УДК 621.311.24

Вопросы проектирования и научного обоснования морских ветроэлектрических станций

Елистратов В.В. [1] ***, Большев А.С.*** [1]***, , Мегрецкий К.В.*** [2]

[1] – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д.29, ИСИ; [2] – ОАО «ЦКБ МТ Рубин», ул. Марата д.90

1 Введение

Отличительной чертой развития энергетического потенциала ведущих мировых держав в последних десятилетиях является ввод большого числа новых ветроэнергетических установок. К 2014 году установленная мощность сетевых ветроэлектростанций (ВЭС) в мире превысила 318 ГВт [1] а ежегодный прирост мощностей за последнее десятилетие составляет 25-35%. Одновременно очень активно развивается сектор строительства ВЭС морского базирования (оффшорные ВЭС). К концу 2012 года общая установленная мощность оффшорных ветростанций составила 5416 МВт, из которых 1903 МВт были установлены в 2012 году, т.е прирост мощности составил 35% [2]. Объем рынка ветроэнергетики составляет свыше 70 млрд. Евро.

В настоящее время отмечается и расширяется интерес к созданию ветроэлектрических установок (ВЭУ) морского базирования на подвижном плавучем основании: проектируются и вводятся в эксплуатацию пилотные установки морских плавучих ветроэлектрических установок. Лидером по созданию таких ВЭУ является Великобритания (рис. 1,а). В Японии, особенно после аварии на АЭС Фукусима и отказа от развития атомной энергетики, принята Программа развития возобновляемых источников энергии, в том числе ветроэнергетики морского базирования. Уже создана фирмой «Хитачи» ВЭУ на плавучей платформе (рис. 1,б) мощностью 2 МВт. Диаметр ротора агрегата составляет 80 м, высота башни 65 м, высота плавучего основания 32 м. Однако следует отметить, что данные примеры относятся к регионам, где нет сурового климата и плавучего и дрейфующего льда.

Интерес к морским плавучим ветроэлектрическим электрическим станциям (МПВЭС) использующих энергию ветра проявляется практически во всех промышленно развитых странах. Одним из главных преимуществ реализации российских ВЭС морского базирования, является осуществляемая с их помощью возможность использования высокого ветрового потенциала морей примыкающих к российской территории. Общая протяженность границ Российской Федерации составляет 60 932 км. Из них морские границы России составляют 38 807 км. Причем суммарная протяжённость побережья Северного Ледовитого

и Тихого океана и их морей составляет около 37 тысяч км, большая часть этого побережья находится в суровых климатических условиях.

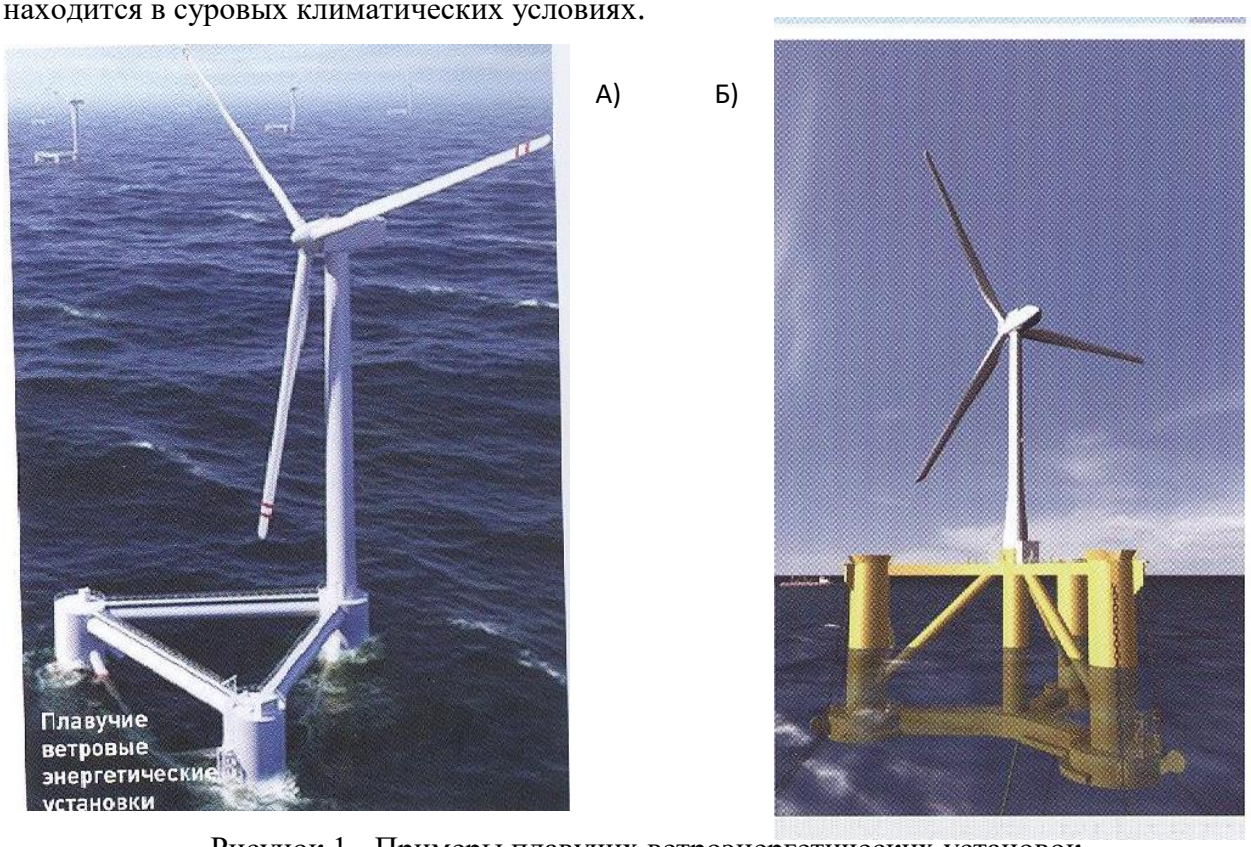


Рисунок 1 - Примеры плавучих ветроэнергетических установок

Подавляющее большинство указанных прибрежных территорий находятся в условиях децентрализованного энергоснабжения, и зависит от поставок дизельного топлива (Северный завоз) [3]. МПВЭС могут быть доставлены и установлены в прибрежной зоне территории России для децентрализованного энергоснабжения существующих потребителей, а также для развития производственно-транспортной инфраструктуры, обеспечивающей развитие Северного морского пути.

