



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной и системной экологии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему «Оценка эффективности использования ветровых  
энергоустановок в Курортном районе Санкт-Петербурга»

Исполнитель

(подпись)

Муляев Иван Николаевич

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

(подпись)

д.т.н., профессор кафедры прикладной и системной экологии

(ученая степень, ученое звание)

Дмитриев Алексей Леонидович

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

(подпись)

канд. геогр. наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Алексеев Денис Константинович

(фамилия, имя, отчество)

«10» 06 2022 г.

Санкт-Петербург  
2022

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ИСТОРИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ ..	5
1.1. Понятие ветроэнергетики .....	5
1.2. Строение и виды энергоустановок .....	7
1.3. История развития ветроэнергетики в России и за рубежом.....	10
ГЛАВА 2. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И СОСТОЯНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ КУРОРТНОГО РАЙОНА .....	17
2.1. Характеристика Курортного района .....	17
2.2. Экологическая обстановка района .....	18
2.3. Энергетика района.....	22
2.4. Характеристика и особенности ветрового режима района.....	24
ГЛАВА 3. РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК .....	31
3.1. Необходимые значения выработки электрической энергии для нужд Курортного района.....	31
3.2. Выбор ветровых энергоустановок, схема будущей ВЭС и её расположение .....	32
3.3. Экономические расчёты ВЭС и сравнение с традиционной электростанцией .....	37
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	41
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	44
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	47

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие цивилизации всегда приводит к увеличению потребления энергоресурсов, большую часть истории выработка электроэнергии в основном осуществлялась за счёт традиционных источников, путём использования углеводородов таких как: древесина, уголь, нефть и другие. Но сегодня, в силу высокого уровня развития цивилизации и огромной численности населения планеты, мы всё больше слышим о проблеме исчерпаемости углеводородов, и возникшие от их использования, глобальные экологические проблемы.

И для устранения данных проблем существует решение, а именно, возобновляемые источники энергии. Возобновляемые источники энергии, базируются на постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоках энергии. Например, к таким источникам такого типа относятся: солнце, движущиеся водные массы, ветер, геотермальные воды и другие. В настоящий момент такие источники энергии становятся всё более и более актуальными, как для бытового применения, так и в производстве. Это связано с проблемами транспортировки ископаемого топлива, электрообеспечения районов с плохо развитой централизованной сетью и необходимостью решения существующих экологических проблем. Доля возобновляемых источников в мировом производстве электроэнергии на данный момент составляет – 28 %.

Данная работа акцентирует внимание на энергетику, производящую энергию при помощи энергии ветра – ветроэнергетику. Данная отрасль производства энергии сейчас получает всё большую популярность, связано это с дешевизной производства таких электростанций, но оказывающее значительное влияние географические условия и характер земной поверхности, не всегда способствует стройке таких электростанций, поэтому и приходится производить большое количество расчётов и проверок для оценки эффективности и целесообразности использования таких энергоустановок на различных территориях. Доля ветряных станций в производстве

электроэнергии – 6%.

Актуальность исследования заключается в том, что экология Курортного района крайне важна, так как район является оздоровительным центром, на территории которого располагаются санатории, пансионаты, дома отдыха и другие оздоровительные учреждения, и поэтому, для сохранения благоприятной экологической обстановки в районе и производства электроэнергии, необходимо применение экологически чистых источников электроэнергии, к которым и относятся ветровые энергоустановки.

Объект исследования – ветроэнергетика

Предмет исследования – использование ветроэнергетики в Курортном районе.

Цель исследования – оценка эффективности использования ветровых энергоустановок в Курортном районе Санкт-Петербурга

Задачи исследования:

- Выяснить экологическую обстановку в Курортном районе;
- Изучить состояние энергетики Курортного района;
- Исследовать режимы ветров для использования их в качестве источников альтернативной энергии;
- Произвести расчёты требуемых мощностей и количества необходимых установок.

# ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

## 1.1. Понятие ветроэнергетики

Ветер — циркуляционное перемещение воздушных масс, вызванное неравномерностью нагрева земной поверхности (непостоянной в течение суток, сезона и в пространстве), а также вращением земли вокруг своей оси, вызывающем так называемую кориолисовую силу инерции (от греческого *καρυον* орех, ядро ореха — вид земли из космоса). Иначе говоря, это глобальные условия, вызывающие воздушные течения общей циркуляции атмосферы земли.

Однако существует множество причин местного масштаба вызывающих «местные ветры», т.е. ветры свойственные определенным районам земного шара. Местные ветры возникают независимо от более мощных воздушных течений, лишь налагаясь на них или же представляют собой местные видоизменения общих течений.

По происхождению различаются следующие местные ветры, как правило, носящие свои названия:

а) ветры, связанные с особенностями нагревания земной поверхности: бризы — в прибрежных районах морей и больших озер и водохранилищ, как разница в нагреве суши и воды; горно-долинные ветры в горах, меняющие направления дважды в сутки; ледниковые ветры, постоянно дующие вниз по склонам ледниковых долин;

б) ветры, связанные с течениями общей циркуляции атмосферы над горными массивами. При этом на подветренных склонах гор воздух получает нисходящую составляющую скорости и усиливается, в результате создаются местные ветра получившие названия фена, боры, сармы и т.п. Такие ветры определяют характерные периодические изменения в погоде: потепление и падение влажности при фене, похолодание при боре;

в) ветры связанные с течениями общей циркуляции атмосферы, но без нисходящей составляющей, а топографически усиленные в данном районе:

афганец, урсатоевский ветер в Средней Азии, каньонный ветер в Северной Америке, косава на балканском полуострове и др.

г) ветры, связанные с течениями общей циркуляции атмосферы, даже не усиленные в данном районе, но создающие в нем особый важный для хозяйственной деятельности режим погоды, приносящие потепление или похолодание, песчаную пыль или влагу: суховеи в южных областях России и Украины, сирокко в Средиземноморье, хамсин в Египте, хармаштан в Западной Африке, блиццард в Северной Америке, пурга в Северной и Центральной Азии, памперо в Аргентине и др.

д) Многочисленные пыльные вихри, шквалы, пыльные и песчаные бури, связанные с неустойчивой стратификацией (распределение температуры воздуха по вертикали) атмосферы при сильном нагревании воздуха снизу или притоке холодного воздуха в высоких слоях. С ветрами разного происхождения прежде всего имели мореплаватели начиная с древнейших времен. Поэтому не удивительно, что английский военный гидрограф и картограф, контр-адмирал Френсис Бофорт (Beaufort, 1774-1857) предложил в 1806 г. условную шкалу для оценки силы ветра в баллах по его воздействию на наземные предметы и по волнению моря.

По фамилии автора шкала получила название «шкала Бофорта» и ею по сей день пользуются моряки и к ней присоединились ветроэнергетики. В приложении 1 приведена упомянутая шкала и к ней добавлены две графы: «воздействие ветра на ВЭУ» и «условия для работы ВЭУ в данном диапазоне скорости ветра». Для сведения профессионалов заметим, что эти две графы и их характеристики предложены J.W. Twidell и A.D. Weir в 1986 г. Однако они существенно откорректированы авторами в соответствии с достижениями современной ветроэнергетики.

Основными характеристиками ветроэнергетического кадастра являются:

- среднегодовая скорость ветра, годовой и суточный ход ветра;
- повторяемость скоростей, типы и параметры функций распределения скоростей;

- максимальная скорость ветра;
- распределение ветровых периодов и периодов энергетических затиший по длительности;

- удельная мощность и удельная энергия ветра;
- ветроэнергетические ресурсы региона.

Источниками получения исходной информации являются:

а) метеостанции, на которых осуществляются измерения всех климатологических параметров, в том числе скорости ветра, обычно 4 раза в сутки. В современных метеостанциях измерения проводятся по 8 румбам (многолетние наблюдения);

б) метеостанции непрерывного наблюдения, как правило, сооружаемые на предполагаемых площадках установки ВЭУ;

в) аэрологические станции (зонды и шары), запускаемые периодически на разные высоты [3, с. 66-68].

## 1.2. Строение и виды энергоустановок

К ветроэнергетической установке (ВЭУ) обычно относят систему, состоящую из ветродвигателя, одной или нескольких рабочих машин (генератор, насос, компрессор и т.д.), служащих для выработки одного определенного вида энергии (например, электрической) и/или выполнения заданного процесса (подъема воды, сжатия воздуха, размола зерна и др.).

Под ВЭУ будем понимать комплекс технических устройств, в который входит ветроустановка и, в зависимости от схемы, аккумулирующее или резервирующее устройство, дублирующее мощность ветродвигателя, а также системы автоматического управления и регулирования режимов работы установки и ее элементов.

Ветроэлектрическая станция (ВЭС) включает несколько ВЭУ, а также распределительное устройство, объединенные территориально и управляемые с единого диспетчерского пункта.

Энергетический комплекс, состоящий из ВЭУ и других энергетических установок, например ГЭС (ГАЭС), геотермальной, солнечной и т. п., будем называть комплексной энергоустановкой (комплексная ВЭУ или ВЭС).

Большинство ветроустановок имеет ось вращения либо совпадающую с направлением ветрового потока, либо перпендикулярную ей. И очень редко встречаются ВЭУ с осью, имеющей некоторый угол (обычно близкий к 45) к направлению ветра. В связи с этим по конструктивному исполнению ВЭУ классифицируют на коллинеарные (горизонтально–или вертикально-осевые) и ортогональные (также горизонтально–или вертикально-осевые). Также ВЭУ можно классифицировать и по другим признакам.

1. По режиму работы ВЭУ различают на три основных класса: сетевые, гибридные и автономные. Сетевые ВЭУ это, как правило, установки большой единичной мощности, работающие параллельно с мощной энергосистемой. По назначению являются источниками получения и выдачи в электрическую сеть максимально возможной выработанной электроэнергии. Рекордный по мощности агрегат Enercon E-126 был смонтирован в г.Эмдем (Германия). Мощность агрегата составила 7 МВт, высота башни 124м и диаметр ротора 126м. Гибридные установки работают параллельно с независимыми электростанциями соизмеримой мощности (дизель-генераторы, малые ГЭС и др.) По назначению являются источниками электропитания для бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией номинальной мощности. Автономные же агрегаты являются источниками электропитания потребителей, не связанные с электрической сетью. В основном имеют маленькую номинальную мощность и работают, как правило, небольшое число потребителей. Автономные ВЭУ могут также быть специализированными, например водоподъемные, водогрейные и др.

2. По виду вырабатываемой энергии ВЭУ подразделяют на две группы: механические и электрические. Электрические ВЭУ, в свою очередь, подразделяют на ВЭУ постоянного и переменного тока, а механические ВЭУ –



на ветронасосные и ветросиловые.

3. По мощности ВЭУ можно разделить на четыре группы) большой мощности –свыше 1 МВт; б) средней мощности –от 100 кВт до 1 МВт; в) малой мощности –от 5 до 99 кВт; г) очень малой мощности –менее 5 кВт.

