапы.

Основные факторы развития мирового рынка ВИЭ сформулированы в табл. 1. Доля ВИЭ в глобальном энергопотреблении в 2010 г. составила 16,7% [1].

В январе 2009 г. учреждено Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA), задача которого — распространение технических, политических и экономических ноу-хау в сфере ВИЭ для подготовки решений конференций ООН по изменению климата.

В частности, в целях надлежащего финансирования ветроэнергетики Всемирная ветроэнергетическая ассоциация (WWEA) совместно с IRENA предложила создать Международный фонд инвестирования ВИЭ, основным элементом которого должна стать всемирная программа специальных тарифов на электроэнергию, выработанную за счет ВИЭ.

В Евросоюзе поставлена задача к 2020 г. за счет использования различных видов ВИЭ и выведения из эксплуатации устаревших источников энергии уменьшить выброс CO₂ на 30%.

На установки, использующие энергию ветра и солнца, приходится подавляющая доля электростанций, работающих на ВИЭ, — 41% и 53% соответственно.

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



Рис. 1. Классификация возобновляемых источников энергии

Использование энергии течения и волнения на сегодня ограничено, несмотря на ряд успешно завершенных опытно-конструкторских работ.

Общим достоинством таких электростанций является возможность сокращения использования и транспортировки углеводородов, затраты на которые очень велики, особенно в Арктике.

В России использование ВИЭ находится на начальном этапе: принят ряд правительственных решений о доведении доли ВИЭ к 2015 г. до 2,5%, к 2020 г. — до 4,5% общего потребления, в частности, мощности ветроэнергетических электростанций (ВЭС) — с 15 до 600 МВт в 2015 г. и 1200 МВт в 2020 г. В табл. 2 приведены рекомендации по вводу генерирующих мощностей объектов на основе ВИЭ до 2030 г. [10].

Обзор [9] включает описание 46 проектов 13 российских и зарубежных компаний общей мощностью более 5000 МВт. Эти параметры показывают, что

ветроэнергетика может стать заметным явлением в стране, как только правительство примет решения, поддерживающие ВИЭ и ветроэнергетику в частности.

Перспективы развития морских ветроэнергетических станций

Исследования [18] показали, что энергия ветра определяет экономическую эффективность морских ветряных электростанций (МВЭС).

Совокупная установленная мощность ветроэнергетических установок (ВЭУ) в мире достигла в 2012 г. 273 ГВт, превысив уровень 2011 г. на 36 ГВт, или на 15%.

В 36 странах разрабатывается или строится более 930 МВЭС, в частности, в Великобритании до 2020 г. намечено построить МВЭС общей мощностью 32 ГВт, т. е. почти в 11 раз больше, чем имеется

Таблица 1. Основные факторы развития мирового рынка ВИЭ

Политические факторы	Экономические факторы	Экологические факторы	Технологические факторы
Стремление государств к обеспечению энергетической независимости и безопасности	Рост цен на топливные энергоресурсы	Противодействие изменению климата путем использования возобновляемых энергетических технологий	Совершенствование возобновляемых энергетических технологий, инновационный путь развития
Снижение зависимости от одного источника энергии и от импортных поставок энергоресурсов	Снижение стоимости возобновляемых энергетических технологий	Осознание истощаемости ископаемых энергоресурсов, забота о будущих поколениях	Снижение технологических потерь за счет использования ВИЭ

Таблица 2. Рекомендации по вводу генерирующих мощностей объектов на основе ВИЭ в России на период до 2030 г., тыс. кВт

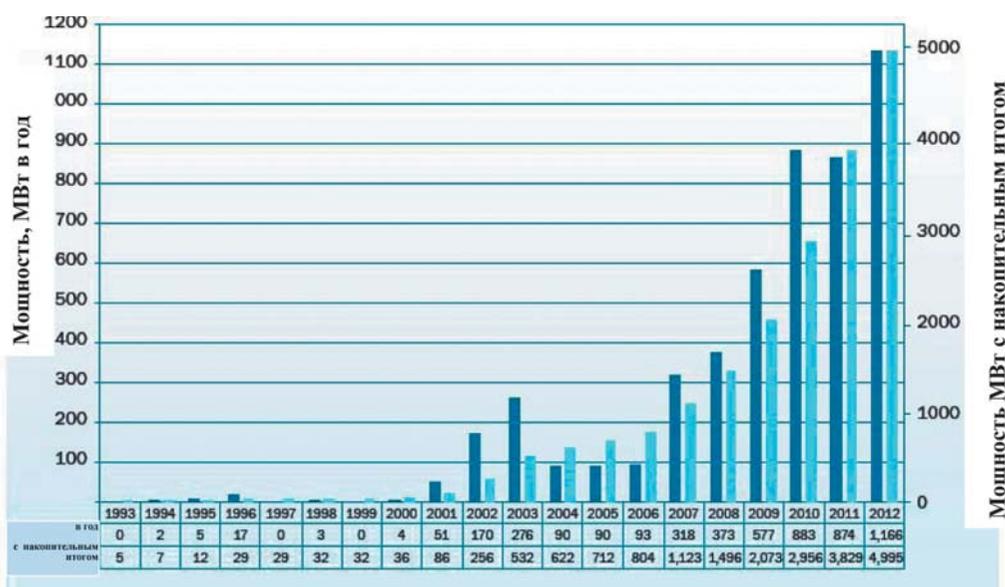
Вид энергосистемы	2011—2015 гг	2016—2020 гг.	2021—2025 гг.	2026—2030 гг.	Всего 2011—2030 гг.
Всего	161,5	631	678	3653	5123,5
Из них Био-ТЭЦ	0	0	163	2350	252
Ветряные	24,4	250	50	450	774,4
Гео ТЭС	15,5	50	0	0	65,5
Малые ГЭС	109,6	331	465	845	1750,6
Приливные	12	0	0	0	12

в настоящее время. Для строительства и обслуживания МВЭС зарегистрировано 113 типов судов специального назначения с дорогостоящим и сложным оборудованием [16].