Создание нового класса морских объектов – МПВЭС, адаптированных к суровым климатическим условиям, обусловлено преимуществами систем энергоснабжения, характерных именно для этих объектов.

Оффшорные ВЭУ различаются в зависимости от способа установки и строения фундамента и основания. На рис. 2 приведены конструкции опорных фундаментов оффшорных ВЭУ, располагаемых на дне мелководного шельфа. В отличие от таких конструкций ВЭУ, МПВЭС располагаются на плавающем основании (фундаменте), соединяемом с дном системой заякорения.

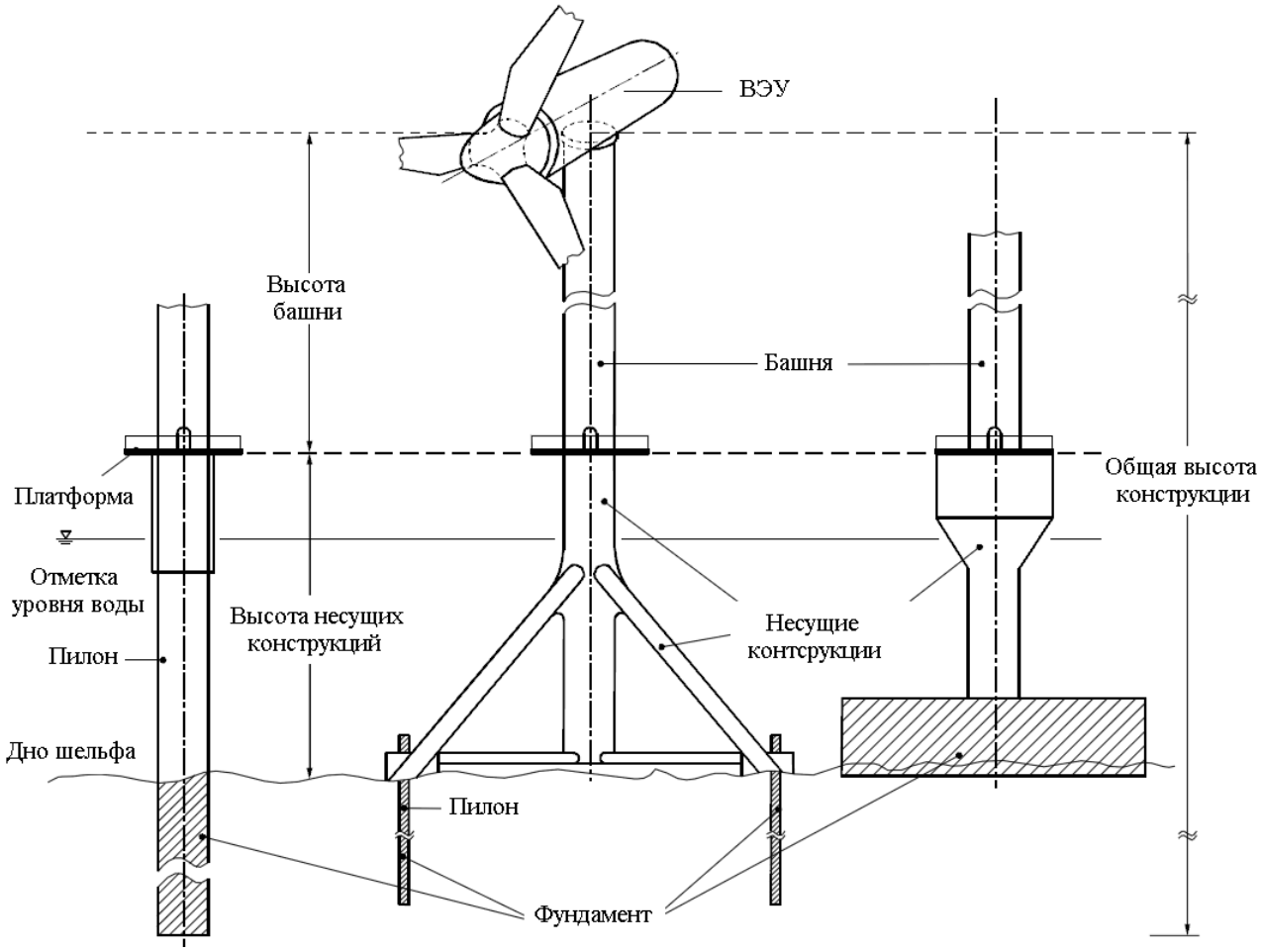


Рисунок 2 – Конструкции офшорных опорных фундаментов

В настоящее время уже существует мировой опыт по реализации проектов МПВЭС. За последние пять лет реализованы ряд пилотных проектов в США (FindFloat, PelaStar), Японии (Sasebo, Shimizu, MitsuiShipbuilding, Fukusima), Великобритании (Xathus Energy Ocean Breeze), Норвегии (Hywind, Sway,WindSea), Нидерландах (Blue H, Gusto MSC Trifloater, Plagic Power), Швеции (Hexicon,Sea Twirl), Германии (Gicon), Франции (Winflo, Diwet), Дании (Poseidon) и др. Однако эти проекты были реализованы для незамерзающих морей, что означает практически полное отсутствие опыта реализации МПВЭС в ледовых условиях.

Таким образом, создание в России проекта первой МПВЭС является пилотным проектом, позволяющим российской ветроэнергетике приобрести уникальный опыт проектирования и эксплуатации сооружения в сложных природно-климатических условиях северных и восточных морей РФ.

При создании ВЭС морского базирования со стационарными, опирающимися на дно основаниями, как правило, используются несущие основания, апробированные ранее при проектировании разнообразных морских объектов. При малых глубинах моря (от 5 до 20 м) наиболее простой конструкцией опоры для ВЭУ является опора типа «Monopile»,

представляющая собой вертикально забитую стальную сваю, к верхней части которой крепится башня установки. Рост мощности ветрогенераторов и связанное с этим увеличение весовых и ветровых нагрузок приводит к необходимости усложнение конструкции стационарных оснований ВЭС. В этой связи фирмы, реализующие проекты оффшорных парков ветрогенераторов при малых глубинах моря, предлагают в основном три типа конструкций стационарных опор [4]: опора типа «Tripile», состоящая из трех вертикальных свай-колонн, возвышающихся над уровнем моря, и устанавливаемой на них переходной части, соединяющей сваи-колонны с башней ВЭУ; опора типа «Tripod», состоящая из центральной колонны, соединенной со свайными стаканами наклонными радиальными связями; опора типа «Jacket», представляющая из себя ферменную конструкцию, также фиксируемая на грунте сваями.