4. По частоте вращения ротора – с постоянной или переменной частотой.

5. По принципу работы ВЭУ используют силу давления ветра или аэродинамические силы.

6. По способам регулирования частоты вращения ротора—с поворотными и фиксированными лопастями.

7. По количеству лопастей –1, 2, 3 или многолопастными.

Наиболее широкое распространение в современной большой энергетике получили сетевые ВЭУ мегаваттного класса с горизонтальным расположением оси ветроколеса с тремя неподвижными или поворотными лопастями (рисунок 1.1)



JSW J82-2 Япония	Enercon E-82 Германия	Suzlon S88-2.1 Индия	Subaru S80 Япония
P = 2 МВт	2 МВт	2,1 МВт	2 МВт
Двк = 82,6 м	82 м	88 м	80 м
Генератор – Синхронный на постоянных магнитах	Синхронный, безредукторный	Асинхронный	Асинхронный с двойным питанием

Рисунок 1.1 – Современные ВЭУ различных производителей мощностью 2 МВт [8, с. 192]

Основными элементами ветроустановки горизонтально-осевого типа являются: ветроколесо (ротор), оборудованное, как правило, тремя лопастями аэродинамического профиля, поворотная гондола (или обтекатель), в которой размещены генератор, редуктор, автоматические системы контроля параметров ВЭУ и ориентации на ветер. Все это оборудование устанавливается на металлической башне, состоящей из трех секций. В ряде конструкций ВЭУ для регулирования мощностью лопасти делают поворотными, а для торможения агрегата концы лопастей поворачиваются на  $90^\circ$  [8, с. 189-192]

### 1.3. История развития ветроэнергетики в России и за рубежом

США. К середине XIX в. США было построено более 6 млн. малых ветродвигателей с единичной мощностью до 0,75 кВт, которые использовались для выработки электрической энергии, подъема воды и выполнения других работ.

Для подъема воды обычно использовались ветродвигатели с цельнометаллическими ветроколесами диаметром 3,7-4,9 м, вращающимися на горизонтальном валу и снабженные хвостовым оперением для ориентации ветроколеса по направлению ветра. Вал соединяется системой передач со штангой, которая совершает возвратно-поступательные движения и приводит в действие насос, установленный у основания башни. Ветроколесо такого типа диаметром 3,7 м развивает мощность около 120 Вт при скорости ветра 6,7 м/с и может поднять 160 л/мин воды на высоту около 7 м.

ВЭУ небольшой мощности выполняются обычно с двух- или трехлопастным ветроколесом крыльчатого типа, соединенным через редуктор с генератором постоянного тока. Они снабжаются также системой аккумулирования энергии, чаще всего аккумуляторной батареей. Многие ветронасосные установки используются до настоящего времени на западе США для целей водоснабжения в некоторых отдаленных местностях. Однако

большинство ВЭУ были вытеснены, начиная с 1930 г., энергосистемой, обеспечившей централизованным электроснабжением большинство ферм США.

Наибольшей действующей ВЭУ была установка «Смит-Путмэн». После длительных исследований по влиянию размеров ВЭУ на ее эффективность, проведенных в 1930 г., Путмэн пришел к выводу, что для получения минимальной стоимости вырабатываемой электрической энергии требуются ВЭУ больших размеров. При участии известного аэродинамика Кармана и ряда сотрудников МИТ он разработал ветродвигатель большой мощности для выработки энергии с целью питания существующей электросети Central Vermont Public Service Company. Фирма S. Morgan Smith Company (г. Йорк, Пенсильвания) спроектировала и испытала в работе установку в начале 1940 г. Двухлопастное ветроколесо крыльчатого типа диаметром 53 м и массой 16 т развивало мощность 1,25 МВт при расчетной частоте вращения 28 об/мин.

В марте 1945 г. после периодической работы в течение нескольких лет одна из лопастей получила повреждение у втулки, где предварительно отмечались определенные деформации, которые не смогли быть устранены вследствие нехватки материалов в условиях военного времени. Всесторонние экономические исследования показали, что ВЭУ в случае ее восстановления в то время не могла конкурировать с электрическими установками обычного типа. Поэтому от ее дальнейших исследований отказались.

Дания. В конце XIX в. в Дании было около 3 тыс. ветродвигателей, которые использовались в промышленности, и около 30 тыс. ветродвигателей других типов, применявшихся для бытовых целей. Общая их мощность составляла около 200 МВт. В 1890 г. правительство Дании приступило к проведению широкой программы развития ВЭУ большой мощности. В 1910 г. было построено несколько сотен таких ВЭУ. Они имели четырехлопастные ветроколеса диаметром 23 м, установленные на башне высотой 24 м и соединенные механической передачей с электрическим генератором, расположенным у основания башни. Расчетная мощность генератора

изменялась от 5 до 25 кВт.

В периоды первой и второй мировых войн энергия, вырабатывавшаяся ВЭУ такого типа, покрывала лишь небольшую часть потребности страны в электроэнергии. В этот период было установлено, что стоимость электроэнергии, вырабатываемой ими, примерно равна эквивалентной стоимости топлива, потребляемого дизельной электрической установкой.

После второй мировой войны датчане разработали и испытали три экспериментальные ВЭУ с установленной мощностью 12, 45 и 200 кВт, предназначенные для работы в энергосистеме. Они успешно эксплуатировались до 1960 г. Разработка проекта была приостановлена, когда выяснилось, что стоимость вырабатываемой электроэнергии примерно вдвое превышала в то время эквивалентную стоимость энергии теплового двигателя.

Великобритания. В конце 40-х и в течение 50-х годов значительные работы по созданию ВЭУ проводились в Великобритании. Измерения характеристик ветра были проведены в этот период в 100 местах на Британских островах.

В 1950 г. компания Vorth Scotland Hydroelectric Board провела разработку экспериментального ветродвигателя, установленного на Оркнейских островах. ВЭУ была рассчитана на мощность 100 кВт при скорости ветра 15,6 м/с. Она работала непродолжительное время в 1955 г. совместно с дизельной электростанцией, но использование ее было прекращено из-за трудностей, возникших при эксплуатации.

В 1950 фирма Enfield Cable Company разработала оригинальные ВЭУ типа Андро мощностью 100 кВт и установила их в Великобритании и в Алжире. Установка имела полую башню высотой 26 м и ветроколесо диаметром 24 м с пустотелыми лопастями, снабженными выходными отверстиями на концах. За счет возникающего перепада давлений воздух, поступающий через отверстия у основания башни, перемещается вдоль башни через расположенную турбину и выбрасывается через отверстия на концах лопастей. Установлено, что эффективность ВЭУ с пневматической передачей

мощности мала по сравнению с установками, снабженными ветроколесами обычного типа с горизонтальной осью вращения.

Франция. В период 1958-1966 гг. во Франции построено и работало несколько крупных ВЭУ. К ним относятся три установки с горизонтальной осью вращения трехлопастного ветроколеса крыльчатого типа, которые работали близ Парижа с перерывами с 1958 по 1963 г. Первая из них была рассчитана на мощность 800 кВт при скорости ветра 16,5 м/с. Ветроколесо диаметром 30 м, генератор и система передач общей массой 160 т были размещены на башне высотой 30 м. ВЭУ была снабжена синхронным генератором напряжением 3 кВ с частотой вращения 1000 об/мин при постоянной частоте вращения ветроколеса 47 об/мин и работала на общую сеть 50 Гц, 60 кВ. Напряжение повышалось до 60 кВ с помощью трансформатора, соединенного с сетью линией длиной 15 км. Две другие установки были сооружены на юге Франции. Меньшая из них с ветроколесом диаметром 21 м и частотой вращения 56 об/мин работала с асинхронным генератором с номинальной частотой вращения 1539 об/мин и развивала мощность 132 кВт при скорости ветра  $v > 12,5$  м/с. Большая из ВЭУ с расчетной мощностью 1000 кВт при скорости ветра 16,5 м/с имела массу 97 т (вместе с башней). Удельная стоимость первой из ВЭУ составила 1155 долл./кВт, в то время как установки на юге — 1000 долл./кВт (в ценах 1960 г.). Во Франции было также построено и испытано в этот период несколько экспериментальных установок с вертикальной осью вращения.

Германия. Под руководством Хюттера в ФРГ был проведен ряд усовершенствований ВЭУ, в том числе легких ветроколес с постоянной частотой вращения и системой регулирования поворотом лопастей. Для ветродвигателей использовались легкие стеклопластиковые и пластиковые лопасти, генератор устанавливался на башне из пустотелой трубы небольшого диаметра, укрепленной проволочными оттяжками. Наибольшая из ВЭУ, развивавшая 100 кВт при скорости ветра 8 м/с, успешно работала в период 1957-1968 гг. Разработки нашли применение в некоторых наиболее

совершенных ветродвигателях, строящихся до настоящего времени.

Конструкции стеклопластиковых лопастей, установленных на небольших опорах, и возможные повреждения лопастей исследовались в других странах на ветродвигателях больших размеров.

Россия и Советский Союз. До Великой Октябрьской социалистической революции в крестьянских хозяйствах России насчитывалось около 250 тыс. ветряных мельниц, которые ежегодно перемалывали половину урожая (около 33 млн т, или 2 млрд пудов зерна). С изобретением паровых машин, а затем двигателей внутреннего сгорания и электродвигателей старые примитивные ветряные двигатели и мельницы были вытеснены из многих отраслей и остались главным образом в сельском хозяйстве. В начале XX в русский ученый Н.Е. Жуковский разработал теорию быстроходного ветродвигателя и заложил научные основы создания высокопроизводительных ветродвигателей, способных более эффективно использовать энергию ветра. Они были построены его учениками после организации в 1918 году Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ). Советские ученые и инженеры теоретически обосновали принципиально новые схемы и создали совершенные по конструкции ветроэнергетические установки и ветроэлектрические станции (ВЭС) различных типов мощностью до 100 кВт для механизации и электрификации процессов сельскохозяйственного производства и других целей. Большие заслуги в создании основ ветроэнергетики имеют советские учёные и специалисты Н.В. Красовский, Г.Х. Сабинин, Е.М. Фатеев, Р.В. Секторов, К.П. Вашкевич, В.В. Сидоров и др. Промышленный выпуск электродвигателей для механического привода машин был налажен в начале XX в, а электрических ветроагрегатов с генераторами небольшой мощности – примерно в 20-годах.

В 1937 году вблизи Ялты была построена усовершенствованная ВЭС мощностью 100 кВт, находящейся от нее на расстоянии 32 км. Годовая выработка энергии составляла около 280 тыс. кВт•ч при коэффициенте использования энергии ветра 0,32. Генератор и регулирующие устройства были

установлены на вершине башни высотой 30 м. Частота вращения ветроколеса регулировалась путем поворота лопастей. Башня имела наклонную опору, установленную на тележке, которая перемещалась по кольцевой направляющей для ориентации ветроколеса на ветер.