В 10 странах Западной Европы к концу 2012 г. было построено 55 МВЭС (в Северном море — 65%, в Балтийском море — 16%, в Северной Атлантике — 19%) общей мощностью 5 ГВт, которые произвели

18 ТВт·ч электроэнергии, что составило 0,5% всего потребления энергии в 27 странах Евросоюза (рис. 2) [14].

Наблюдается перераспределение ролей отдельных бассейнов за счет ввода МВЭС на Средиземном море (8%) и Балтике (21%), а также сокращения доли Северной Атлантики (9%) и Северного моря (62%).



Страна	Велико-британия	Дания	Бельгия	Германия	Нидерланды	Швеция	Финляндия	Ирландия	Норвегия	Португалия	Всего
Количество портов	20	12	2	6	4	6	2	1	1	1	55
Количество турбин	870	416	91	68	124	75	9	7	1	1	1662
Установленная мощность, МВт	2947,9	921	379,5	280,3	246,8	163,7	26,3	25,2	2,3	2	4995
Доля общей мощности, %	59,0	18,0	8,0	6,0	5	3	1	0	0	0	100

Рис. 2. Рост мощности МВЭС в Евросоюзе

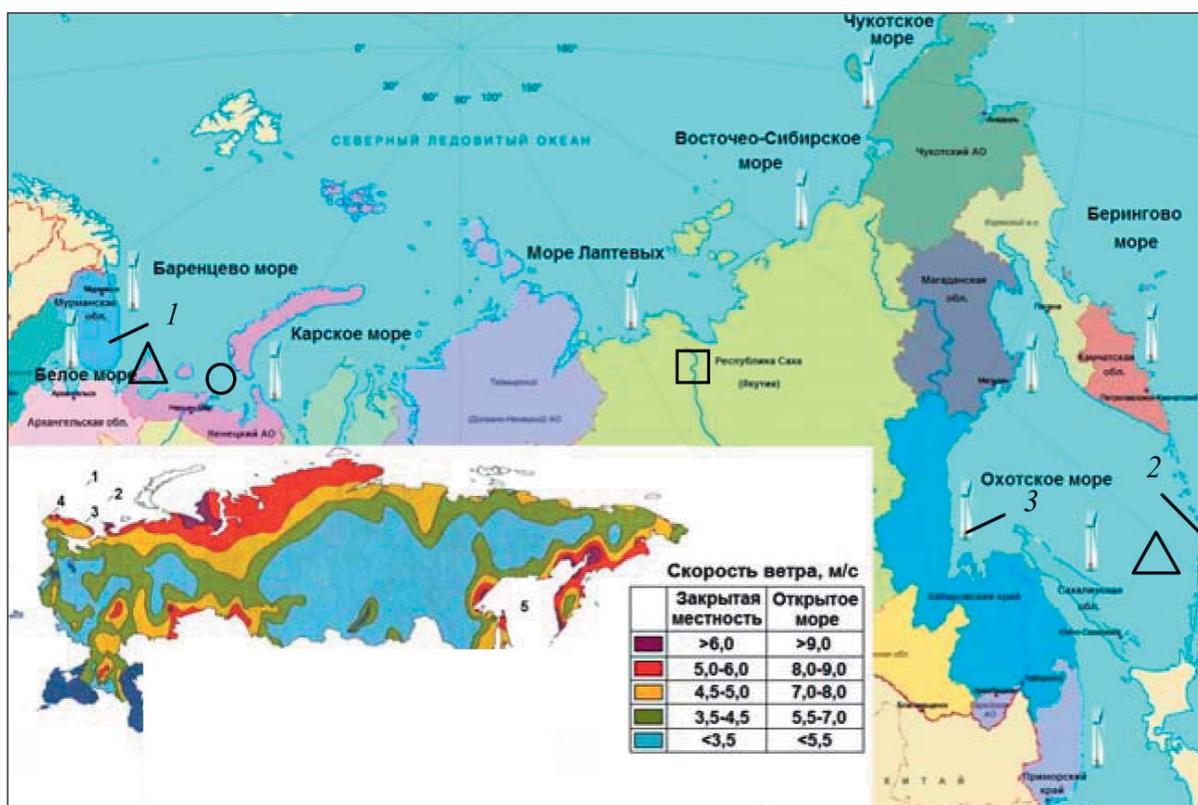


Рис. 3. Возможные места размещения МВЭС в Арктике и на Дальнем Востоке: 1 – поселок Териберка, 2 – остров Итуруп, 3 – рекомендуемое размещение стационарной МВЭС; треугольниками обозначены плавучие МВЭС, кружком – модуль, использующий энергию волнения, прямоугольником – модуль, использующий энергию течения

В частности, в 2012 г. 4 МВЭС подключены в электросеть, 5 МВЭС частично укомплектованы и на 9 объектах установлены фундаменты. Инвестиции в 2009 г. составили 1,5 млрд евро, в 2010 г. — 3 млрд, в 2011 г. — 3,4 млрд, в 2012 г. — 4,6 млрд евро.

Всего в мире установлено 5539 МВт МВЭС, из них на Евросоюз приходится 90% мощности, на Китай — 9% (510 МВт, третье место), на Японию — 1% (34 МВт, седьмое место).