При глубинах моря свыше 30-40 метров создание стационарных оснований приводит к существенному возрастанию их стоимости и сопряжено с рядом технических проблем. По этой причине на глубинах моря свыше 50 м, как правило, предлагается использовать плавучие основания ВЭУ.

Техническая идеология плавучих оснований ВЭС опирается на многолетний опыт проектирования морских платформ [5]. В этой связи обычно в качестве плавучих оснований ВЭУ предлагаются полупогружные основания, основания типа SPAR и TLP .

Основания типа SPAR устанавливаются обычно на больших глубинах (более 100 -200 м). Они представляют собой длинный цилиндр с якорной системой закрепления. Корпус сохраняет остойчивость даже в случае обрыва связей системы удержания. Такая форма позволяет уменьшить размеры сооружения в районе ватерлинии и, тем самым, снизить волновые и ледовые нагрузки. Примером подобного основания может служить проект Hywind (рис. 3), который был реализован норвежской компанией StatOil в сентябре 2009 г. Плавучая часть имеет вид стометрового цилиндра диаметром около 6 м. Эта конструкция была заякорена на дне на расстоянии 12 км от норвежского берега с использованием трех тросов на глубине 200м. В этом месте море имеет глубину около 200 м. В составе ВЭС использовалась стандартная ветротурбина типа Siemens SWT-2.3-82 с мощностью 2.3 МВт.

Основания типа TLP предназначены для установки на больших глубинах (более 100м) и состоят из водоизмещающего корпуса, удерживаемого системой вертикальных предварительно натянутых якорных связей. Водоизмещающий объём, обеспечивающий плавучесть сооружения, представлен обычно вертикальными цилиндрами большого диаметра, соединенными между собой горизонтальными водоизмещающими элементами. Натяжение якорных связей осуществляется путем дебалластировки водоизмещающих объёмов. Основным недостатком таких оснований является потеря их остойчивости при

обрыве связей. Наличие ледовых нагрузок на подобные основания приводит к необходимости добавления наклонных предварительно натянутых связей, что становится причиной удорожания конструкции. Примером основания типа TLP является конструкция Blue H, прототип которой был установлен у берегов Италии на глубине 113 м (рис. 4) в 2007 г.



Рисунок 3 – МПВЭС проекта Hywind

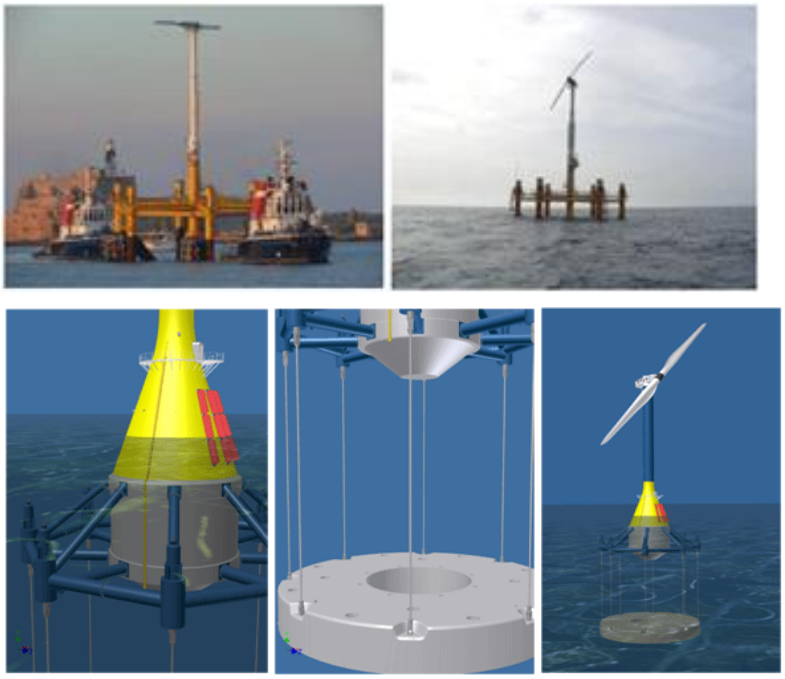


Рисунок 4 - Конструкция плавучего основания МПВЭС Blue H

Основным элементом МПВЭС, располагаемым на плавучем основании является ВЭУ, как правило, горизонтально-осевого типа в составе: ветроколесо (ротор) с тремя лопастями аэродинамического профиля, поворотная гондола, в которой размещены генератор, редуктор, автоматические системы контроля параметров ВЭУ и ориентации на ветер (рис. 5). Всё это устанавливается на металлической башне, состоящей из нескольких секций.

Компоновочные решения определяются расположением оборудования в гондоле, типом генератора. Различают два основных типа современных ВЭУ: редукторные (соединение ротора с генератором через редуктор) и безредукторные (с прямым соединением ветроколеса и генератора).

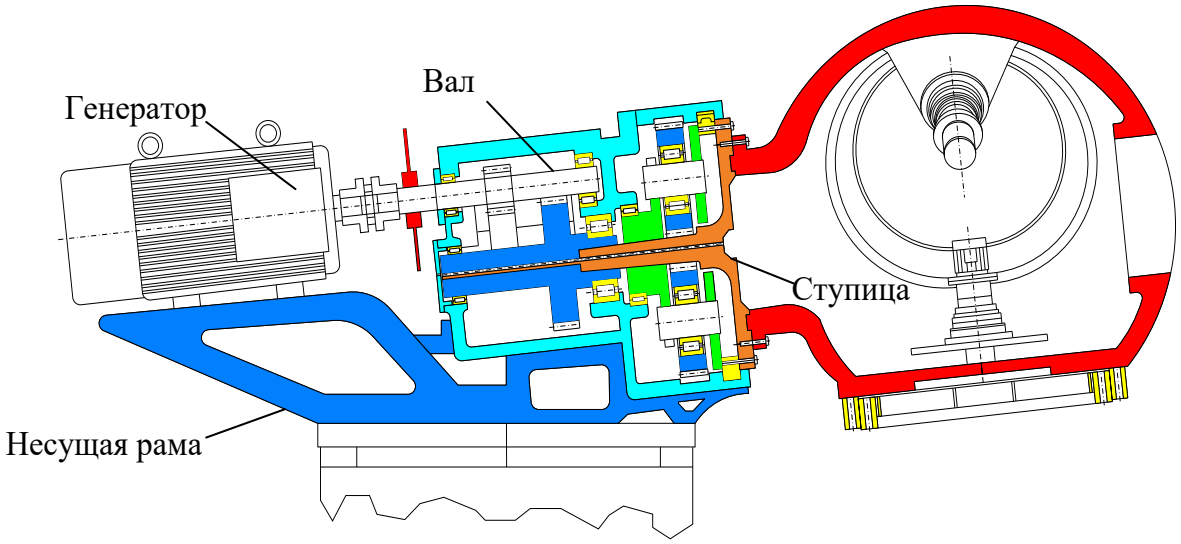


Рисунок 5 - Компановка гондолы ВЭУ

На рынке ветрогенераторов широко представлены модели ВЭУ различных мощностей и конфигураций от разных производителей, которые в случае адаптации к северным условиям могут быть использованы для МПВЭС.