ВЭС была сооружена по проекту первопроходцев советской промышленной ветроэнергетики (Н.В. Красовский, В.В. Уткин-Егоров, Р.В. Секторов, Г.Х. Сабинин), а конструкция башни принадлежит выдающемуся энциклопедически образованному инженеру России В.Г. Шухову (1853-1939 гг.). ВЭС успешно проработала 3 года вплоть до её разрушения во время Великой Отечественной войны в конце 1941 г.

Одновременно в 30-х годах в Советском Союзе рассматривался проект создания ветроэлектрической системы мощностью 5 МВт, но он не был реализован.

В 40-50 годах XX века в СССР получило интенсивное развитие строительство ВЭС. В этот период было налажено серийное производство специализированных и универсальных ветродвигателей мощностью от 0,7 до 11 кВт (от 1 до 15 л.с.), главным образом с механическими и электрическими трансмиссиями. В послевоенный период было выпущено более 40 тыс. ветродвигателей, в основном типов ТВ-8, ТВ-5, ТВ-12, ВЭ-2, которые с большой эффективностью применялись в колхозах и совхозах.

К концу 60-х годов XX века в СССР были созданы новые типы более совершенных унифицированных быстроходных ветроэнергетических агрегатов (ВБЛ-3, ВПЛ-4, “Беркут”, “Ветерок” и др.), в которых использовались новые типы насосов и генераторов, пневматические, электрические и др. виды приводов, более совершенные системы регулирования. Большинство ветродвигателей применялись для механизации подъема воды, особенно на пастбищах и отдельных фермах в Поволжье, на Алтае и Чёрных землях, в Казахстане, Туркмении, Узбекистане и других зонах, где они работали 250-300 дней в году. Разработка теоретических основ и создание новых конструкций ветроэнергетических агрегатов различного назначения проводятся во

Всесоюзном НИИ электрификации сельского хозяйства, Всесоюзном НИИ электромеханики, ЦАГИ и др.), Германии (Штутгарская школа ветроэнергетиков), США, Великобритании, Франции, Дании и др. странах.

В СССР число эксплуатируемых ветродвигателей (без самодельных) составляло 8-9 тысяч.

Второе дыхание ветроэнергетики получила после нефтяного кризиса 1972-1973 годов, когда многие развитые страны озаботились своей зависимостью от импорта нефти из арабских стран [3, с. 5-9].



## ГЛАВА 2. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И СОСТОЯНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ КУРОРТНОГО РАЙОНА

### 2.1. Характеристика Курортного района

Курортный район г. Санкт-Петербурга протянулся вдоль побережья Финского залива полосой, занимающей в ширину 6-8 км, длину - 45 км. Общая территория Курортного района составляет 26820 Га. Численность населения района по данным Петростата на 1 января 2022 года составляет 79842 человек [17].

В состав Курортного района входят города — Сестрорецк, Зеленогорск, поселки — Белоостров, Комарово, Солнечное, Смолячково, Серово, Песочный, Репино, Ушково, Молодежное, составляющие 11 муниципальных образований.

Исторически сложившаяся курортная направленность развития территории делает ее привлекательной для массового отдыха, занятия спортом, лечения и туризма жителей Петербурга, для всех регионов страны и зарубежья.

Подведомственными администрации Курортного района являются 56 государственных учреждений, из которых 2 казенных, 54 бюджетных

На территории района расположено 49 летних детских оздоровительных лагерей, 10 детских санаториев, 9 пансионатов, 8 домов отдыха, 9 санаториев. Наиболее крупные из них: «Белые ночи», «Дюны», «Северная Ривьера, «Сестрорецкий Курорт»; детские санатории - «Солнечное», «Жемчужина», детский санаторий - реабилитационный центр «Детские Дюны». Ежегодно в санаториях и пансионатах района поправляют свое здоровье более 300 тысяч петербуржцев и гостей города [27].

На рисунке 2.1 изображён район с его современными границами, а также обозначены все населённые пункты.

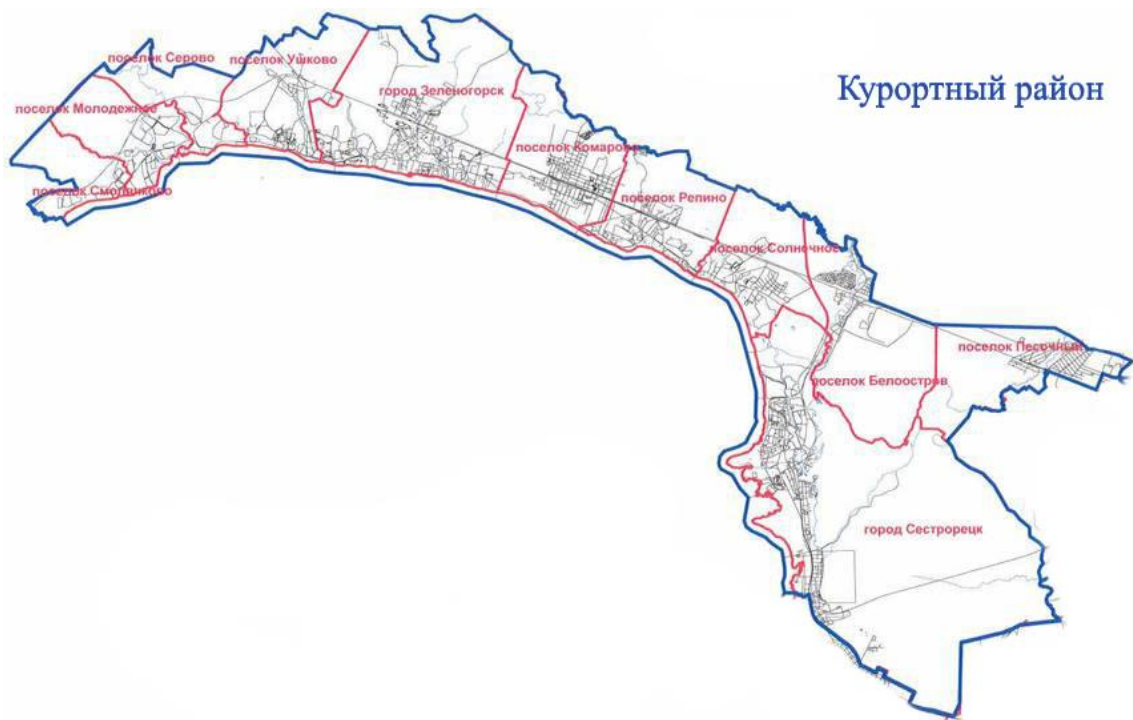


Рисунок 2.1 – Карта Курортного района

## 2.2. Экологическая обстановка района

Курортный район всегда отличался благоприятной окружающей средой и экологической обстановкой. Так, например, в рейтинге самых загрязнённых районов города по выбросам в атмосферу за 2016 год, Курортный район занимает 11 место, то есть располагается во второй половине районов, с наименьшими выбросами в атмосферу. Это говорит нам о том, что состояние атмосферного воздуха находится на хорошем уровне [19].

Возможные причины, почему же район не является абсолютно чистым с точки зрения отсутствия выбросов в атмосферу, и всё-таки происходят выбросы загрязняющих веществ в атмосферу - две.

Первая, согласно докладу «Экологическая обстановка в Курортном районе Санкт-Петербурга», это промышленность.

Исходными данными для расчетного мониторинга являются сведения о стационарных и передвижных источниках выбросов загрязняющих веществ в

атмосферный воздух. В настоящее время в базе данных Комитета имеются сведения о выбросах 794 источников загрязнения принадлежащих 42 промышленным предприятиям, находящимся на территории Курортного района. Валовый выброс загрязняющих веществ от данных источников составляет 1544,2 тонн в год. В загрязняющие вещества входят: пыль неорганическая (70-20%  $\text{SiO}_2$ ), оксид углерода, оксид азота, диоксид азота, диоксид серы и взвешенные частицы (PM 10 и PM 2.5).

Расчёты рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от выбросов стационарных источников показали, что при неблагоприятных метеоусловиях, на территории Курортного района площадное загрязнение составляет 133,2 га – 0,5% от территории района (рисунок 2.2) [10, с. 8].

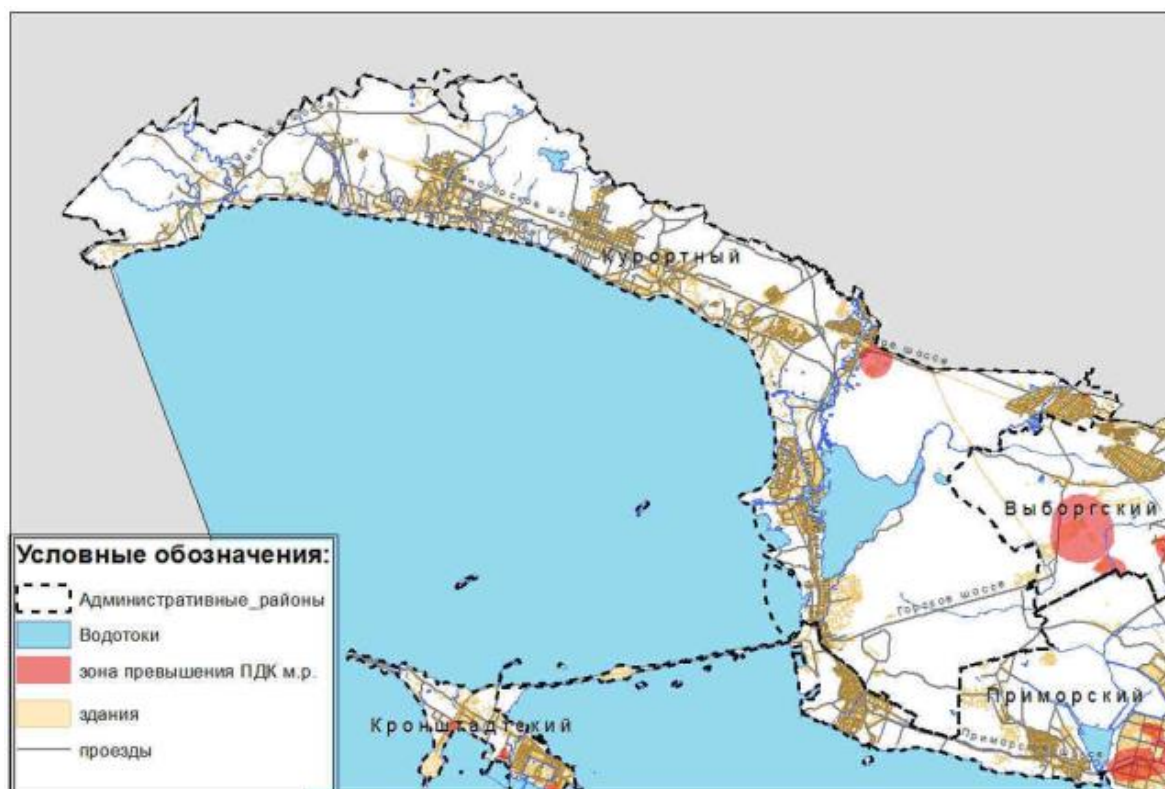


Рисунок 2.2 – Зона возможного разового загрязнения атмосферного воздуха в Курортном районе [10, с. 8]

Непосредственно на территории района, располагается лишь одна зона возможного разового превышения ПДК м.р. Действительно, на территории

зоны, изображенной на карте располагаются следующие виды предприятий:

- Конкрит Экспресс, бетонный завод;
- БЕТО+, бетонный завод;
- Аргумент, бетонный завод;
- Бетплит, предприятие по производству тротуарной плитки.