В настоящее время нет планов широкого использования ВЭУ в Арктике, но в перспективе проявляется большой интерес к замерзающему Ботническому заливу [12] и к Балтийскому морю в целом: Швеция — 5% (в 2012 г. — 3%), Финляндия — 4% (в 2012 г. — 1%), Эстония — 5%, Латвия — 1%.

По мнению специалистов, МВЭС имеют ряд достоинств по сравнению с береговыми:

- высокое качество ветровых ресурсов (см. таблицу на рис. 3), в результате степень использования на море превышает 40%, а на берегу — всего 25—30%;
- близость к потребителям электроэнергии;
- увеличенное число вариантов передачи электроэнергии;
- возможность уменьшения использования площади суши;
- допустимость больших размеров и весов;
- эстетические аспекты;

- возможность создать новые высокотехнологичные производства с тысячами новых рабочих мест;
- отсутствие главных категорий уязвимых объектов (табл. 3).

Кроме того, отмечаются такие преимущества МВЭС, как отсутствие воздействия шума, особенно в инфракрасной части спектра, на человека, животных и растительность, возможность спасания экипажей судов благодаря наличию на МВЭС убежища и запасов провизии и воды, а также возможность создания гибридных электростанций, использующих другие виды ВИЭ.

Вместе с тем использование МВЭС позволяет:

- снизить затраты на углеводороды и их транспортировку (табл. 4);
- выполнить решения Киотского протокола о снижении выбросов CO₂;
- обеспечить быстрое восполнение дефицита в береговой энергосистеме за счет серийного строительства полностью готовой к эксплуатации электростанции. К недостаткам МВЭС следует отнести:
- затраты на создание — в два раза выше, чем на суше;
- помехи движению судов;
- возможное воздействие на морские экосистемы;
- затраты на морские операции;
- затруднения с ремонтом и заменой ветроэнергетических агрегатов;

Таблица 3. Сравнение главных категорий уязвимых объектов ветряных электростанций

Категория	Береговая [13] ВЭС	Морская ВЭС
Здания и сооружения	+	-
Шоссе и дороги	+	-
Водные пути	+	+
Железные дороги	+	-
Промышленные объекты	+	-
Подземные и надземные трубопроводы	+	-
Линии высокого напряжения	+	-
Плотины и дамбы	+	-
Пути прокладки линий связи	+	-
Ветроэнергетический агрегат	+	+

- необходимость создания специализированных судов и сооружений;
- необходимость обеспечения:
 - работы оборудования в условиях волнения, обледенения, снега и града;
 - выживания оборудования и стоянки в шторм;
 - доставки, ремонта и технического обслуживания.

Кроме того, к недостаткам МВЭС относятся возможное взаимное влияние турбулентных потоков близко расположенных ветроэнергетических агрегатов, а также падение кусков льда при обледенении.

В отдельных случаях — при отсутствии возможности сетевого использования электроэнергии (например, на погранзаставах, гидрометеостанциях и небольших островах) — недостатком является также необходимость применения вспомогательных дизель-генераторов.

В табл. 5 приведена оценка особенностей воздействия МВЭС на окружающую среду в процессе эксплуатации с учетом того, что при строительстве и морских операциях экологические аспекты носят общий характер.

Воздействие МВЭС на окружающую среду несопоставимо с влиянием традиционной энергетики (разливы нефтепродуктов, загрязнение Мирового океана и атмосферы). Использование МВЭС не приводит к выбросу в атмосферу CO₂, что делает их одними из ключевых элементов глобальной стратегии по снижению угрозы изменения климата, например, мощность 1 МВт позволяет снизить выбросы CO₂ более чем на 30 тыс. т ежегодно.

В Западной Европе в настоящее время выполняется программа «20/20» и планируется программа «60/60» (числитель — удаленность МВЭС от берега в километрах, знаменатель — глубина акватории,

Таблица 4. Затраты на углеводороды и их транспортировку в Ненецком автономном округе в 2009 г. [7]

Наименование	Стоимость с транспортировкой, тыс. руб./т	Вес, тыс. т	Затраты, тыс. руб.	Объем субсидирования федерального бюджета, %	
				населению	организациям
Дизельное топливо	32,0	12 894	412 897	80	80
Нефть	7,0	350	2450		60
Каменный уголь	5,2	26 420	138 255	95	80
Дрова	3,4 *	15 325 **	52 310	95	80
Итого			605 912		

* тыс. руб./ м³.

** тыс. м³.

Таблица 5. Особенности воздействия МВЭС на окружающую среду

Источник	Воздействие
Воздушный шум Механические колебания (от редуктора, подшипников и генератора). Аэродинамические колебания, вызванные вращением лопастей, которые могут быть низкочастотными (менее 16—20 Гц) и высокочастотными (от 20 Гц до нескольких килогерц)	На концах лопастей возникают сверхзвуковые скорости и инфразвуковой эффект, отрицательно воздействующий на биологические объекты
Магнитные поля, создаваемые кабелями	Вредное воздействие на морских животных
Металлические части МВЭС	Значительные помехи радиосвязи и радиолокации
Вращение лопастей	Нарушает маршруты миграции птиц и грозит гибелью или увечьями птицам [17]

на которой устанавливается станция, в метрах). Для Северной Европы актуально размещение МВЭС на удалении от берега до 140 км, для Южной Европы — на глубинах до 300 м [3].

До 2020 г. в Евросоюзе планируется построить ветряные электростанции общей мощностью 230 ГВт, из которых 40 ГВт (17%) будет приходиться на морские.

Основные проблемы электростанций в Арктике

Особенно актуальна задача использования возобновляемой энергии для регионов арктического и тихоокеанского побережья России, заселенных островов, пограничных застав и гидрометеостанций.