2 Ветроэнергетические ресурсы в оффшорной зоне России

Для эффективного использования ветровой энергии в конкретном регионе с целью систематизации ветровых характеристик в приземном и пограничном слоях необходимо создание ветроэнергетических кадастров и атласов.

В 1997 г. были изданы «Атласы ветрового и солнечного климатов России» (М.М. Борисенко, В.В. Стадник, 1997), где по данным наблюдений более 1100 станций метеорологической сети России был создан Атлас ветрового климата, в котором приведены карты всего комплекса характеристик ветрового режима и расчетных показателей. В «Атласе ветров России» [6], изданном в 2000 г. приводятся региональные значения ветроэнергетического потенциала для 5 высотных уровней (10, 30, 50, 100, 200 м) и карты средней скорости ветра и средней удельной мощности ветрового потока для высоты 50 м, наиболее важной на тот момент для энергетики. Разработанный в 2008 г. «Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России» [7] дополняет и уточняет данные метеорологических наблюдений базой данных аэрологических измерений.

На рис. 6 представлена карта районирования России по удельной мощности ветрового потока на уровне 100 м, выполненная М.М. Борисенко [8].

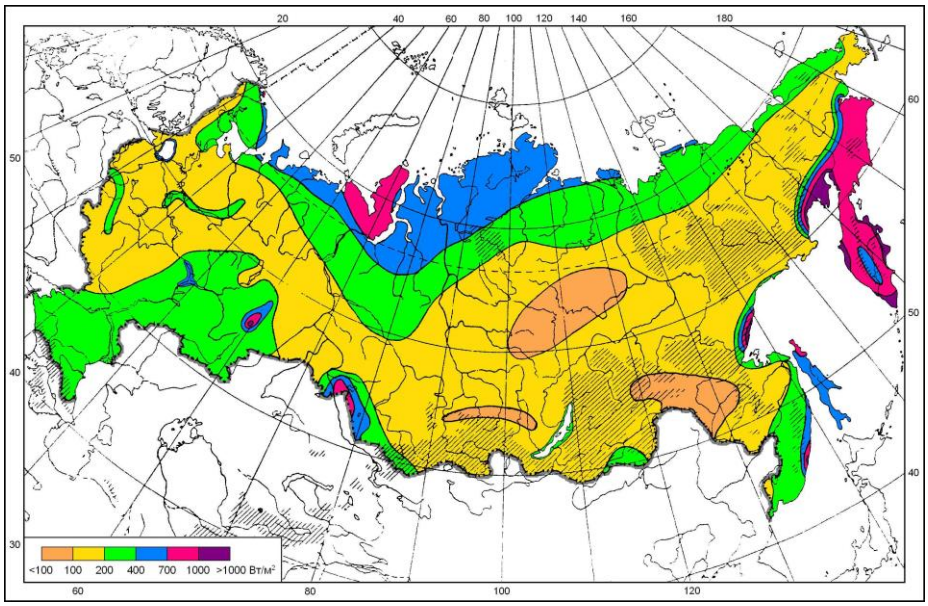


Рисунок 6 - Районирование России по значениям удельной мощности ветрового потока на высоте 100 *м, Вт/м*^{2}

Общепризнанный справочник по оценкам ресурсов ВИЭ в России под редакцией Безруких П.П.[9] дает следующие оценки ветровых ресурсов: валовый потенциал - 80 х 10^{15} кВт-ч в год, технический – 6.2х10^{15} кВт-ч в год, экономический 31-10^{12} кВт-ч в год . Региональный анализ ресурсов показывает, что около 38% сосредоточено в Европейской части, около 30% сконцентрировано на Дальнем Востоке, около 16% в Западной Сибири и около 16% в Восточной Сибири.

Как видно из представленной карты, наибольшим ветроэнергетическим потенциалом обладают районы вдоль берегов Карского, Берингова и Охотского морей, где наиболее эффективно создавать системы автономного энергоснабжения на основе ветродизельных энергокомплексов. Оценки оффшорных ветроэнергетических ресурсов России составляет около 23 х 10^{12}кВт-ч в год.

Для проверки значений ветроэнергетических ресурсов оффшорных территорий РФ в СПбГПУ (ассистент Дюльдин М.В., зав. УНЛ Столяров Н.В.) был выполнен анализ карт ветроэнергетического потенциала данных территорий с использованием интернет-сервиса Vortex. Данный сервис предоставляет возможность получения данных мезомасштабного метеорологического моделирования с разрешением 3х3 км на высоте 80 м основанных на данных реанализа погодной модели NCEP CFSR (Climate Forecast System Reanalysis). Анализ карт сервиса Vortex (рис.7) подтверждает наличие наибольших ветроэнергетических ресурсов в центральной части Охотского моря, восточного побережья Камчатки, Курил и Сахалина, а также южной части Баренцева моря.