Вторая, это некоторое количество выбросов с территорий санаториев и пансионатов. Ведь курортный район всегда был знаменит своими оздоровительными учреждениями, где происходит лечение широкого профиля заболеваний: сердечно-сосудистые заболевания, заболевания органов дыхания, нервной системы, опорно-двигательного аппарата, гинекологические заболевания, заболевания желудочно-кишечного тракта, болезни системы кровообращения и так далее. Поэтому незначительное негативное воздействие, которое идёт от этих объектов, является обоснованной, ведь пользы, которая получается при их эксплуатации, значительно покрывает негатив. Также, всё это возможно благодаря той же благополучной экологической обстановке (11 место из 18 по загрязнению атмосферного воздуха), наличию высокого биоразнообразия растительного мира района, а также максимально возможные высокие нормативы по обеспеченности населения территориями зеленых насаждений, для Курортного района это – 18 м<sup>2</sup>/чел [2].

С крупными санаториями, которые располагаются на территории района, можно ознакомиться при помощи таблицы 2.1

Таблица 2.1 – Санатории Курортного района [23]

Название санатория	Адрес
Балтийский берег	г. Санкт-Петербург, г. Зеленогорск, ул. Курортная, д. 1
Белые ночи	г. Санкт-Петербург, г. Сестрорецк, 38-й км Приморского шоссе, д. 2
Дюны	г. Санкт-Петербург, г. Сестрорецк, Заречная дорога, д. 1
Северная Ривьера	г. Санкт-Петербург, г. Зеленогорск, Приморское шоссе, д. 570
Сестрорецкий курорт	г. Санкт-Петербург, г. Сестрорецк, ул. М. Горького, д. 2;

Продолжение таблицы 2.1

Название санатория	Адрес
Черная речка	г. Санкт-Петербург, п. Молодёжное, Приморское шоссе, д. 648

С крупными пансионатами, которые располагаются на территории района, можно ознакомиться при помощи таблицы 2.2

Таблица 2.2 – Пансионаты Курортного района [20]

Название пансионата	Адрес
Аквамарин	г. Санкт-Петербург, г. Зеленогорск, Приморское шоссе, д. 593
Балтиец	г. Санкт-Петербург, п. Репино, Приморское шоссе, д. 427
Буревестник	г. Санкт-Петербург, п. Репино, Нагорная ул., д. 15
Восток-6	г. Санкт-Петербург, п. Смолячково, Приморское шоссе, д. 704
Гелиос Отель	г. Санкт-Петербург, г. Зеленогорск, Приморское шоссе, д. 593
Заря	г. Санкт-Петербург, п. Репино, Приморское шоссе, д. 423

С крупными детскими санаториями, которые располагаются на территории района, можно ознакомиться при помощи таблицы 2.3

Таблица 2.3 – Детские санатории Курортного района

Название детского санатория	Адрес
Солнечное	г. Санкт-Петербург, п. Солнечное, ул. 2-я Боровая, д. 6
Жемчужина	г. Санкт-Петербург, п. Ушково, Пляжевая ул., д. 10
Детские Дюны	г. Санкт-Петербург, г. Сестрорецк, 37 км, Приморское шоссе, д. 1

Также, на территории Курортного района располагается 4 ООПТ регионального значения, с ними можно ознакомиться при помощи таблицы 2.4

Таблица 2.4 – ООПТ Курортного района [12]

Название ООПТ	Вид ООПТ	Площадь
Гладышевский заказник	Заказник	84.19 км <sup>2</sup>
Комаровский берег	Памятник природы	1.8 км <sup>2</sup>
Озеро Щучье	Заказник	11.57 км <sup>2</sup>
Сестрорецкое болото	Заказник	18.77 км <sup>2</sup>

Каждый из перечисленных санаториев, пансионатов и детских санаториев, кроме положительного влияния на здоровье человека, также и оказывает негативное влияние на окружающую среду, в виде выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Например, согласно положительному заключению экспертизы №78-2-1-3-0067-16 говорится, что для приготовления горячей воды, и дальнейшего её использования в Сестрорецком курорте, используется котельная, работающая на твёрдом топливе (угле). Вместе с сжиганием угля идёт выброс загрязняющих веществ такие как: оксид углерода, диоксид серы, оксид и диоксид азота. Всё это снижает качество атмосферного воздуха района, тем самым негативно влияя и на самого человека, в виде увеличения случаев заболевания органов дыхания [21].

### 2.3. Энергетика района

ПАО «Россети Ленэнерго» – одна из крупнейших и старейшая распределительная сетевая компания страны. С 2005 года, в результате реформы энергетической отрасли, основными функциями «Россети Ленэнерго» являются передача электрической энергии по сетям 110-0,4 кВ, а также присоединение потребителей к электрическим сетям на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области [14].

Филиал ПАО «Россети Ленэнерго» «Северные электрические сети» оказывает услуги по передаче электроэнергии и мощности, а также осуществляет технологическое присоединение энергопринимающих устройств

(энергетических установок) юридических и физических лиц к электрическим сетям.

Обслуживает следующие районы:

- Курортный район;
- Песочинский район;
- Сертоловский район;
- Всеволожский район.

Курортный район электрических сетей (КРЭС) обслуживает территорию г. Сестрорецка, поселков: Разлив, Тарховка, Александровская, Горская, Лисий Нос, Солнечное, г. Зеленогорск, Репино, Ушково, Комарово, Серово, Смолячково, Приветненское, Молодёжное, Сосновая Поляна.

В работу данного филиала входит строительство и обслуживание: распределительных подстанций, трансформаторных подстанций, воздушных линий, кабельных и установок наружного освещения [24].

На данный момент, на территории Курортного района, отсутствует какая-либо из видов электростанций, но, в соседнем Приморском районе, располагается крупная Северо-Западная ТЭЦ с установленной электрической мощностью – 900 МВт, в котором в качестве основного топлива используется природный газ. Именно эта электростанция обеспечивает Курортный район необходимой ей электроэнергией. Из этого следует вывод, что антропогенная нагрузка на экологическую систему района минимальна (Вред идёт лишь от подстанций, ЛЭП и котельных, располагающихся на территории санаториев и пансионатов) [25].

Поэтому, открытие собственной электростанции внутри района - важно, для удовлетворения повышающихся собственных нужд в электроэнергии сегодня и в будущем, так как они могут подняться в связи с постройкой новых жилых массивов. И именно поэтому оценка эффективности ветроустановок, как использование чистой альтернативной энергетики, от которой отсутствует выброс загрязняющих веществ в атмосферу, является целью моей работы. Однако возможно загрязнение иного рода, в виде шумового и вибрационного

загрязнения территорий, находящихся в непосредственной близости к ВЭС, что при планировке такой электростанции и выборе будущего места расположения, необходимо обязательно учитывать.

#### 2.4. Характеристика и особенности ветрового режима района

Город Санкт-Петербург расположен на территории на стыке умеренно континентального и умеренно морского климатических поясов. Циклоны Балтийского моря дают теплое, влажное и краткосрочное лето, но вместе с тем и холодную, продолжительную и сырую зиму.

Сам же Курортный район города, растянулся вдоль побережья залива. Из-за чего он вся его территория, расположена в умеренно морском климатическом поясе. Значительное влияние морских воздушных масс Атлантического океана и Балтийского моря обуславливают мягкую зиму с частыми оттепелями и умеренно-теплое лето с достаточной солнечной радиацией [16].

Чтобы охарактеризовать ветровой режим Курортного района были рассчитаны следующие характеристики:

1. Расчёт среднемесячной и среднегодовой скорости ветра по данным метеонаблюдений за 8 лет;
2. Выяснить повторяемость ветра по градациям скорости;
3. Определить повторяемость ветров на территории района;
4. Построение розы ветров для исследуемой территории [9, с 21].

Данные за восьмилетний период по среднедневной скорости ветра и направлению ветра, были взяты из архива погоды Gismeteo, от НПЦ «Мэп Мейкер» [29].

В среднегодовом ходе повторяемости ветров в Курортном районе Санкт-Петербурга преобладают ветра западных направлений – 50.4%, а именно, западные ветра – 28.3%, юго-западные ветра – 16.3% и северо-западные ветра – 5.8%. Среднегодовая скорость ветра равняется – 3.3 м/сек (на высоте 10 м).



Начнём со среднемесячных и среднегодовых значений скорости ветра. Результаты проведённого анализа приведены в таблице 2.5

Таблица 2.5 – Среднемесячные и среднегодовые скорости ветра Курортного района за 2014-2021 г. (в м/с).

Года	Месяца												Ср. годовая
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2014	2.5	2.8	3.6	3.9	3	2.6	2.6	2.9	2.4	3.1	2.4	3.6	3.0
2015	3.6	3.6	3.5	4.2	3.4	3.8	2.7	2.6	2.1	2.9	3	4.8	3.4
2016	2.2	3.4	2.5	3	2.5	3.3	3.5	3.3	3	3.6	3.7	4.1	3.2
2017	3.7	3	3.8	4.1	3.6	3.5	2.8	3	2.6	2.8	3.8	3.5	3.4
2018	3.4	2.5	3.1	2.9	2.8	3.7	3	3.5	4.8	3.6	3.7	2.7	3.3
2019	2.8	3.8	3.7	2.6	2.8	3.3	2.8	2.7	2.7	3.3	2.6	3.9	3.1
2020	4.9	4.7	3.8	4.1	3.4	3.1	3.1	2.6	3.4	2.9	4	3.2	3.6
2021	2.1	2.5	3.7	3.8	3.1	2.1	2.7	3.6	2.8	4.1	4.5	3.6	3.2

На основе полученных данных из таблицы 2.5 можно сказать следующее:

Наибольшее значение среднемесячной скорости ветра достигается в зимний период, а именно в январе. Затем идёт снижение скорости ветра в весеннем периоде и достигает низких значений в летний сезон, а наименьшее значение среднемесячной скорости ветра достигается в июле. Далее в осенний период идёт рост среднемесячной скорости ветра.

Среднегодовая скорость ветра на протяжении изучаемого периода времени колеблется от 3.0 м/с и до 3.6 м/с (Среднее значение – 3.3 м/с). Согласно шкале Бофорта (таблица 1), года со среднегодовой скоростью ветра 3.0-3.5 м/с, получают 2 балла (хоть они и достаточно близки к 3 баллам) и их можно охарактеризовать как лёгкий, и такая скорость ветра является стартовым условием для работы ВЭУ. В году, со среднегодовой скоростью ветра 3.6 м/с, получает 3 балла по шкале Бофорта, и такую скорость ветра можно охарактеризовать как слабый, при котором стартуют все ветроустановки, но для мощных ВЭУ это минимальная мощность.