Важнейшим направлением является энергоснабжение объектов инфраструктуры Северного морского пути, транспортный потенциал которого требует соответствующего развития. Комплекс таких локальных источников электроэнергии может обеспечивать работу создаваемых морских и береговых систем навигационного обслуживания, ледового и навигационного сопровождения, обеспечения безопасности и спасания и пр., а также выполнять функции временного энергообеспечения на начальных этапах создания объектов береговой и морской инфраструктуры. После создания системы стационарного берегового электроснабжения энергетические блоки могут быть переведены в другой район на другой объект.

В случае использования береговых ВЭС большое значение имеет доставка их морем, выгрузка на берег и транспортировка по берегу. Как правило, в этих регионах местные резервы ископаемого органического топлива ограничены, труднодоступны или полностью отсутствуют, а строительство централизованных линий электропередачи экономически

нецелесообразно и зачастую технически невозможно. Высокие затраты на доставку топлива местным дизельным электростанциям приводят к неприемлемой стоимости энергии для населения и местной промышленности, а в итоге в сочетании с экстремальными климатическими условиями — к низким темпам социально-экономического развития. Например, в Мурманской области из-за удаленности и плохих транспортных связей затраты на топливо возрастают на 50—80%, а в труднодоступных местах — до 200% и более. Использование МВЭС может способствовать замещению до 30—50%, а в некоторых районах — до 60—70% дефицитного органического топлива [2].

В качестве примера рассмотрены потребности Мурманской области (табл. 6 и 7) [8] и Республики Саха (Якутия) (табл. 8) [11]. Кроме того, может возникнуть необходимость в использовании большой мощности (15—30 МВт) при освоении месторождений на Курильских островах (точка 2 на рис. 3) и в Баренцевом море (точка 1 на рис. 3). С учетом оборонных потребителей [5] может возникнуть нужда в морских электростанциях различных мощности, конструкции и назначения (табл. 9, крестиками отмечены разработанные концептуальные проекты электростанций). При выполнении проектов возникли следующие проблемы:

- выявление приемлемых грунтов;
- преодоление воздействия льда;
- предотвращение обледенения.

В условиях шельфов Арктики использование относительно небольших (диаметром 1—6 м) стационарных конструкций затруднено из-за наличия многолетнемерзлых пород (ММП) и охлажденных ниже 0°C пород (ОП). Так, для Печорского, Карского и Баренцева морей характерно такое современное состояние криолитозоны [4]:

Таблица 6. Потребности отдаленных потребителей Мурманской области в энергоснабжении

Потребители	Электроэнергия, кВт·ч	Пар		Итого, кВт·ч
		Гкал/ч	кВт·ч	
Метеостанции	8—20	0,02	8	16—28
Прибрежные погранзаставы	60	0,1—0,2	400—800	100—140
Рыболовецкие и оленеводческие хозяйства	200—500	2—3	800-1500	1000—2000
Прибрежные объекты Северного флота	100—150	0,3—0,5	120—200	220—350

Таблица 7. Потребности населенных пунктов Мурманской области в энергоснабжении

Число жителей	Электроэнергия, кВт/ч	Пар		Итого, кВт·ч
		Гкал/ч	кВт·ч	
10	10	0,05	20	30
20	20	0,10	40	60
50	50	0,25	100	150
100	100	0,50	200	300
200	200	1,00	400	600
500	500	2,50	1000	1500

- редкоостровное и островное распространение ММП вдали от побережья и сплошное, переходящее в прерывистое — в прибрежной части (до глубины не менее 20 м);
- криолитозона представлена ОП вдали от берегов, а вблизи берегов ярус ММП перекрыт и подстилается ярусами ОП;
- глубина залегания кровли ММП составляет 8—30 м ниже поверхности дна;
- глубина залегания подошвы ММП — от 10—12 до 100—200 м.

Хотя на арктических шельфах в настоящее время температура придонной морской воды, как правило, отрицательная, во избежание влияния протаивания на поведение свай они должны быть погружены в грунт ниже ОП.

В случае приледникового типа шельфа глубина промерзания грунта в море существенно больше (600—900 м), чем на прилегающей суше (100—300 м). Таким образом, например, при глубине 20 м и длине сваи в грунте 30 м ее физический размер должен составить не менее 80 м, а забивка представляет весьма трудную задачу. В связи с этим возможно увеличение глубины размещения станции за счет роста расстояния от берега и, соответственно,

стоимости крайне дорогого электрического кабеля, что соответствует существующим сегодня тенденциям развития МВЭС.

Вместе с тем имеющийся опыт эксплуатации береговых ВЭУ на Чукотке, Аляске и в Антарктиде определяет возможность решений этой проблемы за счет геологических изысканий и анализа экономической эффективности.

Воздействие морского льда (обломков ледяных полей, дрейфующего льда, припайного льда) вызывает дополнительные статические и динамические усилия на башню и соответственно на фундамент стационарной МВЭС или якорной системы морской плавучей электростанции (МПЭС). Под действием морского льда происходят механические удары и возникают увеличенные вибрации, которые могут привести к динамическим эксплуатационным нагрузкам и усилению коррозии, а следовательно, к усталости и сокращению срока службы.

Для предотвращения такого воздействия представляются целесообразными применение ледоразрушающих устройств, нестандартных материалов (железобетона, полимерных композиционных материалов), увеличение толщины и электрообогрев обшивки, в крайнем случае — выход на берег.