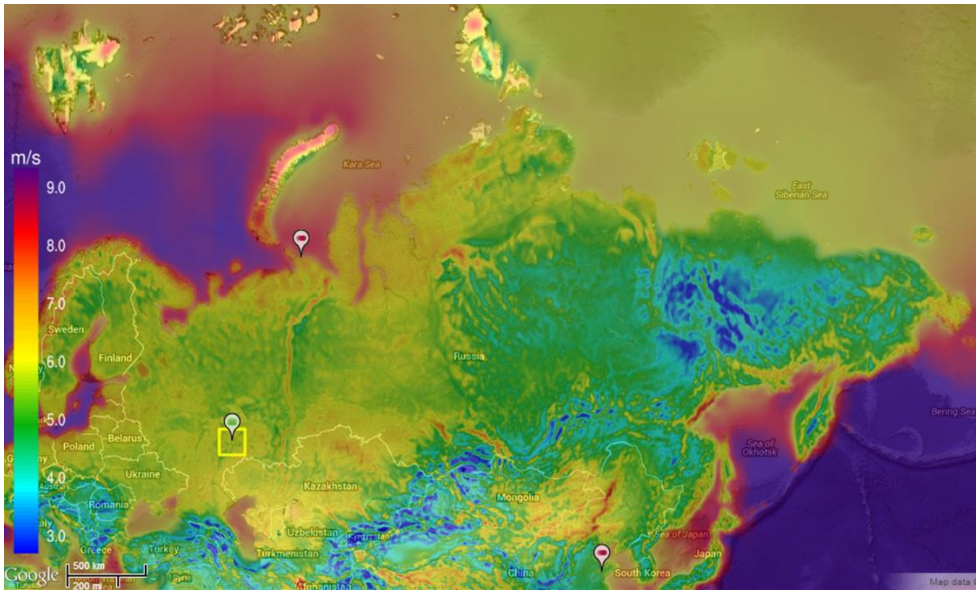


Рисунок 7 - Распределение скоростей ветра над территорией России на высоте 10 м. над поверхностью земли по данным Vortex.

Для построения карт ветропотенциала оффшорных районов перспективных с точки зрения ветроэнергетики морей был использован программный комплекс WindPRO а также данные скорости ветра на высоте 50 м реанализа CFSR. На рис. 8 в качестве примера приведена карта ветроэнергетического потенциала прибрежной части Баренцева и Белого морей. В каждом море были выбраны точки с наибольшим значением удельных ветроэнергетических ресурсов, на основании которых построены изолинии ветроэнергетических ресурсов на высоте 50 м

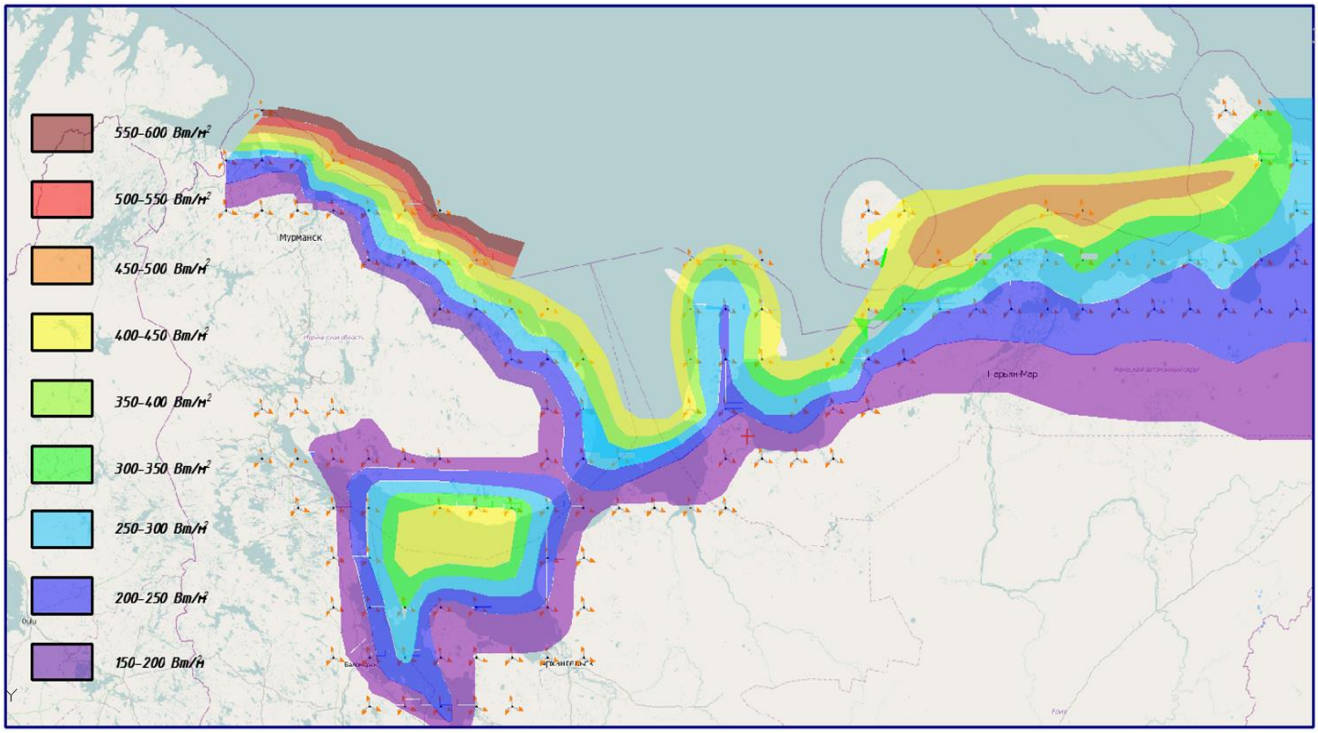


Рисунок 8 - Ветроэнергетические ресурсы в прибрежной зоне Белого и Баренцева морей на высоте 50 *м*

3 Вопросы создания МПВЭС и особенности их конструирования

Создание МПВЭС сопряжено с рядом технических сложностей, которые необходимо преодолеть на пути от их проектирования до эксплуатации.

Одна из главных сложностей, возникающая при создании подобных объектов – это минимизация металлоемкости конструкции при сохранении её прочности и остойчивости.

Сложной технической проблемой для МПВЭС является также поиск варианта конструкции, обеспечивающей оптимальное сочетание экстремальных нагрузок от воздействия внешних факторов. Поиск оптимальной конструкции обычно сводится к выбору топологических форм корпуса, назначению основных размеров и созданию системы удержания для обеспечения примерно равного отклика конструкции на внешние воздействия разного происхождения или на различные сочетания воздействий.

Еще одной сложностью, связанной с проектированием и эксплуатацией МПВЭС, является минимизация ущерба, связанного с качкой и вибрацией объекта. В случае МПВЭС должны приниматься во внимание следующие опасные частотные области: диапазон частот морского волнения, ветра, ледового воздействия и область частот, связанных с вращением лопастей и самого ветроколеса.

Отдельная сложность, характерная в большей степени для реализации МПВЭС в условиях российских морей – это проблема транспортировки энергии от МПВЭС на берег. Существующие проекты МПВЭС создавались для условий незамерзающих морских акваторий. В этом случае энергетический кабель может быть проложен по морскому дну и доведен до потребителей на суше. В условиях России подавляющая часть морей в зимний период замерзает.