Теперь перейдём к повторяемости ветра по градациям скорости, графически результаты представлены на рисунке 2.3

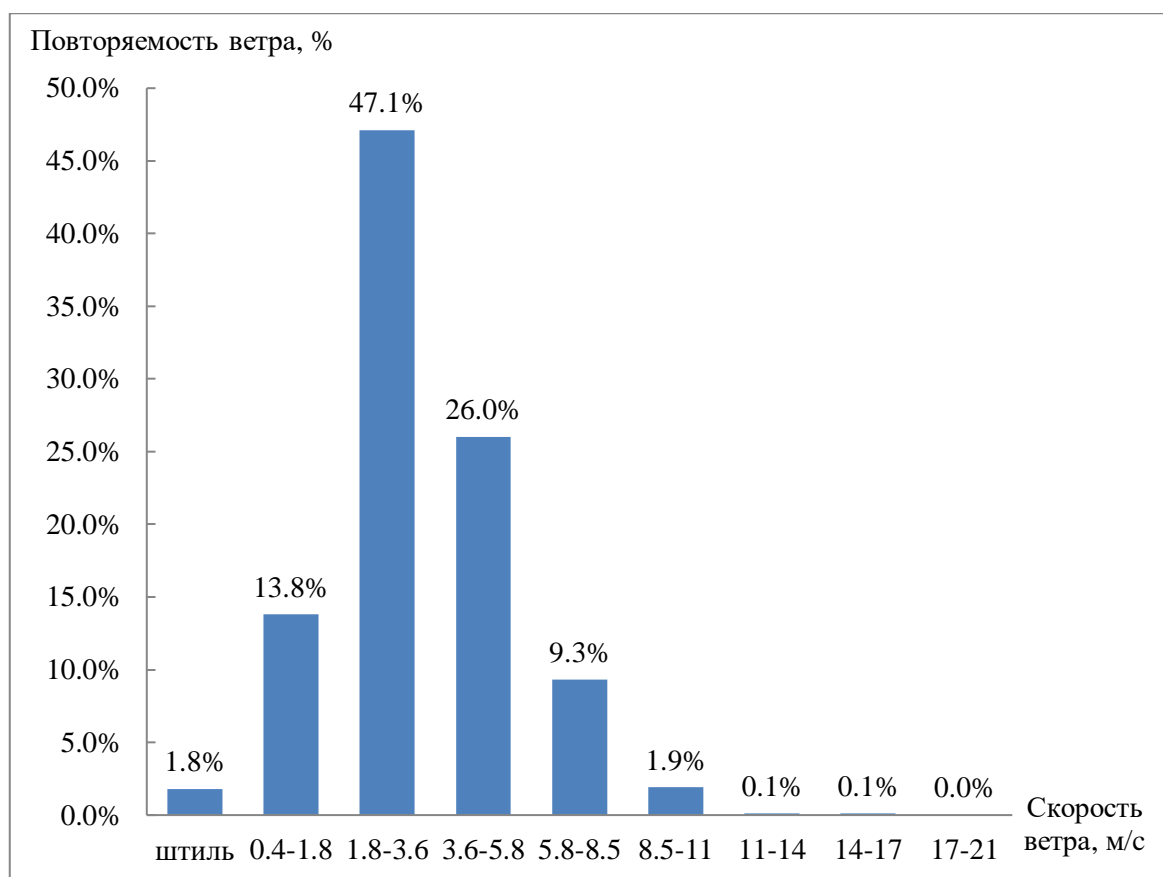


Рисунок 2.3 – Повторяемость ветра по градациям скорости

Согласно графику на рисунке 2.3, повторяемость ветра со значением, которое является недостаточной для старта ветроустановок (даже маломощных) согласно шкале Бофорта, составляет всего 15.6 %.

Наибольшей повторяемостью обладают ветра со скоростью 1.8-3.6 м/с и ветра со скоростью 3.6-5.8 м/с, со значением повторяемости в 47.1 % и 26 % соответственно, или же в сумме – 73.1 %. Первую группу можно охарактеризовать как легкий, со скоростью ветра которая является стартовым условиям для ВЭУ. Вторая же группа характеризуется как слабый, при котором стартуют все ветроустановки, включая и мощных ВЭУ, хоть и на минимальной мощности.

Повторяемость же ветров, при которых мощность ВЭУ достигает более высоких % или вовсе же достигает номинальной, в сумме получается всего – 11.4 %, большую часть которых составляют ветра со скоростью 5.8-8.5 м/с,

которую можно охарактеризовать как - умеренный. Мощность ВЭУ достигает 50% от номинальной.

Более подробная информация о повторяемости ветра по градациям скорости в различные годы можно получить из таблицы 2.6

Таблица 2.6 – Повторяемость ветра по градациям скорости в Курортном районе 2014-2021 г. (в %).

Скорость ветра	Года							
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
штиль	2.9	4.7	3.0	0.8	1.1	1.7	0.3	0.3
0.4-1.8	13.7	13.2	14.9	13.3	16.1	15.7	9.6	13.6
1.8-3.6	53.6	42.0	45.2	44.3	44.4	49.4	44.7	52.9
3.6-5.8	21.9	25.0	27.3	28.8	27.5	24.3	30.4	23.0
5.8-8.5	6.1	12.1	7.2	12.2	8.9	7.2	11.8	8.6
8.5-11	1.5	3.0	2.5	0.6	1.4	1.7	3.0	1.4
11-14	0.3	-	-	-	-	-	0.3	0.3
14-17	-	-	-	-	0.6	-	-	-
17-21	-	-	-	-	-	-	-	-

Таким образом, по среднегодовой скорости ветра и по повторяемости ветра по градациям скорости, можно сделать вывод о том, что Курортный район обладает приемлемым ветропотенциалом, для строительства ВЭС

Теперь перейдём к повторяемости ветра района по направлениям (среднегодовое значение). Рассмотрим таблицу 2.7

Таблица 2.7 – Повторяемость ветра по направлениям

Направление	Года								Ср. значение
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
С	4.5%	6.9%	8.3%	7.0%	9.5%	8.3%	5.2%	8.3%	7.3%
СВ	13.8%	8.1%	10.0%	10.3%	12.0%	11.7%	11.8%	16.4%	11.8%
В	10.5%	6.6%	11.7%	6.1%	16.5%	8.6%	8.3%	13.9%	10.3%
ЮВ	9.9%	8.4%	7.7%	11.2%	10.6%	7.1%	6.6%	6.4%	8.5%
Ю	12.0%	9.5%	9.7%	12.8%	10.1%	17.1%	14.6%	9.4%	11.9%
ЮЗ	15.0%	17.0%	16.8%	17.0%	14.3%	13.7%	22.3%	13.9%	16.3%
З	28.5%	36.3%	24.8%	32.7%	23.0%	27.4%	28.4%	25.0%	28.3%
СЗ	5.7%	7.2%	11.1%	2.8%	3.9%	6.0%	2.8%	6.7%	5.8%

Согласно данным из таблицы 2.7 можно сказать следующее:

Преобладающими ветрами на исследуемой территории являются западные ветра – 28.3% и юго-западные ветра – 16.3%. Наименее повторяемыми ветрами являются – северо-западные ветра – 5.8% и северные

ветра – 7.3%.

Таким образом, мы получаем следующую розу ветров (рисунок 2.4).

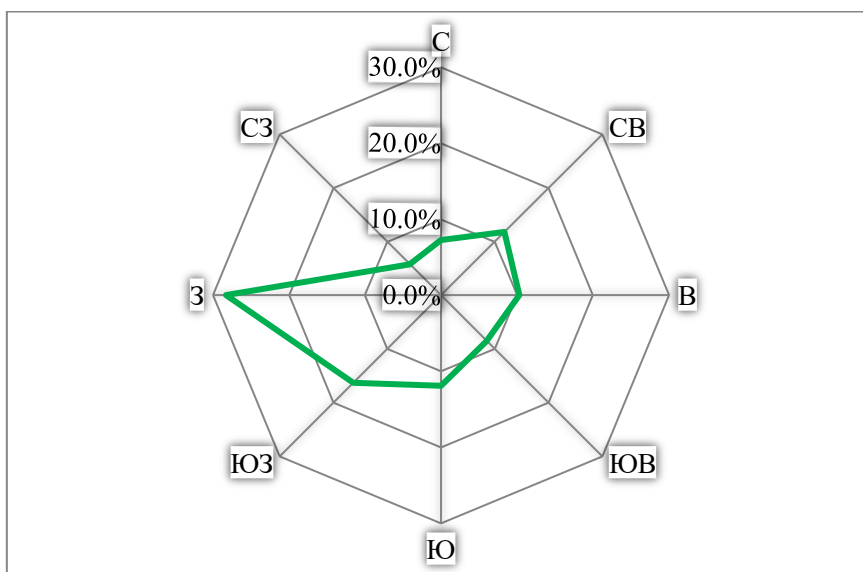


Рисунок 2.4 – Роза ветров Курортного района за 2014-2021 г.

Для того чтобы более точно изучить направление и повторяемость ветров, которые зависимы от сезона года, были отдельно взяты и изучены направления ветра за январь и июль. Были получены следующие результаты, приведенные в таблице 2.8 и таблице 2.9.

Таблица 2.8 – Повторяемость ветра по направлениям за январь

Направление	Года								Ср. значение
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
С	-	10.0%	8.3%	16.7%	9.7%	7.1%	0.0%	3.2%	6.9%
СВ	-	3.3%	4.2%	10.0%	9.7%	7.1%	0.0%	32.3%	8.3%
В	-	13.3%	29.2%	0.0%	16.1%	14.3%	9.7%	29.0%	14.0%
ЮВ	-	6.7%	12.5%	3.3%	22.6%	14.3%	3.2%	3.2%	8.2%
Ю	--	16.7%	8.3%	13.3%	12.9%	17.9%	9.7%	12.9%	11.5%
ЮЗ	-	30.0%	16.7%	26.7%	16.1%	17.9%	51.6%	9.7%	21.1%
З	-	16.7%	12.5%	26.7%	9.7%	10.7%	19.4%	6.5%	12.8%
СЗ	-	3.3%	8.3%	3.3%	3.2%	10.7%	6.5%	3.2%	4.8%

Из таблицы 2.8 можно понять, что преобладающими ветрами на территории района в зимний период, а именно за январь, являются юго-западные ветра – 21.1% и восточные ветра – 14%. Наименее повторяемыми являются северо-западные ветра – 4.8% и северные ветра – 6.9%.