Таблица 8. Потребности в электроэнергии некоторых населенных пунктов побережья Республики Саха (Якутия)

Показатель	Быковский	Таймылыр	Тикси	Нижнеянск	Чокурдах
Среднегодовая скорость ветра на отметке метеостанции 10 м, м/с	4,67	4,90	4,67	4,62	3,82
Выработка электроэнергии ВЭУ, тыс. кВт·ч в год	272	434	4073	788	1261
Число часов использования ВЭУ	2716	2891	2716	2628	2015
Коэффициент использования установленной мощности ВЭУ, %	31	33	31	30	23
Мощность и количество ВЭУ, кВт	100	150	5×300	2×150	2×300
Фирма — изготовитель ВЭУ	«Nord Wind»	«Nord Wind»	«Enercon»	«Nord Wind»	«Enercon»
Ориентировочное расстояние до точки подключения к электросети, м	200	1000	200	500	1000
Экономически обоснованный тариф 2007 г., руб./кВт·ч	14,37	11,50	8,48	11,63	11,47
Степень износа основного оборудования дизельной электростанции, %	42	94	50	77	103
Степень транспортной доступности	Причал	Причал	Порт	Порт	Причал
Численность эксплуатационного персонала на дизельной электростанции	6	10	16	18	24
В том числе ИТР	1	1	7	6	—
Фактическая выработка электроэнергии в 2008 г., млн кВт·ч	1,21	2,23	21,2	5,39	8,65

Воздействие обледенения (особенно лопастей ВЭУ) обусловлено как брызгами, срываемыми ветром с волн при низких температурах воздуха, так и присутствием атмосферного обледенения, вызванного нарастанием льда, внутриоблачным обледенением из-за переохлаждения капель воды в облаке или тумане, осадочным обледенением, вызванным переохлажденным дождем или морозью, скоплениями мокрого снега и изморозью, т. е. белым льдом с воздухом внутри [15].

Как показали опыт эксплуатации и модельные эксперименты на судах и нефтяных платформах, брызги распространяются в зависимости от высоты волны, скорости ветра и температуры воздуха в данной акватории на высоту не более 10 м над водой. По данным Всемирной метеорологической организации, обледенение не превышает высоты 16 м, поэтому размещение конструкций выше этих величин будет предотвращать их обледенение, в противном случае необходимо применять те или иные меры «винтеризации», предусмотренные классификационным обществом (нормально до -30°C , в Арктике — до -40°C), в частности, нагрев механизмов и смазки конструкций, покрытие специальными химическими составами, электрифицированными чехлами,

применение материалов, имеющих пониженные адгезионные свойства, и т. п.

Обледенение метеорологического оборудования на роторе искажает показания скоростей и направления ветра, что снижает эффективность ВЭУ. Наиболее опасным является обледенение лопастей, что значительно увеличивает массу ротора, изменяет аэродинамические коэффициенты, снижает эффективность работы и продолжительность эксплуатации как в сезон, так и в целом, увеличивает уровень шума и влияние на радиолокационную прозрачность, а также может повредить соседние конструкции и обслуживающий персонал падающими кусками льда. Для предотвращения такого риска необходимо изготавливать лопасти из морозостойких материалов и предусматривать антиобледенительные устройства (тепловые, механические, жидкостные или гибридные).

Создание и эксплуатация таких устройств осложнена отсутствием персонала на МПЭС, а также необходимостью решения следующих проблем:

- исследования на данной акватории содержания «жидкой воды» и среднего диаметра капли воды, их одновременной комбинации, скорости ветра и температуры;

Таблица 9. Матрица возможных вариантов морских электростанций

№	Наименование	Большая мощность (более 10 МВт)	Средняя мощность (1—10 МВт)	Малая мощность (0,1—1 МВт)	Сверхмалая мощность (менее 0,1 МВт)
1	Обслуживаемые объекты	Рудник, порт, военно-морская база	Портопункт, поселок, локальный пункт базирования военной техники	Погран-застава	Гидрометеостанция, средства сети подводно-надводного мониторинга и наблюдения
2	Связь с электрической частью				
2.1	Сетевой	+ *			
2.2	Автономный			+ **	
3	Дополнительные источники энергии				
3.1	Дизель				
3.2	Солнце	+ *			
3.3	Аккумулятор				
3.4	Волнение	+ *		+ **	
3.4.1	Гидравлический принцип			+ **	
3.4.2	Индукционный принцип			+ **	
3.5	Течение	+ *		+ **	
4	Назначение				
4.1	Выработка электроэнергии	+		+	
4.2	Выработка электрической и тепловой энергии				
5	Вид ветродвигателя				
5.1	Горизонтально-осевой	+		+	
5.1.1	Открытый	+ *			
5.1.2	В насадке			+ **	
5.2	Вертикально-осевой		+		
6	Конструкция опоры				
6.1	Плавучая	+			
6.1.1	Сталь	+			
6.1.2	Железобетон	+			
6.2	Стационарная в море / на берегу				
6.2.1	Моносвая			+	
6.2.2	Плита				
	Без свай	+		+	
	Со сваями	+			

Продолжение табл. 9

№	Наименование	Большая мощность (более 10 МВт)	Средняя мощность (1—10 МВт)	Малая мощность (0,1—1 МВт)	Сверхмалая мощность (менее 0,1 МВт)
7	Материал башни				
7.1	Сталь	+		+	
7.2	Железобетон				
7.3	Титан				
7.4	Полимерный композиционный				
8	Способ доставки на место эксплуатации				
8.1	Буксировка полностью готовой	+			
8.2	Транспортировка на палубе				
8.2.1	По частям			+	
8.2.2	Целиком			+	
9	Место эксплуатации				
9.1	В море				
9.1.1	На чистой воде	+			
9.1.2	Часть года во льдах			+	
9.2	На берегу			+	
10	Вспомогательные объекты для обслуживания и ремонта				
10.1	При малом удалении от портопункта				
10.1.1	Бот	+		+	
10.2	При значительном удалении от порта				
10.2.1	Судно				
10.2.2	Самоподъемная платформа				
10.2.3	Катамаран				
10.2.4	Ледокол				
10.2.5	Судно с малой площадью ватерлинии				

* На одном корпусе.