Еще одна сложность, связанная с установкой МПВЭС, является обеспечение безопасности при буксировке МПЭС к месту эксплуатации. В транспортном положении МПВЭС особенно уязвима ввиду значительной вертикальной отметки размещения ВЭУ, высокого положения центра тяжести, отсутствия системы удержания и т.п.

3.1 Вопросы выбора оборудования и конструкций ВЭУ для МПВЭС

При проектировании и выборе ВЭУ в составе МПВЭС необходимо рассмотреть все наиболее характерные расчётные случаи и сочетания нагрузок, которые могут возникнуть в ходе жизненного цикла эксплуатации ВЭУ. При проектировании ВЭУ рассмотрены следующие расчётные случаи:

- штатная работа ВЭУ, в ходе которой возникают нормальные или экстремальные параметры ветрового потока;
- аварийная работа ВЭУ;
- транспортировка, монтаж и техническое обслуживание.

При этом к конструкции ВЭУ во всех расчётных случаях предъявляются требования по: статической прочности и остойчивости плавучего основания при воздействии на элементы ВЭУ предельных нагрузок; выносливости элементов ВЭУ, при котором нагрузки задаются как функции от времени; жёсткости конструкции ВЭУ, т. е. обеспечение таких перемещений её элементов, при которых собственные частоты (СЧ) колебаний ВЭУ и её элементов находились бы вне зоны резонанса конструкции.

Для анализа и обобщения внешних условий, влияющих на установку и эксплуатацию МПВЭС были выбраны прибрежные районы Карского, Баренцева и Охотского морей, где развитие энергетической инфраструктуры особенно актуально в связи с обеспечением реализации крупных проектов освоения минерально-сырьевых ресурсов российского континентального шельфа.

3.2 Конструирование и компоновочные решения МПВЭС

При конструировании МПВЭС необходимо рассматривать множество аспектов: внешние условия в точке установки (волна, лед, течение, температура воздуха и т.д.); ветровой потенциал в точке установки; глубина места в точке установки; дальность от берега; грунты на дне в месте установки; тип ВЭУ; единичная мощность ВЭУ; одноагрегатная или многоагрегатная МПВЭС.

Внешние условия определяют, в основном, облик опорного основания. Вес самой ВЭУ сравнительно невелик, но опорное основание должно выдерживать не только вес ВЭУ, но и внешние воздействия. Одни из самых существенных нагрузок, отличающих МПВЭС для северных условий от обычных – ледовые нагрузки. Опорное основание должно не только выдерживать ледовые нагрузки, но и передавать их на якорную систему удержания (ЯСУ), обеспечивая при этом собственную жесткость и прочность. Для противодействия опрокидывающему моменту от ледовых нагрузок необходимо иметь соответствующие плечи, которые определяются габаритами опорного основания.

Ветровой потенциал в точке установки напрямую влияет на выработку электроэнергии. Ветровой потенциал морского шельфа, как правило, выше ветрового потенциала на суше.

Глубина места в точке установки также влияет на облик МПВЭС. При больших глубинах можно использовать опорные основания типа SPAR и TLP.

Для глубин менее 40 метров рассматривать плавучие основания МПВЭС нецелесообразно, так как они имеют большую металлоемкость по сравнению со стационарными оффшорными ВЭС и значительно более худшие показатели стойкости к волновым и ледовым воздействиям.

Дальность от берега также влияет на стоимость МПВЭС, зависящей от подводного кабеля и его укладки. Кроме того чем ближе МПВЭС к берегу, тем дешевле обходится его обслуживание.

Грунты на дне в месте установки определяют тип и стоимость якорей МПВЭС. Для скальных грунтов могут применяться гравитационные якоря. Они достаточно просты в изготовлении, но достаточно материаллоемки и требуют мощного транспортного и грузоподъемного оборудования на точке установки. Для других видов грунтов могут применяться пенетрационные, свайные, комбинированные якоря.

На МПВЭС могут применяться горизонтально осевые ВЭУ (ГОВЭУ) и вертикально осевые ВЭУ (ВОВЭУ). Горизонтальноосевые ВЭУ в настоящее время наиболее распространены. Подавляющее большинство (98%) ВЭС, в том числе оффшорного и плавучего исполнения используют ГОВЭУ. Горизонтальноосевые ВЭУ лучше отработаны технически и технологически, выпускаются серийно и имеют широкую линейку установленных мощностей. Но направление ветра постоянно изменяется и, в силу большой инерции, ВЭУ постоянно запаздывает, а общее количество выработанной электроэнергии уменьшается.

Вертикальноосевая ВЭУ лишена этого недостатка, однако коэффициент использования энергии ветра у ВОВЭУ значительно ниже, чем у ГОВЭУ, поэтому общее количество выработанной электроэнергии за год будет все равно ниже, чем у ГОВЭУ. По конструкции ВОВЭУ проще чем ГОВЭУ. Лопасти ВОВЭУ не имеют системы установки оптимального угла атаки и установлены жестко. Вместе с отсутствием системы ориентации на ветер это упрощает управляющую систему гидравлики. Основные и наиболее тяжелые агрегаты, такие как электрогенератор и повышающий редуктор расположены в опорном основании и всегда доступны для обслуживания. Однако несмотря на эти некоторые преимущества практически нет серийно выпускаемых ВОВЭУ для МПВЭС.

Мощность МПВЭС является очень важным показателем. МПВЭС можно проектировать на полную установленную мощность с использованием одной ВЭ, может быть рассмотрен вариант МПВЭС и с несколькими агрегатами меньшей мощности.

Однако, расположение на одном опорном основании нескольких ВЭУ может привести к увеличению размеров и массы такого основания, так как известно, что расстояние между осями ВЭУ рекомендуется выбирать в диапазоне от 5 до 10 диаметров ротора, в целях

исключения взаимного влияния ГОВЭУ друг на друга при их работе. Для ВЭУ установленной мощности 1,5 – 2 МВт это расстояние может составлять до 400 метров.

3.3 Установка плавучего основания

Плавучее основание МПВЭС в высокой степени заводской готовности устанавливается на акватории в расчётной точке. В расчетной точке устанавливаются ЯСУ и прокладывается по дну статическая (постоянно лежащая на дне) часть подводного кабеля от МПВЭС к потребителю.

Для МПВЭС, в зависимости от внешних нагрузок, применяются либо предварительно натянутые вертикальные якорные связи, либо провисающие якорные связи. Связи представляют собой цепи или стальные тросы или сочетание «цепь – трос».