Таблица 2.9 – Повторяемость ветра по направлениям за июль

Направление	Года								Ср. значение
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
С	3.2%	6.9%	6.5%	6.5%	12.9%	20.7%	0.0%	10.0%	8.3%
СВ	19.4%	3.4%	6.5%	19.4%	48.4%	20.7%	19.4%	10.0%	18.4%
В	9.7%	0.0%	9.7%	6.5%	12.9%	3.4%	6.5%	10.0%	7.3%
ЮВ	12.9%	6.9%	0.0%	12.9%	6.5%	3.4%	0.0%	6.7%	6.2%
Ю	6.5%	3.4%	3.2%	9.7%	3.2%	6.9%	12.9%	3.3%	6.1%
ЮЗ	6.5%	13.8%	6.5%	6.5%	3.2%	6.9%	19.4%	6.7%	8.7%
З	35.5%	44.8%	54.8%	38.7%	12.9%	34.5%	38.7%	43.3%	37.9%
СЗ	6.5%	20.7%	12.9%	0.0%	0.0%	3.4%	3.2%	10.0%	7.1%

Из таблицы 2.9 можно понять, что преобладающими ветрами на территории района в летний период, а именно за июль, являются западные ветра – 37.9% и северо-восточные ветра – 18.4%. Наименее повторяемыми ветрами являются южные ветра – 6.1% и юго-восточные – 6.2%

Таким образом, получаем следующие розы ветров за январь (рисунок 2.5) и за июль (рисунок 2.6).

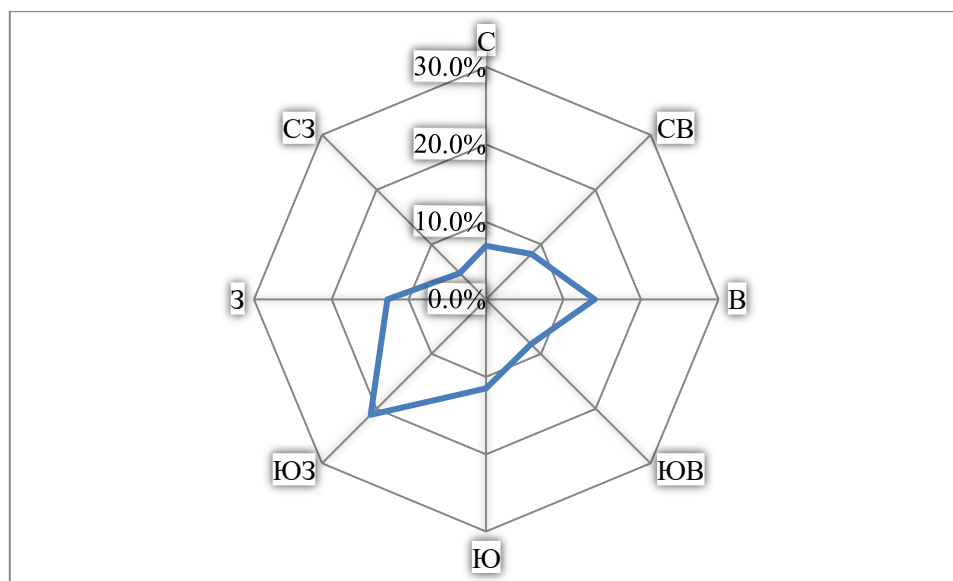


Рисунок 2.5 – Роза ветров Курортного района за январь за 2014-2021 г.

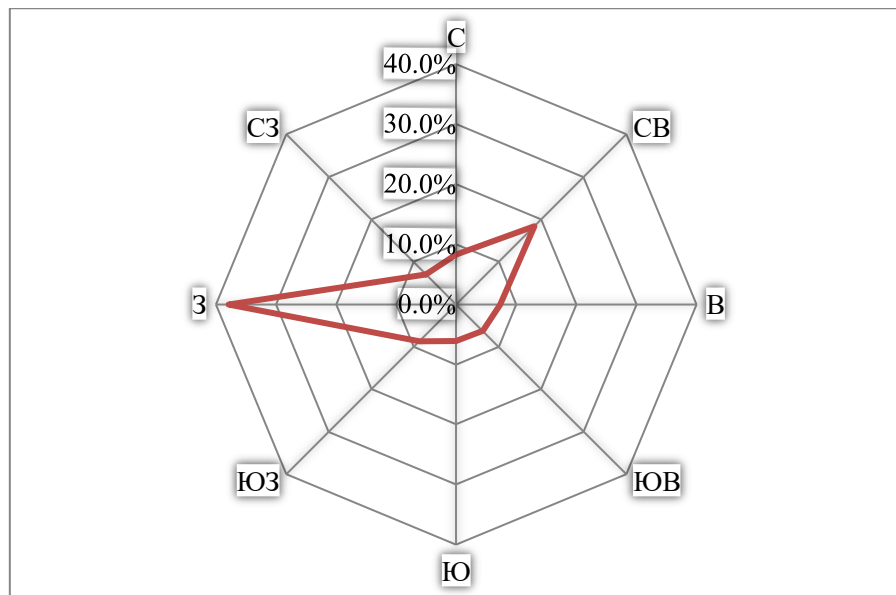


Рисунок 2.6 – Роза ветров Курортного района за июль за 2014-2021 г.

## ГЛАВА 3. РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

### 3.1. Необходимые значения выработки электрической энергии для нужд Курортного района

Перед тем, как перейти к выбору ветровых энергоустановок, её схемы, и местоположения, для начала нам нужно рассчитать необходимые мощности и количества электроэнергии для удовлетворения нужд курортного района.

Для того чтобы произвести такие расчёты, воспользуемся нормативами потребления электроэнергии по СПб, утверждённые Комитетом по тарифам Санкт-Петербурга от 19.11.2021 [1].

Чтобы рассчитать среднее значение потребления электроэнергии по району на 1 человека, возьмём категорию жилых помещений – многоквартирные дома, оборудованные в установленном порядке стационарными электроплитами для приготовления пищи, количество комнат в жилом помещении – 2, количество человек, проживающих в помещении – 2, норматив потребления – 95 кВт\*ч в месяц. Также воспользуемся данными, по численности населения района и всего города Санкт-Петербурга. По данным Петростата на 1 января 2022 года численность населения г. Санкт-Петербурга – 5377503 человек, а численность населения Курортного района – 79842 человек

Благодаря этим данным, мы можем рассчитать, сколько в среднем потребляет за год один петербуржец, для этого найдём результаты производства количества потребления электроэнергии петербуржцем за 1 месяц (95 кВт\*ч) и количество месяцев в году (12 месяцев), и получаем в результате, что на 1 жителя Санкт-Петербурга приходится 1140 кВт\*ч энергии в год.

Теперь, зная сколько электроэнергии требуется на 1 человека в год, мы можем вычислить, сколько электроэнергии понадобится для полного удовлетворения нужд жителей района, для этого найдём результат

произведения потребления одного жителя СПб (1140 кВт\*ч) на численность населения района (79842 чел), и получаем в результате 91.02 млн. кВт\*ч.

### 3.2. Выбор ветровых энергоустановок, схема будущей ВЭС и её расположение

После произведённых расчётов, нужно определиться с моделью (моделями) ветровых энергоустановок, которые будут использоваться в ВЭС.

При изучении рынка ветровых энергоустановок были выделены следующие компании: Enercon, Falcon, Vestas, Nordex, WinWind, Gamesa, Siemens, Multibird, НоваВинд. Мною была выбрана следующая модель: ВЭУ L100 2.5 МВт от «НоваВинд», пример изображён на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – ВЭУ 2.5 МВт от НоваВинд на примере Кармалиновской ВЭС [15]

С техническими характеристиками данной ветровой энергоустановки можно ознакомиться на рисунке 3.2



привод:	прямой привод (без редуктора)
высота башни:	75/99/135
диаметр ветроколеса:	100 м
габариты гондолы:	4,89х3,55х3,64 м
масса гондолы (без генератора):	18 тонн
масса ступицы:	20 тонн
масса генератора:	52 тонн
масса башни:	200 тонн
башня:	секционная модульная башня

Рисунок 3.2 – Технические характеристики L100 2.5 МВт [11]

Данная ветровая энергоустановка была выбрана по следующим причинам:

1. Наличие положительного опыта в использовании данных ветроустановок на примере уже существующих ВЭС (Адыгейская ВЭС, Кочубеевская ВЭС, Кармалиновская ВЭС, Марченковская ВЭС, Бондаревская ВЭС, Медвеженская ВЭС) [18];

2. Наличие завода АО «НоваВинд» в г. Волгодонске Ростовской области, на территории которой производятся все необходимые детали от ветровой энергоустановки (статор генератора, ротор и главный подшипник ВЭУ, генератор, ступица, гондола), благодаря чему упрощается эксплуатация будущих ветровых энергоустановок, в случае их поломки, а также упрощает процесс покупки и установки дополнительных ВЭУ, в случае необходимости увеличения мощностей ВЭС, для удовлетворения возросших нужд в электроэнергии [13];

3. Оптимальное значение мощности ветровой энергоустановки (2.5 МВт), занимаемой ею площади (~ 1 га на 1 ВЭУ), а также низкая стартовая скорость ветра (2.1 м/с), благодаря чему можно получить больше мощности на

низких ветрах. Номинальная мощность ВЭУ достигается при 13 м/с и максимальная скорость ветра, при которой ВЭУ будет работать, 28 м/с.

Теперь произведём расчёты, сколько будет производить один ВЭУ на территории Курортного района, на основе наших исследований касательно ветропотенциала данной местности.

Воспользуемся данными по повторяемости ветра по градациям скорости, формулой 3.1 расчёта мощности ветряка, которая в первую очередь зависит от скорости ветра:

$$N = 4.81 \cdot 10^{-4} \cdot D^2 \cdot V^3 \cdot E \cdot n_p \cdot n_g, \quad (3.1)$$

где  $D$  – диаметр ветроколеса, м;

$V$  – скорость ветра, м/с;

$n_p$  – КПД редуктора;

$n_g$  – КПД генератора [5].

А также воспользуемся формулой (3.2) суммы энергий:

$$W = \sum P_i \cdot T_i, \quad (3.2)$$

где  $P_i$  – мощность ВЭС при средней скорости ветра  $i$  – градации;

$T_i$  – продолжительность  $i$  – градации скорости ветра [8].

Также возьмём  $T$  равной 8760 часов (Количество часов в году). Так как ротор будет находиться на высоте примерно 150 метров, то нужно сделать корректировку значений средней скорости ветра, при помощи использования коэффициента возрастания. При высоте - 150 м, коэффициент возрастания будет равен 1.7, его мы и будем использовать. Благодаря этому получаем следующие результаты, представленные в таблице 3.1 [7].