** На разных корпусах.

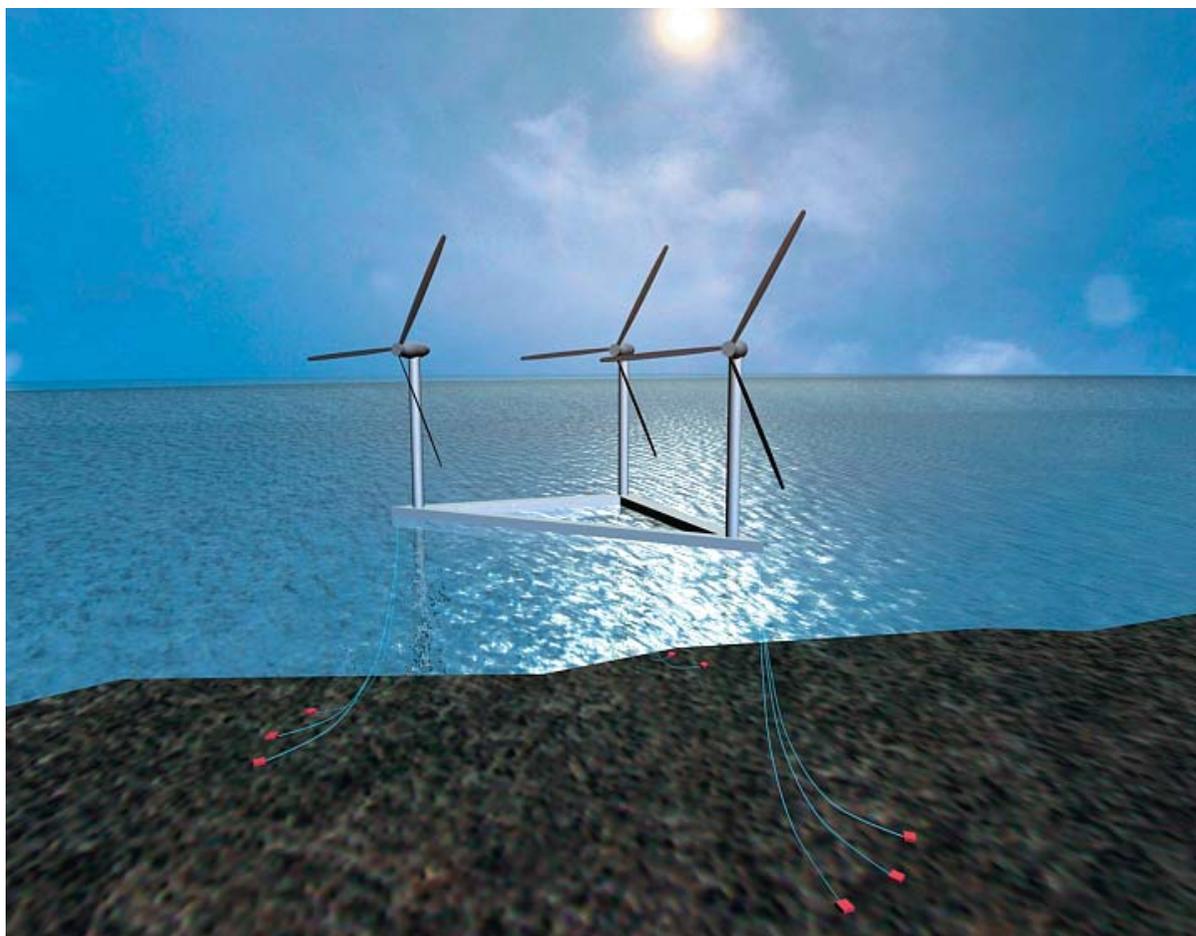


Рис. 4. МПЭС для внеледových районов

- определения воздействия этих комбинаций на су-ровое обледенение лопастей;
- оценки снижения производства энергии и уменьшения срока службы компонентов турбины;
- оценки требуемой мощности в зависимости от типа антиобледенительного устройства.

Анализ показал, что для решения этих проблем как для береговых, так и морских электростанций на ВИЭ требуется длительный мониторинг окружающей среды до установки станции.

Концептуальные проекты морских электростанций

В процессе исследований разработаны следующие варианты морских электростанций:

1. Большая ветровая электростанция для внеледových районов (рис. 4, табл. 11) различных архитектурно-конструктивных типов мощностью 15 МВт, отстоящая от берега примерно на 3 км на глубине приблизительно 50 м.

2. Модульная МПЭС для ледových районов (рис. 5), состоящая из проточного (энергия течений), волнового, ветроэнергетического блоков.

Установка проточного блока предпочтительна в устьях крупных рек на глубинах 5—25 м

с самостоятельной ориентацией на поток в процессе постановки. Генератор с лопастной машиной в насадке имеет положительную плавучесть и тросовую связь с донной якорной плитой.

Установка волнового блока предпочтительна в акватории с интенсивным волнением, с предусмотренным устройством временного вывода блока из эксплуатации в ледовый период. Блок имеет положительную плавучесть и состоит из корпуса, буй и направляющих стоек. Корпус связан с донной плитой кабель-тросом и удерживается в вертикальном положении. Буй является рабочим элементом, и его плавучесть при колебаниях на волнении используется для производства электроэнергии.