Установка МПВЭС с полупогружным типом опорного основания осуществляется методом, хорошо отработанным на установке аналогичных нефтегазовых сооружений. Морская плавучая ВЭС принимает водяной балласт и погружается по необходимую ватерлинию. Заранее установленную ЯСУ с помощью вспомогательных судов присоединяют к корпусу МПВЭС. После чего откачивают водяной балласт, обеспечивая МПВЭС рабочую ватерлинию и необходимое натяжение якорных связей.

4 Расчётные обоснования

4.1 Внешние нагрузки на морскую плавучую ветроэлектрическую станцию

Анализ внешних нагрузок на МПВЭС предусматривает учет воздействия ветра, волнения, течения и льда. Оценка работоспособности МПВЭС связана с изучением ее поведения при различных сочетаниях внешних воздействий. Обычно подобное исследование оказывается достаточно трудоемким и включает в себя реализацию несколько сотен расчётных случаев. В этих условиях для обеспечения процесса проектирования целесообразно опираться только на использование апробированных программных средств, позволяющих быстро выполнять необходимые расчеты внешних нагрузок. В качестве расчётного инструмента может использоваться программный комплекс "Anchored Structures" (Сертификат Российского Морского Регистра Судоходства №12.00874.314 от 20.03.12), разработанный в инженерно-строительном институте СПбГПУ [11].

При определении волновых нагрузок на опорное основание ВЭС используются модели волн малой или конечной высоты, реализуемые в ПК "Anchored Structures" [12]. Для ферменных опорных оснований или для оснований, состоящих из конструктивных элементов, имеющих линейные размеры значительно меньше длины набегающих волн,

нагрузки от волнения и течения в данном программном комплексе вычисляются с помощью формулы Мориссона [4].

При расчете волновых нагрузок на опорные основания ВЭС, сравнимые с длиной набегающих волн, в ПК "Anchored Structures" используется численная реализация широко известного метода гидродинамических особенностей – метод пространственных источников излучения. Данный метод основан на получении набегающего и отраженного потенциалов волнения, интегрировании результирующих давлений жидкости по смоченной поверхности сооружения и вычисления, таким образом, сил и моментов от волнения.

Расчет сил и моментов от течения на большие опорные основания ВЭС предполагает наличие априорных сведений о площади подводной парусности объекта, сопротивлении при обтекании сооружения под различными углами и реализуется в программном комплексе по известным методологиям [12].

Нагрузки от ветра на ВЭУ вычисляются по методике [13] и затем адаптируются к использованию в ПК "Anchored Structures" путем определения эквивалентных значений площади парусности надводной части МПВЭС и эквивалентного аэродинамического коэффициента сопротивления в различных режимах функционирования МПВЭС.

Ледовые нагрузки на опорное основание ВЭС вычисляются в ПК "Anchored Structures". При этом моделируется воздействие ровных или торосистых льдов на прямостенные, цилиндрические, наклонные или конусные преграды с использованием квазистатических методик, представленных в СНиП 2.06.04-82*, СП38.13330.2012, ISO-19906 [14,15,16]. Реализация динамического расчёта ледовых нагрузок с помощью численного подхода также выполняется в ПК "Anchored Structures" с использованием авторской методологии [17].

Таким образом, все внешние нагрузки, действующие на МПВЭС, вычисляются с помощью возможностей единого программного комплекса, в котором в дальнейшем выполняется моделирование поведение МПВЭС под действием этих нагрузок.

4.2 Моделирование поведения МПВЭС под действием внешних нагрузок

Моделирование поведения МПВЭС под действием внешних нагрузок реализуется в ПК "Anchored Structures". При этом моделирование выполняется во временной области путем решения системы нелинейных дифференциальных уравнений движения объекта в шести степенях свободы с помощью стандартных методов численного интегрирования:

$$(\boldsymbol{M}+\lambda)\ddot{X}_c + B\dot{\boldsymbol{X}}_c + C_d\dot{\boldsymbol{X}}_c\left|\dot{\boldsymbol{X}}_c\right| + C_v(\boldsymbol{X_c}) + \boldsymbol{F_R}(\boldsymbol{X_c}) = \boldsymbol{F_{wave}} + \boldsymbol{F_{df}} + \boldsymbol{F_{wind}} + \boldsymbol{F_{cur}} + \boldsymbol{F_{ice}} \quad (4)$$

где $\boldsymbol{M}$ – расширенная матрица масс и моментов инерции МПВЭС; B – расширенная матрица волновых коэффициентов сопротивления МПВЭС; $\boldsymbol{X_c}$ – вектор положения корпуса МПВЭС; C_d – диагональная матрица приведенных вязкостных коэффициентов сопротивления МПВЭС; λ – матрица присоединенных масс и моментов инерции МПВЭС, вычисляемая в в ПК "Anchored Structures"; $C_v(\boldsymbol{X_c})$ – вектор восстанавливающих сил; $\boldsymbol{F_R}$ - вектор реакции системы удержания МПВЭС; $\boldsymbol{F_{wave}}$, $\boldsymbol{F_{df}}$, $\boldsymbol{F_{wind}}$, $\boldsymbol{F_{cur}}$, $\boldsymbol{F_{ice}}$ - расширенные вектора сил соответственно волнения, волнового дрейфа, ветра, течения и ледовой нагрузки, вычисляемые в ПК "Anchored Structures".

Практическая реализация процедуры исследования основанного на численном расчете внешних нагрузок на МПВЭС и математическом моделировании поведения МПВЭС приводит к созданию конструкций, для которых воздействия волнения и льдов примерно равновелики. Такой эффект достигается путем уменьшения водоизмещения опорного основания для минимизации волновых воздействий и ограничения характерных размеров или формы сооружения на уровне ватерлинии для снижения ледовых сил. Пример подобной конструкции с конусным ледостойким воротником на уровне ватерлинии представлен на рис.9.