Таблица 3.1 – Расчёт производства электроэнергии одной ВЭУ

Скорость ветра, м/с	Вероятность скорости ветра, %	Количество часов в году, ч	Мощность ВЭУ, кВт	Производство электроэнергии, кВт*ч
штиль	1.8	161.7	0	0
0.7-3.1	13.8	1205.4	7.81	9414.096
3.1-6.1	47.1	4124.2	110.7	456544.7
6.1-9.9	26.0	2279.3	582.8	1328403
9.9-14.5	9.3	810.3	2066	1674092
14.5-23.8	1.9	163.8	2500	409479.3
17.6-22.4	0.1	9.2	2500	23064.15
23.8-28.9	0.1	6.1	2500	15208.33
28.9-35.7	0.0	0.0	0	0
Итого	100	8760	-	3916206

Таким образом, чтобы выяснить, сколько ветровых энергоустановок для удовлетворения все нужд населения Курортного района необходимо, рассчитать отношение количества необходимой электрической энергии, которая равняется 91.02 млн. кВт\*ч, к количеству электрической энергии производимой одной ВЭУ, которая равняется 3.92 млн. кВт\*ч. В результате получаем 23 ветровых энергоустановок

Суммарная мощность же ВЭС рассчитывается произведением количества ВЭУ (23 ед) на мощность каждой ВЭУ (2.5 МВт), и получаем, что мощность ВЭС будет составлять 57.5 МВт.

Таким образом, эта ВЭС по количеству ветровых энергоустановок (23 ВЭУ), будет максимальная схожа с Кармалиновской ВЭС (24 ВЭУ), благодаря чему по ней можно будет рассчитать финансовые расходы.

Чтобы расположить такую ВЭС, с таким количеством ветровых энергоустановок потребуется большая площадь.

Согласно многочисленным экспериментам на ветроустановками, было установлено оптимальное расстояние между ВЭУ, при которых воздушный поток успевает восстановиться перед следующей ветротурбиной. Так, считается, что отдельные ветродвигатели должны располагаться в шахматном порядке с расстоянием между ними, равным 20 диаметрам ветроколеса [6].

Исходя из характеристик ВЭУ, диаметр ветроколеса равен 100 м, таким образом расстояние между ветроустановками должно быть от 2000 м. Получаем

следующую схему ветропарка (рисунок 3.3)

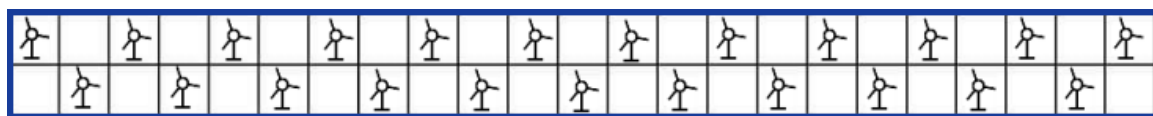


Рисунок 3.3 – План ветряной электростанции с 23 ВЭУ

Занимаемая площадь ветряной электростанции равняется  $\approx 44 \text{ км}^2$  или 4400 га (22 километров в длину и 2 километров в ширину).

Перейдём к выбору территории на которой возможно расположить данную ВЭС.

При изучении участков, используя Яндекс Карты и Публичную кадастровую карту – Росреестр, мною был выбран следующий участок, который изображён на рисунке 3.4 [22]



Рисунок 3.4 – Выбранный участок для ВЭС

Данный участок акватории, естественно, отсутствует в публичной кадастровой карте – Росреестр, так как в нём включены только земельные участки.

Данный участок является оптимальным, с точки зрения отдалённости от жилых массивов, санаториев и пансионатов, и пляжа, а также, самое главное, от ООПТ регионального значения – Комаровский берег, являющимся местом гнездования птиц, и на территории ООПТ отмечены 143 вида птиц, из которых 80% видов являются перелётными (расстояние от берега до ВЭС – 2.5 км), благодаря чему не нарушаются нормы по шумовому и вибрационному воздействию. Также при строительстве ВЭС на данном участке, полностью отпадает необходимость в вырубке лесных массивов, благодаря чему не произойдёт ухудшение экологической обстановки в районе.

Однако из-за того, что строительство ВЭС будет на акватории, а не на земельном участке, а ВЭУ приспособлены именно к земле, будут необходимы дополнительные договоренности с производителями ВЭУ (и дополнительных денежных вложений), с целью модификации электроустановок, после которой будет возможна их установка на акватории.

Также при выборе этого участка, можно выделить следующее, что ВЭС протянется вдоль берега Курортного района, примерно от г. Сестрорецк и до г. Зеленогорск, тем самым становясь новой достопримечательностью, благодаря чему повысится туристический потенциал района.

### 3.3. Экономические расчёты ВЭС и сравнение с традиционной электростанцией

Наконец, нужно рассчитать предполагаемые экономические затраты, стоимость производимой электроэнергии на ВЭС и сроки окупаемости данной электростанции.

На основе опыта уже существующих ВЭС с данным типом ветроустановок выходит следующее:

Адыгейская ВЭС – 60 ВЭУ. Объём инвестиций 23 млрд. рублей. На один ВЭУ выходит – 0.38 млрд рублей.

Кочубеевская ВЭС – 84 ВЭУ. Объём инвестиций 28 млрд. рублей. На один ВЭУ выходит – 0.33 млрд. рублей.

Кармалиновская ВЭС – 24 ВЭУ. Объём инвестиций 8 млрд. рублей. На один ВЭУ выходит – 0.33 млрд. рублей.

Таким образом, в среднем на один ВЭУ затрачивается – 0.35 млрд. рублей. Из этого следует, что на предполагаемый ветропарк с 23 ВЭУ понадобится не менее – 8 млрд. рублей.

Данная сумма, не учитывает дополнительных финансовых вложений, которые могут возникнуть, при строительстве ВЭС на акватории, точные значения могут быть получены, лишь после обсуждения и заключения дополнительных договорённостей с производителями ВЭУ компанией «НоваВинд».

Источником финансирования может быть фонд, а именно:

Совместный фонд «Фортум» и «РОСНАНО». «Фортум» занимается возобновляемой энергетикой в России с 2018 года. Созданный Фонд развития ветроэнергетики инвестирует в проекты по строительству генерирующих объектов, функционирующих на основе использования ВИЭ (возобновляемые источники энергии) [26]

Теперь перейдём к окупаемости. На территории Санкт-Петербурга одноставочный тариф за электроэнергию выглядит следующим образом – 4.98 руб./кВт\*ч [28].

Так как ВЭС, будет производить 91.02 млн. кВт\*ч электроэнергии в год, то выходит, что годовой доход с ВЭС будет равняться 453.28 млн. рублей. При стоимости ВЭС в 8 млрд. рублей, срок окупаемости составит  $\approx 18$  лет. А учитывая, что расчётный срок службы ВЭУ в среднем составляет 20-25 лет, то мы получаем хорошие результаты.

Благодаря строительству данной электростанции, которая работает за счёт силы ветра, а не благодаря сжиганию ископаемого топлива, ВЭС экономит тонны выбросов. Для того чтобы рассчитать сколько же именно ВЭС экономит выбросов произведём следующие расчёты.

Возьмём, к примеру, ТЭС, которая будет работать на угле. Удельная теплота сгорания угля = 29.3 МДж на 1 кг. При переводе из удельной теплоты в электрическую энергию воспользуемся следующим соотношением – 1 МДж = 0.278 кВт\*ч. Получаем, что за счёт 1 кг угля производится 8.15 кВт\*ч электрической энергии. Но фактически, с учётом КПД энергетических установок равный 29%, получаем, что из 1 кг угля производится 2.36 кВт\*ч электрической энергии. Для удовлетворения нужд района необходимо 91.02 млн. кВт\*ч, следовательно нужно найти результат отношения необходимой энергии к количеству энергии производимой из 1 кг угля. Получаем следующий результат – 38.51 млн. кг или 38511 тонн угля в год.

Теперь рассчитаем, выбросы, которые происходят при сжигании угля, для этого воспользуемся уравнением реакции горения угля, которое выглядит следующим образом (формула 3.3):



где C – углерод;

O<sub>2</sub> – кислород;

CO<sub>2</sub> – углекислый газ;

Q – тепловая энергия.

По таблице Менделеева находим молярную массу углерода: M (C) = 12 г/моль. Далее находим молярную массу углекислого газа: M (CO<sub>2</sub>) = 12 + 16\*2 = 44 г/моль. Находим соотношение молярной массы углекислого газа к молярной массе углерода: 44/12 = 3.66. Далее находим произведение массы углерода и соотношения молярных масс углекислого газа к углероду, учитывая, что уголь не полностью состоит из углерода, а является смесью, и поэтому возьмём, содержание углерода в угле = 0.7 от массы угля, получаем следующее: 38511 \* 0.7 \* 3.66 = 98665 тонн углекислого газа.

Таким образом, строительство и эксплуатация ВЭС вместо ТЭС на угле, позволяет сэкономить 98.7 тыс. тонн выбросов CO<sub>2</sub> в год. Но данное

химическое соединение, в большей степени оказывает влияние на глобальное состояние атмосферного воздуха Земли, а именно на соотношение  $\text{CO}_2$  к другим газам, действуя как парниковый газ, который усиливает парниковый эффект на Земле. Но, при сжигании угля также и происходит выброс в атмосферу других химических соединений, которые уже оказывают негативное влияние как на экологическую обстановку района, так и на людей, пример этих загрязняющих веществ: оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), оксид углерода ( $\text{CO}$ ), летучая зола. Так, например, диоксид серы и оксиды азота вызывают кислотные дожди [4].



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долгое время человек использует энергию ветра себе во благо, строя ветровые станции, которые выполняют различные функции, например как мельницы или электростанции. Современная практика и опыт различных стран доказывает, что использовать энергию ветра – это достаточно выгодное дело, и на это есть несколько причин:

1. Стоимость самого ветра равна нулю, в отличие от ископаемого или иного горючего топлива;
2. Электроэнергия производится из энергии ветра, а не за счёт сжигания углеводородов, продукты горения которых, наносят вред человеку и окружающей среде.

На основе расчётов и анализов, приведённых в данной выпускной квалификационной работе, можно сделать следующие выводы:

На территории Курортного района – благоприятная экологическая обстановка. Которая достигается за счёт высоких нормативов по обеспеченности населения территориями зеленых насаждений (18 м<sup>2</sup>/чел), большим количеством санаториев, пансионатов, домов отдыха и оздоровительных лагерей (85 объектов), низким уровнем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (11 из 18 место среди районов СПб по выбросам), а также расположением 4 ООПТ регионального значения.

Снабжение Курортного района электрической энергии осуществляется Северо-Западной ТЭЦ, которая расположена в Приморском районе. Наличие на территории района филиала ПАО «Россети Ленэнерго, в лице «Северные электрические сети», которая оказывает услуги по передаче электроэнергии и мощности, и присоединение потребителей к электрическим сетям на территории Санкт-Петербурга.

Среднегодовая скорость ветра за изучаемый 8-ми летний период, колеблется от 3.0 м/с и до 3.6 м/с (на высоте 10 м). В среднегодовом ходе повторяемости ветра в Курортном районе преобладают ветра западных

направлений – 50.4% (западные ветра – 28.3%, юго-западные ветра – 16.3% и северо-западные ветра – 5.8%). Наибольшей повторяемостью, обладают ветра со скоростью 1.8-3.6 м/с и ветра со скоростью 3.6-5.8 м/с, со значением повторяемости в 47.1 % и 26 % соответственно, или же в сумме – 73.1 %.