При гидравлическом принципе электрогенерации сила от движения буя передается в гидравлическую систему, которая обеспечивает постоянный поток воды (как рабочей жидкости) на турбину электрогенератора.

При индукционном принципе электрогенерации в бую размещены статор и упруго подвешенный магнитный ротор с резонансной частотой колебаний, превышающей частоту волнения моря, что позволяет значительно повысить скорость изменения магнитного поля в обмотках статора.

Таблица 11. Основные параметры морских электростанций

Параметр	Ветряная железобетонная стационарная	Ветряная стальная плавучая	Ветряная стальная на сваях	Дизельная плавучая
Длина длинной стороны, м	200	200		76
Высота борта/колонны, м	20	6		4,0
Ширина, м	135	10		20
Высота башни, м	70	70	137	—
Вес корпуса, т	90 000	1360	10 200	773
Вес башен, т	1400	1400	2700	—
Вес якорей и цепей, т	—	760	—	

Ветроэнергетический блок представляет собой лопастную машину в насадке диаметром около 2 м.

Оценка риска

При проектировании МПЭС осуществляется анализ риска аварийных ситуаций для типовых сценариев на основе качественных и количественных методов (построение деревьев отказов, матрицы риска и т. п.).

Проводятся оценки технических, экологических и экономических рисков, расчеты индивидуального и социального риска.

С учетом этих оценок разрабатывается комплекс мероприятий по снижению риска, предусматривается организация зоны безопасности (50—100 м) вокруг МПЭС с учетом разбрасывания кусков льда при обледенении, обозначение станции на навигационных картах, оснащение сигнальными огнями и т. д.

С учетом статистических данных по аварийности на ВЭУ, работающих в диапазоне мощности 0,5—2 МВт, при эксплуатации определены частоты возникновения аварийных ситуаций для наиболее характерных сценариев (табл. 12).

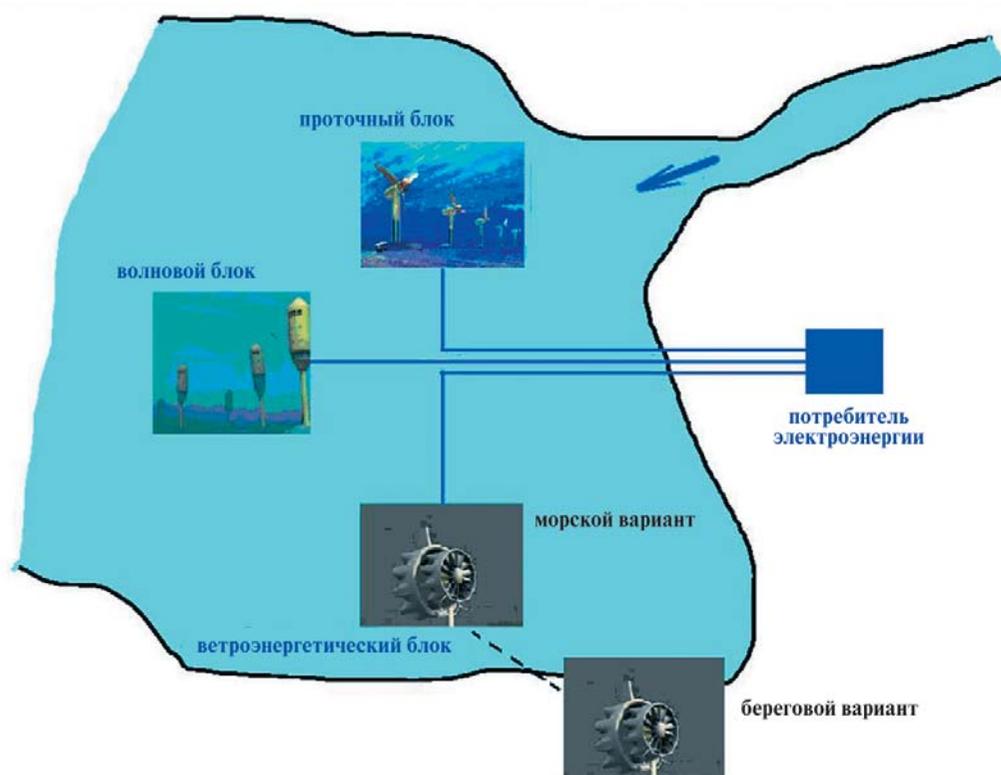


Рис. 5. Структурная схема малой модульной электростанции для ледовых районов

Таблица 12. Частоты для типовых сценариев аварийных ситуаций на ветряной электростанции

Типовой сценарий	Оценка частоты реализации
Потеря целой лопасти:	8,4·10 ⁻⁴
снижение номинальной скорости вращения	4,2·10 ⁻⁴
снижение номинальной скорости в два раза	5,0·10 ⁻⁶
Потеря конца лопасти	2,6·10 ⁻⁴
Падение всей гондолы к основанию башни	3,2·10 ⁻⁴
Падение ротора	1,3·10 ⁻⁴
Падение вниз небольших частей из гондолы	1,7·10 ⁻³

В табл. 13 рассмотрены потенциальные риски аварийных ситуаций, возможные причины их возникновения и вероятные последствия при эксплуатации МВЭС. Для волновой МПЭС также возможен риск повреждения буга и направляющих стоек (причины и последствия аналогичны повреждению корпуса МВЭС), а для проточной характерно попадание топляка и возможно столкновение со стамухой, приводящее к повреждению корпуса и якорной линии.