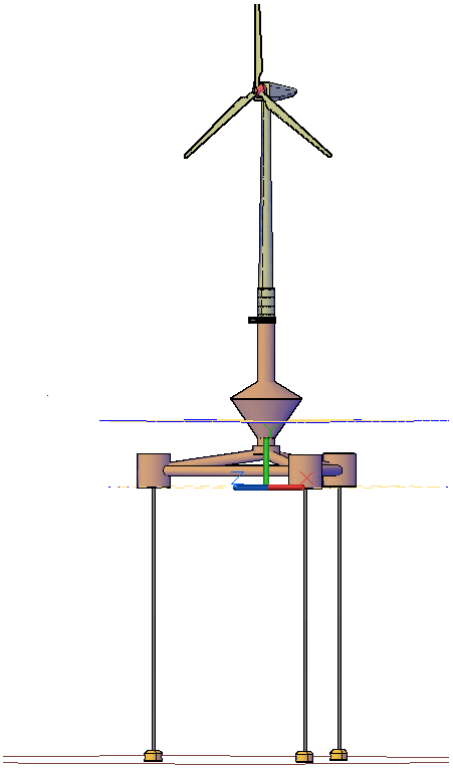


Рисунок 9 – Модель ледостойкого основания МПВЭС

4.3 Прочность элементов конструкции

Типы опорных оснований МПВЭС для ледовых условий мало отличаются от опорных оснований морских плавучих нефтегазовых сооружений. Как для нефтегазовых сооружений, так и для МПВЭС существуют опорные основания типа SPAR, TLP, полупогружные опорные основания.

С учётом этого, и в связи с отсутствием в настоящее время специализированных российских нормативных документов для МПВЭС, на корпус и корпусные конструкции сооружения могут распространяться требования по безопасности и прочности, изложенные в «Правилах классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ» Российского морского регистра судоходства (РМРС) далее Правила.

Поскольку эксплуатация МПВЭС не требует постоянного присутствия обслуживающего персонала, то эти требования по безопасности и прочности можно считать достаточно консервативными. При расчетных оценках рассматриваются наихудшие сочетания внешних нагрузок, при которых возможны возникновения наибольших напряжений в конструкции.

Наряду с этими требованиями проектирование, анализ, уточнения и дополнения должны включать следующие основные проектные действия: использования природных параметров (волнения, течения, ветра), заданных в ТЗ; определение сочетаний возможных природных воздействий на объект; определение глобальных волновых, ветровых и ледовых нагрузок, необходимых для проверки общей прочности корпуса объекта; определение экстремальных локальных волновых и ледовых нагрузок для проверки местной прочности элементов корпуса объекта; определение циклических глобальных, волновых, ветровых и ледовых нагрузок, для проверки усталостной прочности опорных связей и элементов конструкции корпуса объекта в районе их установки; определение циклических локальных волновых и ледовых нагрузок для проверки местной усталостной прочности элементов корпуса объекта; определение и оценка допустимых параметров вибрации конструктивных элементов корпуса объекта при взаимодействии сооружения со льдом.

Определение напряженно-деформированного состояния опорного основания МПВЭС при различных случаях нагружения производится методом конечных элементов (МКЭ) при помощи специализированного программного обеспечения.

5 Общие выводы

Анализ вопросов связанных с созданием и научным обоснованием ветроэнергетических станций морского базирования показывает:

- стремительное развитие парка ветроэнергетических установок наземного и морского базирования во всех ведущих индустриальных державах мира;
- гигантский ветроэнергетический потенциал, которым обладает Россия, до сих пор практически не используется;
- наибольшую актуальность для российских условий имеют мобильные (плавучие) ветроэлектрические станции для условий децентрализованного снабжения оффшорной зоны Арктики и береговой линии Северного морского пути;
- анализ мирового опыта проектирования офшорных, в том числе плавучих ВЭС, позволяет указать основные схемы конструктивного исполнения ВЭУ, а также реалистичные варианты подготовки основания и фундаментов таких ВЭС;
- для практического строительства ВЭС морского базирования необходимо развитие отечественной нормативной базы, в рамках системы Правил Российского Морского регистра судоходства;
- разработанная авторами методология расчета поведения МПВЭС в различных условиях эксплуатации под действием разнообразных сочетаний внешних воздействий, в том числе ледовых, может являться основой для обеспечения проектирования надежных и безопасных конструкций.

Список использованных источников

1. Half-year report The World Wind Energy Association. WWEA 2014. www.wwindea.org
2. Report 2012 The World Wind Energy Association. WWEA 2013. www.wwindea.org
3. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. Изд 2-е доп – СПб, Наука, 2013, 308 с
4. А.С. Большев, С.А. Фролов, В.А. Чернецов, В.В. Купреев. Вопросы проектирования опорных конструкций для морских ветрогенераторов Журнал «Гидротехническое строительство» , №5, М., 2007 г. с. 31-36.
5. А.С. Большев, К.Н. Шхинек, Т.В. Филиповская/ Гидротехнические сооружения на континентальном шельфе России Журнал «Гидротехника.XXI век» №4 (16) 2013 г., с.48-56.
6. Безруких П.П., Ландберг Л., Старков А.Н., Борисенко М.М. Атлас ветров России. Russian Wind Atlas. — М.: Можайск; Терра, 2000. — 560 с.
7. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. — М., 2008. — 584 с.
8. Елистратов В.В., Борисенко М.М., Сидоренко Г.И. и др. Климатические факторы возобновляемых источников энергии. — СПб.: Наука, 2010. — 235 с.

9. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива / показатели по территориям/Безруких П.П, Елистратов В.В., Сидоренко Г.И.. и др. – М.: ИАЦ Энергия, 2007 – 272 с.

10. Xi Lua, Michael B. McElroya, Juha Kiviluomac. Global potential for wind-generated electricity. Communicated by James G. Anderson, Harvard University, Cambridge, MA, April 29, 2009.

11. А.С. Большев, С. А. Фролов, М.А. Кутейников Математическое моделирование поведения морских плавучих объектов в программном комплексе “Anchored Structures”, Научно-технический сборник РМРС, вып.36, 2013, стр.68-90

12. Большев А.С., Фролов С.А., Михаленко Е.Б. Математическое моделирование поведения морских плавучих сооружений// Труды СПбГПУ, изд. СПбГПУ, 2007, №502, с.252-274.

13. Елистратов В.В. Проектирование и эксплуатация установок нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ветроэлектрические установки: учебное пособие / В.В. Елистратов, А.А. Панфилов. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2011. – 115 с.

14. СНиП 2.06.04-82*. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. - 40с.

15. СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*. – М. «Аналитик», 2012. – 111 с.

16. ISO 19906. Petroleum and natural gas industry. Arctic offshore structures. 2009. 428 p.

17. Шхинек К.Н., Балагура С.В., Большев А.С., Фролов С.А. Математическое моделирование воздействия ровного льда и торосов с заякоренными плавучими сооружениями типа FPU и платформами типа SPAR//Научно-технический сборник РМРС. 2009. № 32. С. 93-108.