Преобладающими ветрами в течение всего года на исследуемой территории являются западные ветра – 28.3% и юго-западные ветра – 16.3%. Преобладающими ветрами на территории района, в зимний период, а именно за январь, являются юго-западные ветра – 21.1% и восточные ветра – 14%. Преобладающими ветрами на территории района, в летний период, а именно за июль, являются западные ветра – 37.9% и северо-восточные ветра – 18.4%.

Для удовлетворения собственных нужд района в электрической энергии необходимо – 91 млн. кВт\*ч (без учёта потерь при транспортировке электроэнергии по сетям, на собственные нужды электростанции, а также на многочисленные санатории, пансионаты, наружное освещение района и для производственных предприятий).

Для ВЭС будут использоваться следующие ветроустановки – ВЭУ L100 2.5 МВт от «НоваВинд». Количество ветровых энергоустановок – 23. Мощность ВЭС – 57.5 МВт. Занимаемая площадь ветропарка = 44 км<sup>2</sup> или 4400 га.

Два предполагаемых места для постройки ВЭС. С целью минимизации воздействия ВЭС на население и окружающую среду, в виде шумового, вибрационного и визуального загрязнения, приоритет переходит ко второму варианту размещения станции, хоть и для этого потребуются дополнительных финансовых вложений, договорённостей с производителем ВЭУ и большего времени на строительство ВЭС.

Стоимость предполагаемой ВЭС не менее 8 млрд. рублей (без учёта дополнительных вложений, для постройки на акватории). Источником финансирования может быть Совместный фонд «Фортум» и «РОСНАНО». Предполагаемый срок окупаемости ВЭС = 18 лет, что при условии среднего срока службы ВЭС в 20-25 лет, это говорит о хорошей окупаемости.

За счёт использования ВЭС, экономится 98.7 тыс. тонн выбросов углекислого газа, если бы электрическая энергия необходимая для удовлетворения нужд населения Курортного района производилось на ТЭС, работающей на угле.

Таким образом, строительство ВЭС на территории Курортного района является обоснованным, с точки зрения: ветропотенциала; наличия удобного участка под строительство электростанции; отсутствия выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от такого типа электростанции, благодаря чему не будет ухудшаться экологическая обстановка района. Однако, для успешной реализации проекта по строительству данной ВЭС, потребуются значительные финансовые вложения, и особые договорённости с компанией «НоваВинд».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О внесении изменений в распоряжение Комитета по тарифам Санкт-Петербурга от 19.10.2016 № 119-р и признания утратившим силу некоторых распоряжений Комитета по тарифам Санкт-Петербурга: распоряжение от 19.11.2021. - № 130-р.
2. О зелёных насаждениях в Санкт-Петербурге: закон Санкт-Петербурга от 28 июня 2010 года. - № 396-88.
3. Безруких П.П. Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие). М.: – ИД «ЭНЕРГИЯ», 2010, 320 с.
4. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.1. Топливо: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2011. – 84 с.: ил 15.
5. В.Г.Лабейш. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учеб. пособие. - СПб.: СЗТУ, 2003.-79 с.
6. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. – М.:Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
7. Горяев А.А., Бутаков С.В. Расчёт ветроэнергетического кадастра: методические указания к выполнению контрольной работы. – Архангельск САФУ, 2013. – 30с.
8. Елистратов В. В. Возобновляемая энергетика / В. В. Елистратов. — 3-е изд., доп. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. — 424 с.
9. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие / Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015 – 128 с.
10. Экологическая обстановка в Курортном районе Санкт-Петербурга / Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга – 2017 г.

11. Ветроустановка 2.5 МВт [Электронный ресурс] / НоваВинд. Режим доступа: <https://novawind.ru/production/wey25/> (Дата обращения: 01.05.22).
12. ГКУ «Дирекция особо охраняемых природных территорий Санкт-Петербурга» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://oort.spb.ru/> (Дата обращения: 05.05.22).
13. Завод НоваВинд [Электронный ресурс] / НоваВинд. Режим доступа: <https://novawind.ru/production/novawind-plant/> (Дата обращения: 01.05.22).
14. Информация о компании. [Электронный ресурс] / РОССЕТИ ЛЕНЭНЕРГО. Режим доступа: <https://rosseti-lenenergo.ru/about/> (Дата обращения: 19.04.22).
15. Кармалиновская ВЭС начала поставки на энергорынок [Электронный ресурс] / Страна РОСАТОМ. Режим доступа: <https://strana-rosatom.ru/2021/04/02/karmalinovskaya-ves-nachala-postavki-n/> (Дата обращения: 01.05.22).
16. Климатические условия [Электронный ресурс] / Виртуальный музей Курортного района. Режим доступа: [http://virtmuseum.spb.ru/interactive\\_map/climat.php](http://virtmuseum.spb.ru/interactive_map/climat.php) (Дата обращения: 21.04.22).
17. Курортный район. [Электронный ресурс] / Администрация Санкт-Петербурга. Режим доступа: [https://www.gov.spb.ru/gov/terr/reg\\_kurort/information/](https://www.gov.spb.ru/gov/terr/reg_kurort/information/) (Дата обращения: 18.04.22).
18. Наши проекты [Электронный ресурс] / НоваВинд. Режим доступа: <https://novawind.ru/production/our-projects/> (Дата обращения: 01.05.22).
19. Невидимая опасность: самые экологически грязные районы Петербурга [Электронный ресурс] / SPbHomes. Режим доступа: <https://spbhomes.ru/science/rejting-samykh-gryaznykh-rajonov-spb/> (Дата обращения: 19.04.22).
20. Пансионаты Курортного района [Электронный ресурс] / Курорт онлайн. Режим доступа: [http://www.kurort-on-line.ru/region.php?r=1&entry\\_id=539](http://www.kurort-on-line.ru/region.php?r=1&entry_id=539) (Дата обращения: 02.05.22).

21. Положительное заключение экспертизы №78-2-1-3-0067-16 [Электронный ресурс] / ООО «Союзпетрострой-Эксперт». Режим доступа: <https://sestroretskykurort.ru/upload/kelnic.objects/f79/f79e98c1771818df230fa1249ff65e2c.pdf> (Дата обращения: 10.05.22).
22. Публичная кадастровая карта [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pkk.rosreestr.ru/> (Дата обращения: 02.05.22).
23. Санатории Курортного района [Электронный ресурс] / Курорт онлайн Режим доступа: [http://www.kurort-online.ru/region.php?r=1&entry\\_id=541](http://www.kurort-online.ru/region.php?r=1&entry_id=541) (Дата обращения: 02.05.22).
24. Северные электрические сети. [Электронный ресурс] / РОССЕТИ ЛЕНЭНЕРГО. Режим доступа: <https://rosseti-lenenergo.ru/about/filials/severnye/> (Дата обращения: 19.04.22).
25. Северо-Западная ТЭЦ [Электронный ресурс] / Интер РАО – Электрогенерация. Режим доступа: <https://iraogeneration.ru/stations/sztecg/> (Дата обращения: 18.05.22).
26. Совместный инвестиционный фонд «Фортум» и «РОСНАНО» стал победителем нового этапа программы поддержки ВИЭ-генерации [Электронный ресурс] / Фортум. Режим доступа: [https://www.fortum.ru/media/2021/09/sovместnyy-investicionnyy-fond-fortum-i-rosnano-stal-pobeditelem-novogo-etapa-programmy-podderzhki-vie-generacii\\_](https://www.fortum.ru/media/2021/09/sovместnyy-investicionnyy-fond-fortum-i-rosnano-stal-pobeditelem-novogo-etapa-programmy-podderzhki-vie-generacii_) (Дата обращения: 02.05.22).
27. Статистика. Курортный район в цифрах [Электронный ресурс] / Администрация Санкт-Петербурга. Режим доступа: [https://www.gov.spb.ru/gov/terr/reg\\_kurort/statistic/](https://www.gov.spb.ru/gov/terr/reg_kurort/statistic/) (Дата обращения: 01.05.22).
28. Тарифы на электроэнергию по Санкт-Петербургу [Электронный ресурс] / «ЕИРЦ Петроэлектросбыт». Режим доступа: [https://www.pes.spb.ru/for\\_customers/electricity\\_tariffs/elektrosnabzhenie/](https://www.pes.spb.ru/for_customers/electricity_tariffs/elektrosnabzhenie/) (Дата обращения: 10.05.22).
29. Gismeteo [Электронный ресурс] / НПЦ «Мэп Мейкер». Режим доступа: <https://www.gismeteo.ru/> (Дата обращения: 21.04.22).

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Сила ветра по шкале Бофорта и её влияние на условия работы современных  
ВЭУ

Балы Бофорта	Скорость ветра, м/с	Характеристика силы ветра	Наблюдаемые эффекты воздействия ветра	Воздействие ветра на ВЭУ	Условия для работы ВЭУ в данном диапазоне скорости ветра
0	0,0–0,4	Штиль	Дым из труб поднимается вертикально вверх	Нет	Отсутствуют
1	0,4–1,8	Тихий	Дым поднимается с отклонением от вертикали. Флюгеры неподвижны на воде появляется рябь	Нет	Отсутствуют
2	1,8–3,6	Легкий	Ветер ощущается лицом, шелестят листья. На воде отчетливое волнение	Начинают вращаться значительное количество ВЭУ	Стартовые условия. Минимальная мощность
3	3,6–5,8	Слабый	Появляются отдельные барашки (гребни) на отдельных волнах. Колеблются листья на деревьях. Развиваются легкие флаги	Стартуют все ветроустановки	Для многолопастных водоподъемных установок условия хорошие. Для мощных ВЭУ минимальная мощность
4	5,8–8,5	Умеренный	Колеблются тонкие ветки деревьев, на воде много барашков. Поднимается пыль	Мощность ВЭУ достигает 50% номинальной	Хорошие
5	8,5–11	Свежий	Начинают раскачиваться лиственные деревья, все волны в барашках	Мощность ВЭУ достигает 80–90%	Хорошие
6	11–14	Сильный	Раскачиваются большие ветки деревьев, гудят провода, пенятся гребни волн	Мощность ВЭУ достигает номинальной	Очень хорошие
7	14–17	Крепкий	Все деревья раскачиваются, с гребней волн срывается пена	Номинальная или максимальная мощность	Вполне приемлемые
8	17–21	Очень крепкий	Ломаются ветки деревьев, трудно идти против ветра. С волн срываются клочья пены	Максимальная мощность, отключение небольшого количества ВЭУ	Допустимые
9	21–25	Шторм	Небольшие разрушения, срываются дымовые трубы	Массовое отключение ВЭУ	Предельно допустимые
10	25–29	Сильный шторм	Значительные разрушения, деревья вырываются с корнем	Нагрузки расчетные	Недопустимые
11	29–34	Жестокий шторм	Широкомасштабные разрушения	Нагрузки расчетные	Недопустимые
12	Более 34	Ураган	Опустошительные разрушения	Нагрузки расчетные. Возможны некоторые повреждения	Недопустимые