Учитывая изложенное, строительство в Арктике морских плавучих электростанций, фундаментов и башен стационарных морских и береговых электростанций, использующих возобновляемые источники энергии, а также вспомогательных судов для их транспортировки, установки, технического обслуживания и утилизации является одним из перспективных направлений отечественного судостроения.

Литература

1. Альтернативная энергетика: мировой рынок-2012: Аналитический обзор. — М.: РосБизнесКонсалтинг, 2012.
2. Концепция использования ветровой энергии в России / Под ред. П. П. Безруких. — М.: Книга-Пента, 2005. — 128 с.
3. Ветровая энергетика мира: Отчет за 2010 г. WWEA. — [Б. м.], 2011.
4. Гаврилов А. В. Типизация арктических шельфов по условия формирования мерзлых толщ // Криосфера Земли. — 2008. — Т. 12, № 3. — С. 69—79.
5. Горлов А. А. Бездна энергии: возобновляемая энергетика в зарубежных оборонных программах // ОСК. — 2012. — № 4. — С. 48—55.
6. Заявка на изобретение В63 В35/44 RU 2010146805 А от 18.11.2010 «Морская плавучая электростанция».
7. Концепция «Развитие энергетического комплекса НАО и повышение энергоэффективности региональной экономики». — Т. 1: Анализ энергетического комплекса НАО / ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис»». — Нарьян-Мар, 2010.

8. Минин В. А. Экономические аспекты развития возобновляемой энергетики малой мощности в удаленных поселениях на Кольском полуострове: Доклад объединения BELLON-2012. — Мурманск, 2012.

9. Обзор проектов ветроэлектростанций России — 2012 г. / Рос. ассоциация ветроиндустрии (RAWI). — [S. l.], 2012.

10. Сценарные условия развития электроэнергетики на период до 2030 года / Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике Министерства энергетики РФ. — М., 2011.

11. Транспортная стратегия Республики Саха (Якутия) до 2025 года.

12. Battisti L., Fedrizzi R., Brighenti A., Laakso T. Sea ice and icing risk for offshore wind turbines // Proceedings of the OWEMES 2006, 20—22 April, Civitavecchia — Italy. — [S. l.], 2006.

13. Braam H., Rademakers L. W. M. M. Guidelines on the Environmental Risk of Wind Turbines in the Netherlands. — [S. l.], Febr. 2004. — (ECN-RX-04-07).

14. The European offshore wind Industry-key trends and Statistics 2012 / European Wind Energy Association. — [S. l.], Jan. 2013.

15. ISO 12494:2001 Atmospheric icing of structures.

16. Scicb L. Building Plans for Offshore Wind Power Plants till the Year 2020 / Brodogradni. — 2011. — Vol. 62, № 2. — P. 188—192.

17. Skov H. Collision Risk and Barrier Effects of Wind Farms on Bird Migration // 12-й Петербургский международный форум ТЭК, 2012, сентябрь. — С. 300—305.

18. Timofeev O. Ya., Kartashev A. B., Trub M. S., Valdman N. A. Basic Parameters of Working Model of Floating Offshore Power Farm // 30th Intern. Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering Rotterdam, the Netherlands, June 19—24, 2011. — P. 729—737. — (Paper № OMAE2011-49923).

Таблица 13. Потенциальные риски, возможные причины их возникновения и последствия при эксплуатации МВЭС

Риск	Возможные причины возникновения	Возможные последствия
Повреждение корпуса	Скрытые заводские и монтажные дефекты. Навал судна обеспечения. Экстремальные гидрометеорологические и ледовые условия	Развитие интенсивной коррозии и деформации до образования трещин, разломов и полного разрушения корпуса. Повреждение и выход из строя отдельных систем и оборудования, расположенных в корпусе. Снижение производства электроэнергии. Чрезмерное наклонение и затопление корпуса. Затраты на демонтаж и ремонт. Транспортные расходы
Частичное или полное повреждение лопастей	Скрытые заводские и монтажные дефекты. Случайное попадание птиц в ротор. Экстремальные гидрометеорологические условия. Обледенение	Развитие деформации лопастей до образования трещин, разломов и полного разрушения ротора. Повреждение отдельных систем и оборудования, расположенных в гондоле. Снижение мощности производства электроэнергии до нуля. Затраты на демонтаж и ремонт. Транспортные расходы
Повреждение или падение поворотного механизма, редуктора, ротора или гондолы	Скрытые заводские и монтажные дефекты. Экстремальные гидрометеорологические условия. Обледенение. Низкое качество или отказ системы подачи смазочного масла. Попадание детали	Повреждение отдельных систем и оборудования до полного выхода из строя. Каскадное разрушение всех элементов. Снижение производства электроэнергии до нуля. Затраты на демонтаж и ремонт. Транспортные расходы
Повреждение/разрыв электрического кабеля	Скрытые заводские и монтажные дефекты. Экстремальные гидрометеорологические и ледовые условия. Повреждение изоляции электрического кабеля при внешнем воздействии	Снижение производства электроэнергии до нуля. Затраты на восстановительно-монтажные работы Разрыв связи с потребителем. Обрыв электрического кабеля. Прекращение подачи тока
Повреждение якорной линии	Скрытые заводские и монтажные дефекты. Экстремальные гидрометеорологические и ледовые условия	Уход с точки позиционирования. Бесконтрольный дрейф. Затраты на восстановительно-монтажные работы
Пожар	Короткое замыкание. Нештатное трение движущихся частей внутри гондолы. Утечка смазочного масла. Удар молнии	Повреждение конструкций и оборудования до полного разрушения. Затраты на восстановительные, ремонтные и монтажные работы